



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos –ERIS-

**APLICACIÓN DE GEOTEXTILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE
DEL TRATAMIENTO TERCIARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA
AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA.**

Jorge Mario Estrada Asturias

Asesorado por el Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE GEOTEXTILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE
DEL TRATAMIENTO TERCIARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA
AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

ASESORADO POR EL ING. FÉLIX ALAN DOUGLAS AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi estudio especial titulado:

APLICACIÓN DE GEOTEXTILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE DEL TRATAMIENTO TERCIARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

Jorge Mario Estrada Asturias
asturiasjm@gmail.com
Carné No. 10 000 8074



Guatemala, 21 de octubre de 2016

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

**APLICACIÓN DE GEOTEXILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE
DEL TRATAMIENTO TERCARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA
AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Elaborado por el ingeniero Jorge Mario Estrada Asturias, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente me suscribo de usted.
Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. FÉLIX ALAN DOUGLAS AGUILAR CARRERA
Asesor del estudio



Guatemala, 24 de octubre de 2016

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos (ERIS):

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

APLICACIÓN DE GEOTEXILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE DEL TRATAMIENTO TERCARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Presentado por el estudiante:

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

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

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

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 26 de octubre de 2016

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera y, M.Sc. Ing. Joram Matías Gil Laroj, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada en Letras M.A. Virsa Valenzuela Morales, Colegiada No. 6237, al trabajo del estudiante Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, titulado: **APLICACIÓN DE GEOTEXTILES EN FILTRACIÓN LENTA COMO PARTE DEL TRATAMIENTO TERCIARIO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS “ING. ARTURO PAZOS”, COLONIA AURORA II, ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA,** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veintiséis días del mes de octubre de 2016.

Imprimase
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Jesús de la Merced

Jesús mío, Patrón Jurado, todo lo que hago en mi vida lo dedico a ti. A la luz tuya todo sale bien. En ti confío.

Mi esposa

Claudia Samantha Oliva Paiz:

Mi amiga, mi apoyo, mi inspiración, mi compañera de vida. Los logros más grandes de mi vida los he alcanzado a tu lado, y este nuevo no hubiera culminado sin la motivación y el empuje que siempre me brindas. ¿Cómo no iba a dedicarte este nuevo logro?

Mis hijos

Juan Fernando y Gilberto Javier:

Constituyen la fuerza que mueve el motor de mi vida. Que este trabajo les sirva de ejemplo e inspiración para trazarse un plan de vida, fijarse objetivos, luchar por alcanzarlos y, una vez logrados, mantener la humildad, dedicándolos a Dios nuestro Señor.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Magna casa de estudios superiores, por albergarme, recibirme y formarme en los campos de la ciencia.

La Facultad de Ingeniería USAC

Alma mater, porque no solo me brindó formación superior, sino que ahora me recibe como docente. Fuente de sabiduría y de sagrados alimentos.

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos:

Porque me forjó en la especialidad de la profesión que actualmente desempeño, pero sobre todo porque me enseñó que en la USAC aún hay escuelas que tienen mística, hermandad y valores.

Ingeniero Adán Ernesto Pocasangre Collazos:

Porque fue quien me motivó a ingresar a la ERIS, y por su amistad hacia mi padre, Ing. José Eduardo Estrada Mazariegos (Q.E.P.D).

Ingeniero Pedro Cipriano Saravia Celis:

Ejemplo a seguir no solo como profesional en aspectos técnicos, sino como una cultísima persona, digna de imitar. Una especial amistad me une a usted. Además fue quien motivó la realización del presente estudio.

**Ingeniero Félix Douglas
Aguilar Carrera:**

Por su apoyo en asesorar el presente trabajo y por sus enseñanzas, no solo en lo técnico sino también como ejemplo personal para ser un profesional correcto, exitoso y con valores.

**Instituto de Fomento
Municipal (INFOM):**

Noble institución que, aún antes de ingresar a laborar en ella, ya era sustento de mi familia. Luego me vio crecer profesionalmente y aún me alberga como funcionario. Ha sido el verdadero complemento de mi formación en el campo del agua y el saneamiento.

**Laboratorio de Agua de
INFOM:**

“Mi laboratorio”, como cariñosamente le llamo. Veintiún años laborando en él han sido verdadera escuela. A Aracely Carrera, Byron Rivera, Rubén Castañeda, Lilian Castillo, Juanita Alfaro, William Estrada, William Xil, Alejandra Serrano, Lucrecia Dardón (QEPD), y otros compañeros que han pasado por sus áreas, cada uno de los cuales puso su grano de arena en la construcción de este trabajo.

Don Tereso Pérez:

Operador de la Planta de Tratamiento Aurora II, maestro constructor artífice de la obra física del presente estudio. Su colaboración fue vital para materializar las ideas, diseños, y experimentos de este logro. Me transmitió e inculcó cariño a la Planta de Tratamiento con el ejemplo de la dedicación que pone a su trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
FIGURAS.....	V
TABLAS.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXIV
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. LA FILTRACIÓN DEL AGUA.....	1
1.1.1. Historia de la filtración.....	3
1.1.2. Mecanismos de la filtración.....	4
1.1.2.1. Cernido.....	6
1.1.2.2. Sedimentación.....	6
1.1.2.3. Intercepción.....	6
1.1.2.4. Difusión.....	7
1.1.2.5. Impacto inercial.....	7
1.1.2.6. Acción hidrodinámica.....	7
1.1.2.7. Fuerzas de Van der Waals.....	8

	1.1.2.8.	Fuerzas electrostáticas.....	8
	1.1.2.9.	Puente químico.	9
1.1.3.		La filtración lenta en arena.	10
1.1.4.		Control de operación de un filtro lento.....	12
	1.1.4.1.	Medición del caudal.....	12
		1.1.4.1.1. Vertederos.....	12
	1.1.4.2.	Medición de la pérdida de carga	13
		1.1.4.2.1. Uso de piezómetros en filtración lenta.....	14
	1.1.4.3.	Análisis del medio filtrante.....	16
		1.1.4.3.1. Granulometría	16
	1.1.4.4.	Lavado del material filtrante	16
1.2.		LOS GEOTEXILES Y SU APLICACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUA	17
	1.2.1.	Aplicaciones de los geotextiles en filtración de agua.	18
	1.2.2.	Geotextiles DURMAN.....	20
1.3.		LOS TRATAMIENTOS TERCARIOS DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE FILTRACIÓN.....	21
1.4.		EL JACINTO DE AGUA (<i>EICHORNIA CRASSIPES</i>).....	23
2.		MARCO METODOLÓGICO	25
	2.1.	DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DEL NÚMERO ÓPTIMO DE MUESTRAS.	25
	2.2.	PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL FILTRO	27
	2.3.	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN ...	38
3.		RESULTADOS.....	41

3.1.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA.	41
3.2.	PRUEBA DE LA HIPÓTESIS PARA LA DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS DE DOS POBLACIONES.....	49
3.3.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE OPERACIÓN EXPRESADOS COMO PÉRDIDA DE CARGA.....	53
4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	55
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Ubicación de la Planta de Tratamiento “Ing. Arturo Pazos”.....	XXXI
2. Concepto de la tasa de filtración como función del caudal, área y altura del medio filtrante.....	2
3. Representación gráfica de los términos de la Ley de Darcy para la estimación de la pérdida de carga en filtros lentos.	14
4. Perfil de la pérdida de carga a través del lecho de arena con una <i>schmutzdecke</i> completamente desarrollada.	15
5. Descripción del geotextil utilizado, según el catálogo DURMAN.....	20
6. Ubicación de las unidades de filtración como tratamiento terciario en los procesos de tratamiento de aguas residuales.	22
7. Morfología del Jacinto de Agua (<i>Eichornia crassipes</i>).....	24
8. Vista del estado físico del filtro lento al inicio de la investigación.	28
9. Falso fondo instalado en el interior del filtro lento.	29
10. Esquema del medio filtrante convencional en el interior del filtro lento.....	30
11. Esquema del medio filtrante modificado, reduciendo 40% del espesor de arena y aplicando el geotextil.	31
12. Esquema de la disposición de los piezómetros en el interior del filtro para medición de la pérdida de carga en cada tramo del lecho filtrante.....	32

13. Vista de la disposición real de los piezómetros en el interior del filtro para medición de la pérdida de carga.	33
14. Disposición de sifones en el exterior del filtro para la colocación de los piezómetros.....	34
15. Piezómetro múltiple para evaluar la pérdida de carga.....	35
16. Dispositivo para la medición de la altura de sobrenadante en el interior del filtro... ..	36
17. Vertedero utilizado para regular el flujo a la entrada del filtro.	37
18. Vista del estado físico del filtro lento al final de la investigación	38
19. Comparación de la evolución de la remoción de color aparente vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional.....	58
20. Comparación de la evolución de la remoción de color aparente vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional.....	59
21. Comparación de la evolución de la remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional.....	60

TABLAS

I. Clasificación general de los filtros de agua	3
II. Capacidad adicional necesaria en plantas de tratamiento por medio de filtros lentos	11
III. Valores de composición típica del Jacinto de Agua (<i>Eichornia crassipes</i>) cultivado en aguas residuales	23
IV. Valores de t de <i>Student</i> para un intervalo del 95% de confianza	27
V. Resumen de resultados del análisis fisicoquímico, utilizando el medio filtrante convencional de arena.....	42
VI. Resumen de resultados del análisis fisicoquímico, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante.....	43
VII. Porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como DQO y DBO ₅ utilizando el medio filtrante convencional	44
VIII. Porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como DQO y DBO ₅ , una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante.....	45
IX. Porcentajes de remoción de carga de nutrientes expresada como FÓSFORO TOTAL y NITRÓGENO TOTAL utilizando el medio filtrante convencional	46
X. Porcentajes de remoción de carga de nutrientes expresada como FÓSFORO TOTAL y NITRÓGENO TOTAL, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante.....	47
XI. Porcentajes de remoción de COLOR utilizando el medio filtrante convencional	48

XII. Porcentajes de remoción de COLOR, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante.....	48
XIII. Resumen de porcentajes de remoción de cada parámetro estudiado, obtenidos con el medio filtrante convencional y con el medio modificado con el geotextil.....	49
XIV. Resumen de cálculo del factor “Z” y condición de la hipótesis nula.....	52
XV. Comportamiento de la altura del agua en cada manguera del piezómetro múltiple con el uso del medio filtrante convencional.....	53
XVI. Comportamiento de la altura del agua en cada manguera del piezómetro múltiple con el uso del medio filtrante con geotextil	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	centímetro
h	hora
l	litro
l/s	litro por segundo
m	metro
m/h	metro por hora
m ³	metro cúbico
m ³ /h	metro cúbico por hora
m ³ /m ² /día	metro cúbico por metro cuadrado por día
mg/l	miligramo por litro
mm	milímetro
msnm	metro sobre el nivel del mar
nm	nanómetro
NMP/100 ml	número más probable en 100 mililitros de muestra
°C	grado Celsius
pH	potencial de hidrógeno
t	tiempo
v	velocidad
μm	micrómetro
μS/cm	microSiemen por centímetro

GLOSARIO

Absorbancia	También conocida como “densidad óptica”, se define como la relación logarítmica entre la intensidad de la luz que incide sobre una muestra y la intensidad de esa misma luz que es transmitida a través de esa muestra.
Antracita	Es el carbón mineral de más alta pureza, con las concentraciones de carbón más altas por unidad de volumen (de hasta un 95%). Tiene su origen en el proceso llamado “carbonificación”, que consiste en la transformación de los materiales orgánicos por migración paulatina a temperaturas moderadas y alta presión, gracias a la deshidrogenación completa. Es de color negro, aspecto brillante, y muy duro.
Coefficiente de Uniformidad	Es la razón entre aberturas de tamices que permiten el paso de 60% y 10% del material granulado del que se desea conocer su granulometría.
Coliformes Fecales	Son bacterias que forman parte del grupo coliforme total, que fermentan la lactosa con producción de gas a $44\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un período de 24 ± 2 horas, cuando se investigan por el método de los tubos múltiples de fermentación. A este grupo también se le designa como termotolerante o termorresistente.

Coliformes Totales	Grupo de bacterias que comprende todos los bacilos aerobios y anaerobios; facultativos, Gram-negativos y no esporulados, que producen ácido y gas al fermentar la lactosa
Color	Propiedad organoléptica del agua que puede estar asociada a sustancias en solución o en suspensión. El primero es conocido como color verdadero y el segundo como color aparente, ambos medidos en una escala de "Hazen" basada en una solución de platino y cobalto y que puede determinarse por colorimetría visual, o bien por fotometría, midiendo absorbancia entre 575 y 585 nanómetros.
Demanda bioquímica de oxígeno	Cantidad de oxígeno molecular (O_2) necesario para la degradación por vía biológica de la materia orgánica biodegradable presente en el agua.
Demanda química de oxígeno	Cantidad de oxígeno molecular (O_2) necesario para la degradación por vía química de la materia orgánica presente en el agua.
Diámetro equivalente	En la caracterización de partículas no esféricas en los lechos filtrantes, se define como el diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen de la partícula considerada.

Diámetro efectivo	En caracterización de medios granulares, es la abertura ideal del cedazo que deja pasar el 10% del material particulado del que se desea conocer su granulometría.
Esfericidad	La esfericidad de una partícula se define como el resultado de la división del área superficial de la esfera de igual volumen a la del grano por el área superficial de la partícula considerada.
Fermentación	Proceso de transformación de la materia orgánica compuesta por moléculas de tamaño pequeño, fundamentalmente disuelta, en un conjunto de ácidos volátiles de cadena corta, (siendo los más comunes el acético, el propiónico y el butírico), gases (principalmente anhídrido carbónico, hidrógeno y nitrógeno), nuevas células y otros productos.
Filtración lenta	Proceso unitario de tratamiento de agua donde esta se hace pasar a velocidades entre 2 a 14 m ³ /m ² /día por un medio filtrante de granulometría, expresada como tamaño efectivo menor a 0.45 mm y coeficiente de uniformidad menor a 3.
Filtración rápida	Proceso unitario de tratamiento de agua donde esta se hace pasar por un medio filtrante a velocidades mayores a 0,2 m ³ /m ² /hora, es decir, >120 m ³ /m ² /día.

Geotextil	Se define como un material textil plano, permeable y polimérico, que se emplea en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. Los polímeros suelen ser de origen sintético tales como poliamidas, poliésteres y poliolefinas (polietileno y polipropileno). Generalmente se les divide en tres grandes grupos: geotextiles, geomembranas y geocompuestos.
Granulometría	Conjunto de características físicas de un cierto medio filtrante granulado que se utiliza para la filtración de agua.
Hidrólisis	Proceso de transformación de moléculas de gran tamaño en moléculas pequeñas, realizado mediante la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos.
Lirio Acuático	Nombre común de la especie <i>Eichornia crassipes</i> .
Metanogénesis	Proceso que consiste en la conversión, por acción de bacterias anaeróbicas estrictas que reciben el nombre de metanogénicas, de los ácidos orgánicos volátiles y el hidrógeno en metano, anhídrido carbónico, agua y amonio.

Nutrientes	Cuando este concepto se emplea en términos de calidad del agua, suele llamársele así a los elementos y compuestos macro constituyentes necesarios para el metabolismo de la flora acuática; considerándose entre ellos principalmente al nitrógeno y al fósforo en cualesquiera de sus combinaciones inorgánicas.
Oxígeno Disuelto	Concentración de oxígeno molecular (O ₂) que se encuentra disuelto en el agua.
Piezómetro	Es un tubo en el que, estando conectado por uno de los lados a un recipiente donde se encuentra un fluido, el nivel se eleva hasta una altura equivalente a la presión del fluido en el punto de conexión u orificio piezométrico, es decir, hasta el nivel de carga del mismo.
<i>Schmutzdecke</i>	Término en idioma alemán. Biopelícula o capa de material biológico, principalmente biomasa, que se forma en la superficie de los lechos filtrantes, donde las partículas son atrapadas y la materia orgánica es biológicamente degradada.
Zeolitas	Son minerales aluminosilicatos microporosos que destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente. La zeolita natural ocurre en rocas sedimentarias, volcánicas u metamórficas.

RESUMEN

Se evaluó la aplicación de geotextiles en filtración lenta como parte del tratamiento terciario de aguas residuales domésticas, con la finalidad de comparar el desempeño del medio convencional de arena con el del medio auxiliado por una capa superior de geotextil. La comparación se realizó para establecer si dicho material puede ayudar a reducir el espesor del lecho filtrante de arena, y por tanto, los costos de construcción, operación y mantenimiento de los filtros lentos aplicados a aguas residuales con fines de reuso y posible “reciclaje”.

Se justificó en que el tratamiento terciario de aguas residuales por medio de biofiltro o *wetlands* tiene la desventaja de producir sólidos suspendidos. Las sustancias húmicas y clorofilas no son completamente degradadas, por lo que la prevalencia de color en el agua hace inviable su reutilización haciendo necesario un tratamiento terciario de filtración lenta.

La medición de la eficiencia de la filtración lenta auxiliada con geotextiles fue enfocada en dos aspectos: el primero es la capacidad de remoción y mejoramiento de parámetros de calidad fisicoquímica; el segundo es el comportamiento de sus parámetros hidráulicos de operación, altura de sobrenadante y pérdida de carga como indicadores de colmatación.

El sujeto de estudio fue el filtro lento ubicado a la salida de los biofiltros de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Ing. Arturo Pazos” en la Colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala.

Finalmente, se llegó a la conclusión de que el geotextil no es adecuado para aplicarlo en filtración lenta cuando el medio filtrante sea antracita o arena con diámetro específico menor a 0.45 mm. Esto es debido a que la colmatación se produce en un tiempo extremadamente corto que no permite la adecuada formación y crecimiento de la capa biológica en la superficie del medio filtrante, por lo que no se logra una adecuada remoción de los parámetros de contaminación del agua. Es decir, los parámetros hidráulicos de funcionamiento afectan la actividad biológica de la filtración lenta.

Asimismo, se descubrió que no se logra la adecuada oxigenación del agua, ya que se obtuvo siempre concentración nula de oxígeno disuelto a la salida del filtro; por lo que produce condiciones anaerobias en el efluente, lo cual es negativo para su disposición final.

Se recomendó efectuar otros estudios con geotextiles pero aplicados a medios filtrantes de granulometría gruesa, como la pómez y la grava fina.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las consideraciones de diseño de filtros lentos de arena para agua es el espesor o altura de la capa de arena que se utilizará como medio filtrante. Una vez construido el filtro, esa altura se convierte en un parámetro crítico de operación y mantenimiento, puesto que cuando las impurezas que se remueven del agua contaminada quedan retenidas en la interfase o capa superior de la arena en contacto con el agua, se inicia un fenómeno conocido como “colmatación”.

La colmatación produce una pérdida de carga en la unidad y la calidad del agua a la salida comienza a disminuir al grado de que sale exactamente igual a como entra. Estos dos eventos indican el momento en que se hace necesaria la limpieza del medio filtrante, por medio del vaciado del filtro seguido de una remoción de una capa de aproximadamente 50 milímetros de altura en la arena.

Esto conlleva el problema de que, al transcurrir el tiempo, el espesor del medio filtrante va disminuyendo por pérdidas, lo que implica costos de adquisición de arena de granulometría específica. Asimismo, en el lavado de la arena se dan pérdidas de material y se corre el riesgo de su contaminación.

Entonces se hace necesario evaluar la opción de colocar en la parte superior de la arena una capa de geotextil que serviría para retener la contaminación sobre la arena, la cual, al colmatarse, podrá ser retirada, lavada y colocada de nuevo con mayor facilidad y sin las correspondientes pérdidas de arena por lavado, reduciendo los costes de operación y mantenimiento.

El impacto social que se espera deviene de afrontar las carencias, comunes en nuestro país, de recursos económicos y mano de obra calificada para la construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. La reducción de la cantidad de materiales de filtración, representaría una disminución considerable de los costos iniciales de construcción; de la misma manera, el uso de los geotextiles reduciría las pérdidas de material durante su lavado. De modo que el aporte del presente estudio también influiría en los costos de operación y mantenimiento. Sería, entonces, un aporte para la salud pública y el resguardo de la calidad ambiental.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente existe gran cantidad de estudios sobre el uso de los geotextiles como auxiliares en la filtración de agua destinada para el consumo humano. Por el contrario, hay muy pocos trabajos de investigación que evalúen la aplicación en la filtración de aguas residuales domésticas.

Si bien el tratamiento terciario de aguas residuales por medio de biofiltros o *wetlands* es muy eficiente en la remoción de carga orgánica y nutrientes, tiene la desventaja de producir sólidos suspendidos que no son removibles por sedimentación secundaria o flotación. De manera que se hace necesario aplicar un tratamiento terciario de filtración lenta. Asimismo, algunas sustancias húmicas y clorofilas no son completamente degradadas, por lo que la prevalencia de color en el agua hace inviable su reutilización con fines de consumo humano, a menos que se proceda a la filtración terciaria.

A este aspecto eminentemente técnico se añade que en nuestro país, cada vez con menos disponibilidad de áreas, con mayor generación de efluentes y con mayores dificultades para la gestión de recursos económicos, se hace necesario que los procesos de tratamiento sean más eficientes, tanto técnica como económicamente.

En cumplimiento de este precepto se consideró plenamente justificado que se investigue la viabilidad técnica de aplicar geotextiles en la capa superior del medio convencional de arena, reducido en 40% de espesor, como opción a los métodos convencionales de tratamiento en su etapa terciaria.

OBJETIVOS

General

Evaluar la aplicación de geotextiles en filtración lenta como parte del tratamiento terciario en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Ing. Arturo Pazos”, Colonia Aurora II, zona 13 de la Ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Evaluar el medio filtrante convencional de arena en cuanto al aspecto de la calidad del agua.
2. Evaluar el comportamiento hidráulico del medio filtrante convencional en cuanto al aspecto del tiempo efectivo de colmatación expresado como pérdida de carga.
3. Evaluar el comportamiento del geotextil instalado sobre el medio filtrante convencional, reducido en 40% de espesor, en cuanto al aspecto de la calidad del agua.
4. Evaluar el comportamiento hidráulico del geotextil instalado sobre el medio filtrante convencional, reducido en 40% de espesor, en cuanto al aspecto del tiempo efectivo de colmatación expresado como pérdida de carga.
5. Establecer si existen diferencias significativas entre el uso del medio convencional de arena y el geotextil instalado sobre el medio filtrante.

HIPÓTESIS

Hipótesis científica:

Sí es posible la aplicación de geotextiles en filtración lenta como parte del tratamiento terciario de aguas residuales domésticas, como opción al medio filtrante convencional, tanto en el aspecto de la calidad del agua como en el comportamiento de los parámetros hidráulicos de operación.

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa entre la remoción de parámetros obtenida mediante filtración lenta de aguas residuales con medio convencional de arena y la obtenida con geotextiles instalados sobre el medio convencional, reducido en 40% de su espesor, por lo que puede utilizarse indistintamente cualquiera de las opciones en el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas

$$\mu_C - \mu_G = 0$$

Hipótesis alternativa:

Sí existe diferencia significativa entre la filtración lenta de aguas residuales con medio convencional de arena y con geotextiles instalados sobre el medio convencional, reducido en 40% de su espesor, por lo que no puede aplicarse geotextiles en sustitución del medio convencional de arena en el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas.

$$\mu_C - \mu_G \neq 0$$

ANTECEDENTES

El filtro que está ubicado al final de la línea principal de tratamiento en la Planta Ing. Arturo Pazos, ubicada en la colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala, toma como afluente el agua que sale de la laguna de lirios acuáticos. Este filtro presentaba el problema de no remover adecuadamente ciertos parámetros como el color, la carga orgánica y los nutrientes, debido a que el medio filtrante en su interior carecía de la granulometría adecuada y las condiciones de flujo no aseguraban su comportamiento como filtro lento.

Por tal razón, se asignó a la promoción de estudiantes del curso de “Procesos de Tratamiento de Agua Potable” del año 2008 que efectuasen una evaluación del funcionamiento de dicho filtro. Se obtuvo como recomendación la urgente necesidad de rehabilitarlo y remodelarlo para que operase conforme a los fundamentos teóricos y sus resultados fuesen satisfactorios.

Fue entonces como nació la iniciativa del presente estudio de tesis, a la que se le adicionó la innovación de aplicar una capa de geotextil del tipo no tejido, proporcionado por la empresa Durman a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria –ERIS-, para colocarlo en la parte superior del medio convencional de antracita, al que se le redujo el espesor en un 40%. El objetivo sería hacer una evaluación preliminar del comportamiento de la arena. Posteriormente, evaluar el desempeño del medio reducido y con el geotextil aplicado para efectuar una comparación y decidir si puede usarse como sustituto del medio convencional. Con el procedimiento descrito se lograría una reducción de costos de construcción, operación y mantenimiento a escala y condiciones reales.

Se tomaron como base los estudios anteriores existentes en la Biblioteca “CIERIS” de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, relacionados con la filtración lenta y la utilización de diferentes tipos de medios filtrantes.

Delpeche, (1991) en su tesis titulada Utilización de la arena pómez como tratamiento posterior a un proceso biológico marcó los primeros estudios sobre el uso de materiales no convencionales en los procesos de filtración de aguas residuales. Llegó a la conclusión de que es viable el uso de arena pómez por sus características fisicoquímicas y granulométricas.

Moreno, J. (1992) le dio seguimiento al estudio mencionado en su tesis de Ingeniería Sanitaria titulada Preparación de arena pómez para filtración lenta. En ella propone los procedimientos preparatorios del material para su uso en un proceso unitario de tratamiento más cercano al caso de estudio de la presente tesis, ya que lo aplica directamente a la filtración lenta. Una diferencia de dicho estudio con el presente es que se enfocó en la filtración de agua destinada para consumo humano, no así con aguas residuales.

Boza, R. (1994) en la tesis Filtro lento simplificado para áreas rurales propone las condiciones morfológicas e hidráulicas adecuadas para construir filtros de baja tasa destinados a pequeños caudales, para su empleo en áreas rurales. A diferencia del presente estudio, se enfocó en la filtración de agua para consumo humano, sin haber experimentado con aguas residuales.

Aguilar, F. (1995), en su tesis titulada Evaluación experimental de un lecho filtrante de flujo horizontal con piedra volcánica, se propuso variaciones en la dirección del flujo, así como el uso de medios filtrantes no convencionales.

ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente estudio se ha limitado a evaluar la filtración terciaria del efluente proveniente del biofiltro en la planta de tratamiento “Ing. Arturo Pazos” ubicada en la Colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala.

Se estima que en un futuro la demanda de agua para consumo humano haya crecido tanto que sobrepase las capacidades de aprovechamiento de las fuentes naturales, por lo que será necesario pensar en el reciclaje y reutilización de las aguas residuales debidamente tratadas y desinfectadas.

Entre las limitaciones del presente estudio se consideró que el efluente disponible para investigación, por provenir de una urbanización, está sujeto a las variaciones de caudal y de calidad propias de una población pequeña.

Asimismo, se decidió que la reducción del espesor del medio filtrante convencional no fuese mayor del 40%, debido a que si se utilizan espesores menores de 60 centímetros se corre el riesgo de perder efectividad en la remoción de huevos de helmintos y quistes de protozoos. (Fair, 2008).

INTRODUCCIÓN

Utilizados por primera vez en Estados Unidos de América en el año 1872, los filtros lentos de arena constituyen el tipo más antiguo de filtración de agua. Actualmente, se mantiene como un método prometedor para filtrar sistemas pequeños con agua de baja turbiedad o fuentes de agua que contienen algas. Entre las limitaciones que tienen los filtros lentos probablemente las principales sean que requieren de una superficie grande, de enormes cantidades del material filtrante y de mano de obra costosa para su limpieza. Adicionalmente, si el nivel de turbiedad es muy alto, requerirán de pretratamiento por medio de pre-filtros de grava. (York, 2011).

Por el contrario, entre las múltiples ventajas que presenta la filtración lenta se encuentra la simplicidad de diseño y de operación y los requerimientos mínimos de compuestos químicos y energía; a lo que se suma la ventaja que probablemente sea la principal, que es la capacidad de remover microorganismos patógenos. Además, no necesita la supervisión cercana del operador.

No obstante, la filtración lenta se ha aplicado para el tratamiento de agua que se destinará para consumo humano, es decir, en tratamiento de potabilización.

Actualmente, las aplicaciones de filtración lenta al agua potable superan en gran medida a los estudios de su uso en aguas residuales domésticas.

El presente proyecto desarrolló la evaluación de la aplicación de geotextiles en filtración lenta como parte del tratamiento terciario de aguas residuales domésticas, con la finalidad de comparar los resultados con el desempeño del medio convencional de arena, y establecer si el geotextil en estudio puede ayudar a reducir el espesor del lecho filtrante de arena, y por tanto, los costos de construcción, operación y mantenimiento de los filtros lentos aplicados a aguas residuales con fines de reúso y posible “reciclaje”, orientado incluso al consumo humano.

Su justificación se basó en el hecho de que, si bien el tratamiento terciario de aguas residuales por medio de biofiltro o *wetlands* es muy eficiente en la remoción de carga orgánica y nutrientes, tiene las desventajas de producir sólidos suspendidos que no son removibles por sedimentación secundaria o flotación, de manera que se hace necesario aplicar un tratamiento terciario de filtración lenta. Otra desventaja es que las sustancias húmicas y las clorofilas no son completamente degradadas, por lo que la prevalencia de color en el agua hace inviable su reutilización con fines de consumo humano.

A este aspecto eminentemente técnico se sumó que, siendo nuestro país creciente, con cada vez menos disponibilidad de áreas, con mayor generación de efluentes y con mayores dificultades para la gestión de recursos económicos, se hace estrictamente necesario que los procesos de tratamiento de efluentes sean más eficientes, tanto técnica como económicamente.

En cumplimiento de este precepto, este estudio investigó la viabilidad técnica de una opción para optimizar los métodos convencionales y tradicionales de tratamiento en su etapa terciaria.

Finalmente, se llegó a la conclusión de que el geotextil no es adecuado para aplicarlo en filtración lenta cuando el medio filtrante sea antracita o arena con diámetro específico menor a 0.45 mm, debido a que la colmatación se produce en un tiempo tan corto que no permite la adecuada formación y crecimiento de la capa biológica en la superficie del medio filtrante. Por esa razón no se logra una adecuada remoción de los parámetros de contaminación del agua. Es decir, los parámetros hidráulicos de funcionamiento afectan la actividad biológica de la filtración lenta.

Asimismo, no se logra la adecuada oxigenación del agua ya que se obtuvo siempre concentración nula de oxígeno disuelto a la salida del filtro, por lo que produce condiciones anaerobias en el efluente, lo cual es negativo para su disposición final.

Se recomendó efectuar otros estudios con geotextiles pero aplicados a medios filtrantes de granulometría gruesa, como la pómez y la grava fina.

De igual forma, dado que se observó que el geotextil, por tener densidad menor a la del agua, flota hacia la superficie del filtro a pesar del flujo descendente. Esa condición dificultó la operación en los inicios de la investigación y fue necesario implementar dispositivos para fijar el geotextil en la interfase del agua con el lecho filtrante de antracita.

Estudios posteriores deberán estudiar la localización ideal del geotextil dentro del medio filtrante para evitar los inconvenientes de operación que se encontraron en el desarrollo de esta investigación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La filtración del agua.

La filtración es una operación unitaria de tratamiento de agua cuyo objetivo es separar partículas y microorganismos que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. La filtración puede efectuarse de diversas maneras: con baja carga superficial (filtración lenta); con alta carga superficial (filtración rápida); en medios porosos o granulares, con flujo ascendente o descendente, a presión o con la carga producida por la gravedad.

Su principal parámetro de identificación es la denominada “tasa” de filtración, llamada también “carga superficial” o “rata”, término que proviene de traducciones del vocablo inglés *rate*. La tasa de filtración es identificada internacionalmente con el símbolo “ q_F ”, que matemáticamente se define como el cociente entre el caudal “ Q ” y el área filtrante “ A_F ” según la ecuación (1):
(Arboleda, 2000)

$$q_F = \frac{Q}{A_F} \quad (1)$$

En donde:

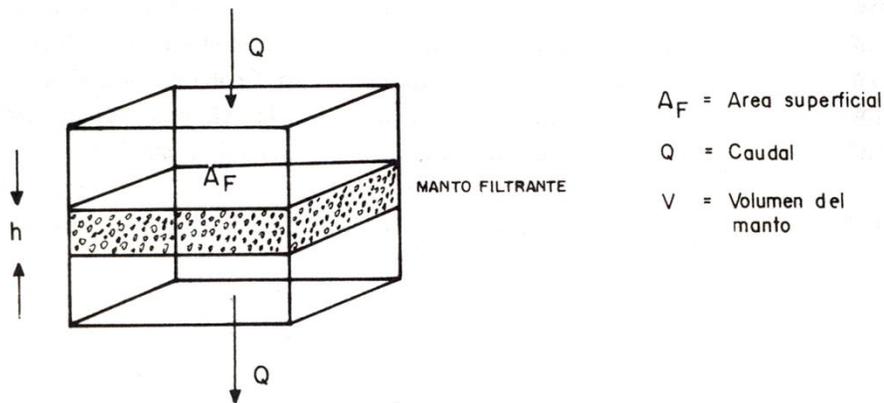
q_F = Tasa de filtración.

Q = Caudal de agua que entra al filtro.

A_F = Área del medio filtrante que es transversal al sentido del caudal

El fenómeno físico descrito por dicha ecuación se ilustra en la figura 2, donde se ejemplifican las variables, de la siguiente manera:

Figura 2. **Concepto de la tasa de filtración como función del caudal, área y altura del medio filtrante**



Fuente: Arboleda, J. *Teoría y práctica de la purificación del Agua*. (2000)

La ecuación (1) es válida para cualquier sistema coherente de unidades, aunque normalmente se mide en $m^3/m^2/día$, que son unidades conceptuales con la relación de caudal, área y tiempo. Sin embargo, al operar matemáticamente las dimensionales, se obtiene m/h , que corresponde al concepto de "velocidad" y representa físicamente la velocidad de filtración.

Existen diferentes clasificaciones de los sistemas de filtración atendiendo a su geometría, al sentido del flujo, al medio filtrante, etc. Sin embargo, en la tabla I se presenta la clasificación general. (Arboleda, 2000):

Tabla I. **Clasificación general de los filtros de agua**

Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante	Según el sentido del flujo	Según la carga sobre el lecho
Rápidos (de 120 a 360 m ³ /m ² /día)	1) arena 2) antracita (h= 60 a 75 cm) 3) mixtos Antracita (35-50 cm) Arena (20-35 cm) 4) mixtos: arena, antracita y granate	Ascendentes Descendentes Flujo Mixto	Por gravedad Por presión
Lentos (de 7 a 14 m ³ /m ² /día)	Arena (h= 60 a 100 cm)	Descendente Ascendente Horizontal	Por gravedad

Fuente: Arboleda, J. *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. (2000)

1.1.1. Historia de la filtración

Los primeros filtros tuvieron un carácter doméstico. En Francia, por ejemplo, se difundieron mucho en los siglos XVIII y XIX, fabricándolos entonces con esponjas, paños, lana y otros materiales. Cuando se hicieron los primeros filtros no domésticos, el agua filtrada no se distribuía por tuberías sino se vendía en recipientes a los consumidores. A partir de 1856, siempre en Francia, aparecieron los filtros a presión llamados *Fonvielle*, construidos en hierro fundido y cuyo medio filtrante estaba compuesto por esponjas marinas, piedra caliza y también por los llamados *Souchon*, cuyo medio filtrante era constituido por tres lechos de paño. (Romero, 2009).

Paralelamente, en la provincia de Paisley, Escocia, en el año 1804, fue donde por primera vez se pensó en instalar filtros para toda una población. Luego, en 1829, en la ciudad de Chelsea, se construyó la primera planta de filtros lentos de arena. El auge de los filtros lentos lo propició el advenimiento de la microbiología, nacida a mediados del siglo XIX, impulsada por Luis Pasteur. (Pelczar, 1982).

Ante el crecimiento poblacional y el aumento de la demanda, la necesidad condujo al diseño de los filtros “rápidos”, que aparecieron en Estados Unidos bajo patente. Se les llamaba comúnmente “filtros mecánicos” o “americanos” en contraposición a los filtros “ingleses” que eran lentos. La mayor innovación de los filtros mecánicos era el sistema de limpieza, que en lugar del vaciado y raspado de la capa de arena invertía el flujo normalmente descendente para producir un “retrolavado” de flujo ascendente, lo cual facilitaba las operaciones de limpieza y podía darse el suministro de agua prácticamente continuo.

El primer filtro rápido fue construido por Smith Hyatt en la ciudad de Somerville, en el año 1885, aplicando ya coagulantes férricos. Este sistema pasó rápidamente a Bélgica, Alemania y Francia, difundándose por toda Europa y el resto del mundo. (Arboleda, 2000).

1.1.2. Mecanismos de la filtración

La operación unitaria de la filtración implica muchos más fenómenos físicos que el solo “cernido” de las partículas. Antiguamente se creía que los filtros eran capaces de retener solamente partículas de tamaño superior al de los poros del medio.

En la actualidad, se ha descubierto que los filtros efectivamente son capaces de remover del agua aquellas partículas mucho más pequeñas que la porosidad del medio filtrante, aunque por mecanismos diferentes al de las partículas mayores.

En principio, las partículas de tamaño mayor al de la porosidad del medio quedan retenidas por el simple “cernido” de estas entre los intersticios del medio filtrante, mientras que las partículas menores, que podrían llegar a ser hasta 100 veces más pequeñas que la porosidad, quedan retenidas por diferentes mecanismos.

Estas partículas entran libremente en el material granular y deben recorrer distancias relativamente grandes antes de poderse adherir a los granos que forman el lecho. (Correal, 2002).

Entonces, puede considerarse que el proceso de filtración se lleva a cabo en dos etapas distintas pero complementarias:

- Etapa de **transporte** de las partículas dentro de la porosidad: en esta se ven involucrados fenómenos físicos e hidráulicos que son influenciados por factores de transferencia de masa.
- Etapa de **adherencia** de las partículas a los granos del medio: en esta se dan fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros fisicoquímicos.

Se listan a continuación los mecanismos que se involucran en cada etapa específica.

En la etapa del transporte de las partículas dentro de los poros se dan los siguientes:

1.1.2.1. Cernido.

Este es el mecanismo más sencillo. Físicamente se entiende como la acción de retener partículas de cierto diámetro en medios filtrantes que tengan diámetro de poros menor al de las partículas que se quieren remover. Cuando el flujo es gravitatorio, en sentido descendente, el cernido solamente actúa en las capas superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes que resistan los esfuerzos cortantes producidos por el flujo de agua.

1.1.2.2. Sedimentación.

Hace más de un siglo se había propuesto ya la idea de que las partículas menores que el tamaño de los poros sedimentan en la superficie de los granos del medio, pero esta es muy grande. Hazen, (1904) estimó que 1 m³ de arena seca de 0.35 mm de diámetro puede tener un área superficial de 8000 m².

1.1.2.3. Intercepción.

En este concepto, la remoción de partículas dentro del lecho se lleva a cabo por contacto de las partículas con la superficie de los granos o con otras partículas ya depositadas y adheridas a ellos. Las partículas viajan siguiendo líneas de flujo que se ven literalmente interceptadas por los diferentes granos del medio filtrante.

1.1.2.4. Difusión.

Debido al movimiento browniano de las partículas existe una tendencia a que estas se difundan desde las áreas de mayor concentración hacia las áreas de menor concentración.

1.1.2.5. Impacto inercial.

Cuando la velocidad del flujo es baja se asume que las partículas viajan con las líneas de flujo. Por el contrario, cuando la velocidad del flujo es alta y la partícula es relativamente grande, aparecen los efectos de inercia, que producen que esta siga una trayectoria distinta a las líneas de flujo. Por tal razón, las partículas chocan con los granos del filtro quedando adheridas a él.

1.1.2.6. Acción hidrodinámica.

Las partículas de tamaño grande fluyendo en un medio viscoso laminar pueden tener velocidades diferentes en sus extremos debido al gradiente de velocidades en el medio.

Esta diferencia de velocidades hace que la partícula gire, produciendo un diferencial de presión perpendicular al escurrimiento. Esto provoca que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja. (Arboleda, 2000).

En la etapa de la adherencia de las partículas a los granos del medio se dan las siguientes:

1.1.2.7. Fuerzas de Van der Waals

Las fuerzas de Van der Waals (fuerzas de adhesión) son las responsables de la adhesión de las partículas a los granos del medio filtrante. El concepto deriva de la suposición de que cada grano del filtro tiene un radio desde su superficie dentro del cual las fuerzas de adhesión son operativas, y ese radio delimita un cierto “volumen de adhesión”, así aquellas partículas que entran en dicho espacio serán removidas del flujo.

Debe notarse que la constante de Van der Waals incrementa con la densidad de las partículas, de modo que los flóculos o partículas más densas se adhieren con mayor fuerza al medio filtrante.

1.1.2.8. Fuerzas electrostáticas

Según la teoría electrostática de Kaufman, (1969) las fuerzas electrostáticas que actúan en las partículas pueden producirse en tres casos:

- Cuando los granos del medio son negativos y las partículas positivas. En este caso existen fuerzas de atracción por diferencia de carga, por lo que el simple “acercamiento” entre ambos produce atracción y adhesión.
- Cuando los granos del medio son negativos y las partículas neutras. En este caso la barrera de energía ha desaparecido y todo contacto entre ambos se traduce en adhesión. (Arboleda, 2000).

- Cuando los granos del medio filtrante son negativos y las partículas también negativas. En este caso existe repulsión entre ambos y se propicia que el “alejamiento” y “acercamiento” simultáneo que se produce logre que las partículas entren en el volumen de adhesión de Van der Waals y se produzca la adhesión por el mecanismo anteriormente indicado.

1.1.2.9. Puente químico.

En este mecanismo se toma el principio de la coagulación, en donde la desestabilización de los coloides es efectuada por los productos de la hidrólisis, los cuales en determinados valores de pH, se polimerizan. Luego, las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, los cuales pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del medio filtrante,

Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas.

En tal sentido, este mecanismo es más común cuando la filtración se aplica a agua que ha sido previamente tratada por la adición de coagulantes, floculantes y auxiliares de la coagulación, tales como los polielectrolitos.

1.1.3. La filtración lenta en arena.

La filtración por medio de arena, como ya se ha dicho, se empezó a aplicar para abastecer a toda una población desde el año 1804, en Paisley, Escocia. A esta filtración con tasas menores a $14 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ también se le conoce como “filtración biológica” puesto que en la interfase de filtración se da la formación de una biopelícula conocida como *schmutzdecke*, que no es más que el crecimiento de microorganismos adheridos a los granos del medio filtrante. Son estos quienes realmente llevan a cabo la digestión de la materia orgánica contaminante en el agua. (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 2011).

Un filtro lento convencional es aquel que tiene flujo descendente y consiste en una caja, ya sea rectangular o cilíndrica, a la cual se le coloca una capa de arena fina, de entre 0.90 y 1.20 m de altura, sobre una capa de grava gruesa con altura de entre 0.40 a 0.45 m.

Encima del lecho filtrante se deja una capa de agua de 1.00 a 1.50 m y por debajo de la grava gruesa se coloca un sistema de drenes apropiados. La “rata” o razón de flujo varía entre 2 y $14 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, pero más frecuente es entre 3 y $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

El lecho filtrante está compuesto de la siguiente manera:

- El lecho más fino de grava de soporte debe ser de 1/16” (1.59 mm).
- El lecho filtrante debe ser de 0.15 a 0.30 de tamaño efectivo y de 1.5 a 2.5 de coeficiente de uniformidad, el más frecuente es de 1.8 a 2.0.

Por lo menos deben existir dos unidades de filtración, de tal forma que una de ellas pueda mantenerse en operación mientras que la otra se encuentre en operaciones de limpieza y mantenimiento. Sin embargo, cuando se trata de abastecimiento de pequeñas poblaciones suele suceder que un solo filtro es capaz de tratar la totalidad del flujo sin sobrecarga.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria –CEPIS- propone un cierto número de unidades de filtración para tratar el agua, dependiendo del tamaño de la población servida. Se detallan en la tabla II: (Castro, 1981).

Tabla II. **Capacidad adicional necesaria en plantas de tratamiento por medio de filtros lentos**

Población servida (habitantes)		Número de unidades de filtración	Unidades de reserva
	<2000	2	100%
2000	10000	3	50%
10 000	60 000	4	33%
60 000	100 000	5	25%

Fuente: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-08f.pdf> *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua.* CEPIS-OPS-OMS. Consulta el 11 de marzo de 2016

Esto implica que cuando se diseña para pequeñas poblaciones, un solo filtro debe ser capaz de tratar la totalidad del flujo sin sobrecarga, para mantener una capacidad de reserva del 100%. Para poblaciones mayores la reserva puede ser menor.

El área máxima de cualquier filtro debe ser de hasta 200 m² para facilitar la operación de limpieza.

El afluente del filtro debe entrar con baja velocidad, preferiblemente menor a 0.30 m/s, a fin de evitar escarificar el lecho. En caso contrario, deberán incluirse estructuras de disipación de energía.

En el sistema de salida, el agua filtrada debe ser recolectada por los drenes y salir por una tubería de efluente. En el caso de que no haya control de flujo a la salida del filtro, la tubería del efluente debería estar situada por encima del nivel del medio filtrante, para evitar las pérdidas de carga negativas.

1.1.4. Control de operación de un filtro lento.

1.1.4.1. Medición del caudal

En los filtros convencionales casi siempre existe un sistema de medida del flujo que ingresa a las unidades, que puede consistir en tubos Venturi, por medidores de orificio, o bien, por medidores de canal abierto como los vertederos.

1.1.4.1.1. Vertederos

Los vertederos son dispositivos hidráulicos que se emplean para medir caudales de pequeños cursos de agua en canales abiertos. Existen diferentes geometrías de los vertederos. Estos se basan en la intercepción de la corriente, causando elevación de la misma, aguas arriba, así como su descarga aguas abajo. (Lux, 2010). Los principales criterios para la selección de un vertedero son los siguientes:

- La carga hidráulica mínima para vertederos triangulares es de 6 cm.
- La carga hidráulica máxima es de 50 cm.

1.1.4.2. Medición de la pérdida de carga

La pérdida de carga en el filtro lento de arena se produce al atravesar el caudal de operación, la película biológica (*schmutzdecke*) y el lecho de arena en toda su profundidad. A medida que progresa la carrera del filtro, se desarrolla la *schmutzdecke* y se incrementa la resistencia hidráulica causante de la mayor parte de la pérdida de carga. (Romero, 2009).

La remoción de la capa biológica, usualmente mediante alguna forma de raspado en los filtros pequeños, permite que la pérdida de carga recobre el nivel de lecho filtrante limpio. Generalmente, la pérdida de carga en el lecho limpio es de 10 cm aproximadamente, dependiendo este valor de la tasa hidráulica de diseño, de la temperatura y de las características del lecho de arena.

La Ley de Darcy integra estas variables y se aplica a flujo laminar a través de cualquier tipo de medio poroso, incluyendo la *schmutzdecke*. (Fair, 2008).

Dicha ley describe la pérdida de carga en cualquier tipo de medio poroso, según la ecuación (2) e ilustra en la figura 2.

$$v = -k \frac{dh_L}{dz} \quad (2)$$

Donde:

v = Velocidad superficial, también denominada “tasa hidráulica de diseño; Q/A (m/h).

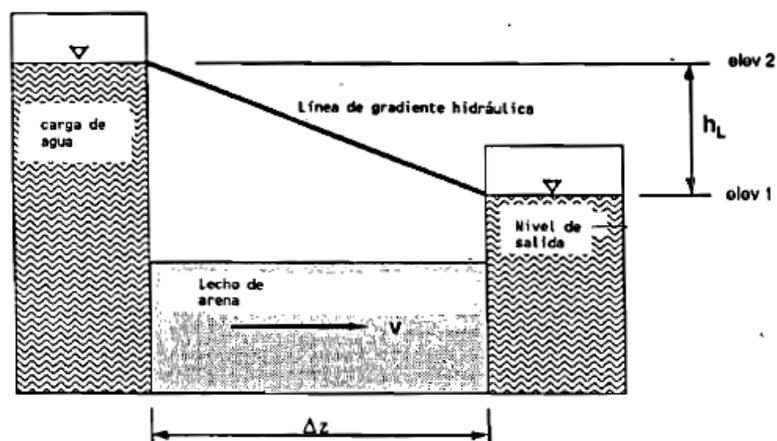
dh_L = Pérdida de carga disponible, (en m).

Z = Distancia que atraviesa el flujo dentro del lecho filtrante.

k = Coeficiente de permeabilidad del medio poroso (en m/h).

dh_L/dZ = Gradiente hidráulico, pérdida de carga por unidad de longitud recorrida por el flujo (en m/m).

Figura 3. Representación gráfica de los términos de la Ley de Darcy para la estimación de la pérdida de carga en filtros lentos



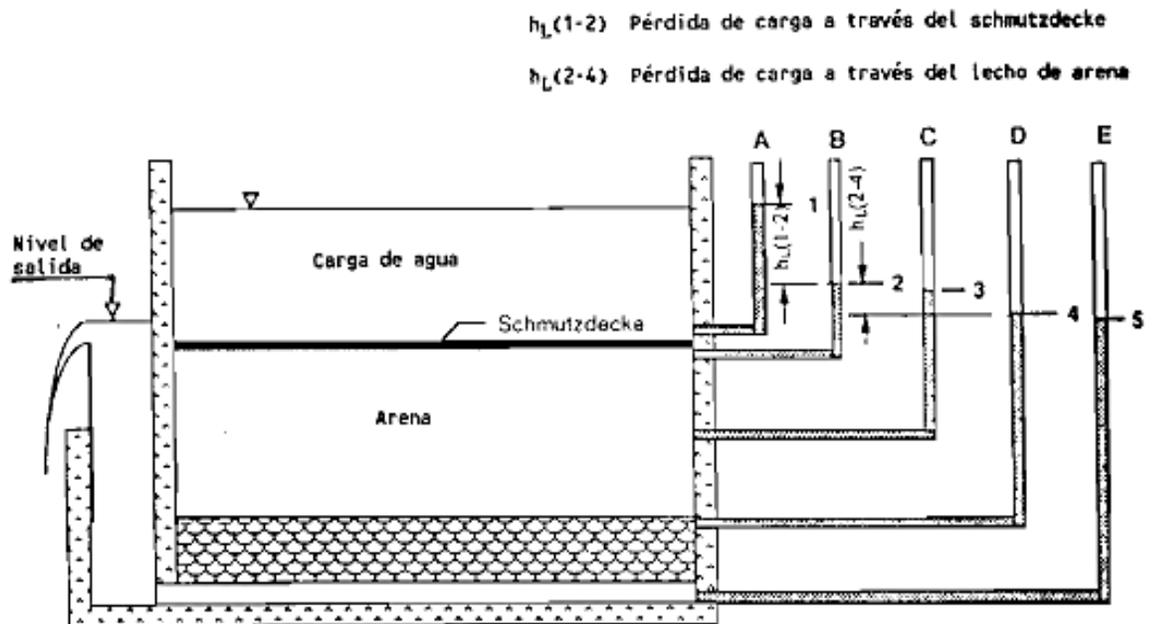
Fuente: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/007697/07697-01b.pdf> Filtración Lenta en Arena CEPIS-OPS-OMS. Consulta el 14 de marzo de 2016.

1.1.4.2.1. Uso de piezómetros en filtración lenta.

La pérdida de carga en la operación de filtros lentos se suele medir por medio de piezómetros. La mayor pérdida de carga ocurre al pasar a través del manto biológico *schmutzdecke*, tal como se indica en la figura 3, por medio de los piezómetros A y B. (Arboleda, 2000).

La pérdida de carga a través de la arena se mide con los piezómetros B, C y D. Como se puede observar, la pérdida de carga producida en el lecho filtrante es muy pequeña en comparación con la que se da en la interfase entre el agua y la *schmutzdecke*.

Figura 4. **Perfil de la pérdida de carga a través del lecho de arena con una *schmutzdecke* completamente desarrollada**



Fuente: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/007697/07697-01b.pdf> *Filtración Lenta en Arena* CEPIS-OPS-OMS. Consulta el 14 de marzo de 2016.

1.1.4.3. Análisis del medio filtrante

1.1.4.3.1. Granulometría

La granulometría del material filtrante es la graduación y medición de los granos que conforman el medio que se utilizará para la filtración de agua.

En filtración, es extremadamente importante el análisis granulométrico de la arena; puesto que de ello dependerán muchos de los parámetros de operación, tales como la tasa o *rata* de filtración, la carga superficial, y por consiguiente, la eficiencia en la remoción de materiales indeseables en el agua.

El análisis granulométrico de la arena para filtración comprende dos parámetros importantes:

- **Coefficiente de uniformidad:** se le llama así a la razón entre aberturas de tamices que permiten el paso de 60% y 10% del material granulado.
- **Diámetro efectivo:** es la abertura ideal del cedazo que deja pasar el 10% del material particulado. (Castro, 1981).

1.1.4.4. Lavado del material filtrante

La limpieza del filtro lento se hace raspando uno o dos centímetros de la superficie del lecho y extrayéndolos. La altura de la capa filtrante, por consiguiente, va disminuyendo con cada raspado. Generalmente, después de 10 a 15 raspados, el lecho se ha reducido hasta quedar solo 60 a 70 centímetros de altura, por lo que debe colocarse nueva arena en el filtro.

En filtros de gran área se usan sistemas mecánicos de limpieza que lavan “*in situ*” la arena y la vuelven a colocar de forma automática. En sistemas intermitentes, algunos operadores prefieren lavar la arena que han extraído hasta después de al menos 3 raspados, para evitar reponer gran cantidad de medio filtrante de una sola vez, lo que puede ser una operación costosa.

La frecuencia con que se debe hacer la limpieza depende de la calidad del agua cruda. Puede variar desde dos días hasta dos meses o más según el caso. Frecuentes limpiezas hacen antieconómico el funcionamiento de los filtros lentos. El raspado del lecho debe efectuarse cada vez que la pérdida de carga excede la presión estática sobre los drenes. (Romero, 2010).

Para medir la pérdida de carga es necesario dejar un piezómetro conectado al tubo efluente o a la caja del filtro. Este detalle, por desgracia, suele a veces ser olvidado por los diseñadores.

En cuanto al llenado de la unidad, hay que hacerlo por los drenes para evitar que el aire que existe en el lecho filtrante pueda quedar atrapado entre los granos y obstruya el paso del agua durante la operación del filtro.

Para esto es conveniente dejar una tubería que interconecte todas las unidades, a fin de que cualquier filtro se pueda llenar por el fondo.

1.2. Los geotextiles y su aplicación en tratamiento de agua

Uno de los avances más recientes para optimizar el funcionamiento de los filtros lentos de arena ha sido el uso de mantas sintéticas que se colocan sobre el manto filtrante. (Di Bernardo, 2014).

Mediante el uso de mantas sintéticas, conocidas como geotextiles, el desempeño de los filtros puede mejorar considerablemente en términos de aumento de la carrera de filtración y en la simplificación de las tareas de limpieza.

Los principales constituyentes son fibras de poliéster, poliamida, polietileno y polivinilo; siendo las de propileno las más indicadas por ser más resistentes a la abrasión, al calor, a los rayos ultravioletas y al ataque de compuestos como ácidos y álcalis.

1.2.1. Aplicaciones de los geotextiles en filtración de agua.

Los objetivos de la utilización de mantas no tejidas sobre los mantos de arena de los filtros son: concentrar el proceso de purificación en las mantas para evitar la necesidad de removerlos para su limpieza, aumentar la duración de las carreras y reducir el espesor del manto de arena.

Por ser un proceso de purificación con una combinación compleja de varios mecanismos físicos, químicos y biológicos, no es posible modelar su diseño a partir de las teorías de la filtración, por lo que se requiere la realización de estudios en plantas piloto. Los ensayos deberán determinar el espesor, porosidad y tipo de manta más adecuada para cada caso particular.

Los ensayos en planta piloto realizados por diversos autores demuestran que cuando se usan mantas se puede trabajar con espesores de arena de 30 cm. Con el fin de evitar la penetración de impurezas en la arena, dichos autores recomiendan no trabajar con velocidades mayores a los $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$. (Paterniani, 2006).

Se comprobó que la remoción de microorganismos, como algas, bacterias, protozoos y metazoos es extremadamente elevada en las mantas, llegando en algunos casos a alcanzar de 90 a 99 % de remoción.

Una vez que las mantas se han colmatado, se retiran y se procede a su limpieza con chorros de agua limpia a presión. Se ha comprobado que la capa biológica se forma en las mantas por lo que se recomienda colocar dos mantas superpuestas. Cuando la manta superior debe limpiarse, al reiniciar la operación del filtro se coloca la manta inferior arriba (que tiene ya formada la capa biológica) y la manta limpia por debajo.

Los geotextiles que se comercializan en nuestro país se pueden caracterizar por distintos parámetros como el diámetro de poros, permeabilidad, peso específico y espesor.

En otros países, por ejemplo, en 1993, en el Centro de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de Rosario, se realizaron ensayos en filtros experimentales para determinar la posibilidad de utilizar mantas sintéticas en los filtros lentos que trabajan con aguas previamente coaguladas, caso que es muy frecuente en nuestro país. (Orozco, 2005).

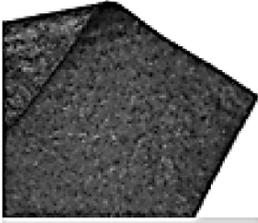
Los pequeños flóculos que escapan de los sedimentadores taponan los filtros y las carreras de filtración son de apenas unos pocos días, por lo que la colocación de una manta puede optimizar el funcionamiento.

1.2.2. Geotextiles DURMAN.

El geotextil utilizado en el presente estudio es de la marca DURMAN, y es del tipo no tejido, utilizado para estabilización de subrasantes, de 214 g/m². En la figura 2 se presenta la descripción del material utilizado según lo describe el catálogo general de la marca Durman, para Guatemala.

El geotextil en estudio tiene una porosidad equivalente a una granulometría correspondiente a la filtración lenta.

Figura 5. Descripción del geotextil utilizado, según catálogo DURMAN

2013 • Guatemala		
Non Tejidos		
	ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES	
Código	Descripción	Cant.
9008561	W 315 GEOTEXTIL NO TEJIDO 214 g/m2	41806

Fuente: Durman Esquivel, S. A. *La Lista DURMAN-Guatemala*. (2008)

De acuerdo con las especificaciones técnicas de la casa proveedora, la porosidad del geotextil en estudio tiene un tamaño de apertura aparente estimado en un rango entre 0.300 a 0.425 mm, equivalente a un número de tamiz de 40 a 50.

1.3. Los tratamientos terciarios de aguas residuales por medio de filtración

En el tratamiento de aguas residuales domésticas generalmente se enfatiza la remoción de sólidos por medio de los tratamientos primarios, y así también la remoción de carga orgánica por medio de los tratamientos secundarios, que básicamente son tratamientos biológicos.

Sin embargo, todo tratamiento biológico generará sólidos sedimentables que corresponden a las excreciones y/o metabolitos subproductos del procesamiento del sustrato que toman los microorganismos en sus procesos biológicos.

Asimismo, la eficiencia de degradación de sustancias húmicas no es siempre del 100%, lo que producirá que eventualmente el efluente de los tratamientos secundarios aún contenga sólidos sedimentables, color aparente y verdadero, así como turbiedad. (Tchobanoglous, 2000).

Por tales razones se hace necesario que se incorpore un tratamiento terciario que logre la eliminación de los subproductos mencionados. Idealmente este tratamiento debería ser por medio de filtración lenta.

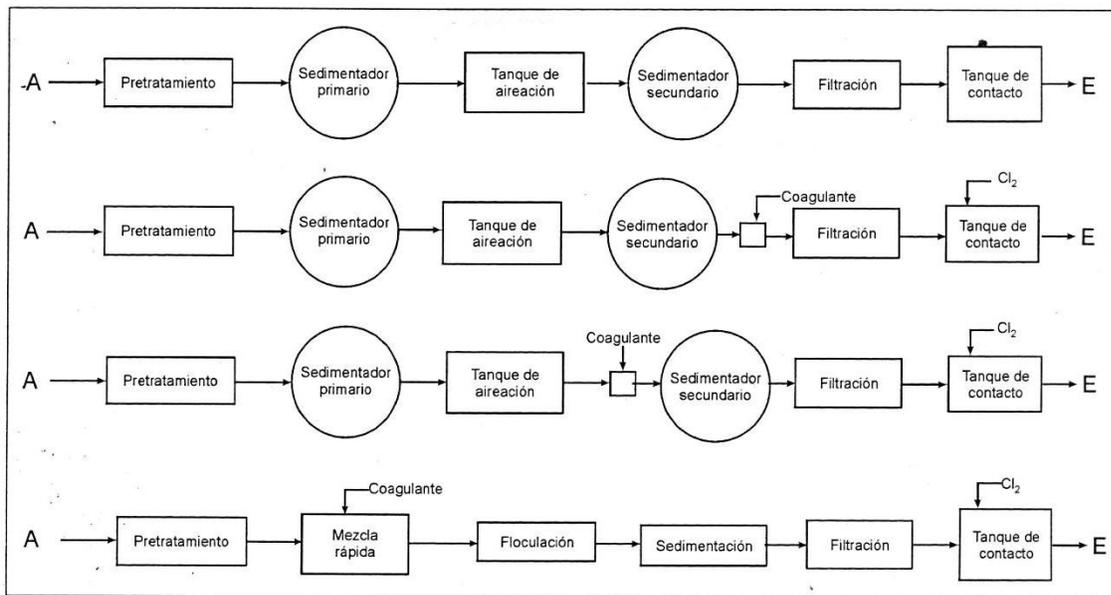
En el tratamiento de aguas residuales, la filtración es una operación utilizada para remover sólidos, materiales no sedimentables, turbiedad, fósforo, demanda bioquímica de oxígeno –DBO-, metales pesados y microorganismos.

La mayor experiencia en la utilización de filtración proviene del diseño y operación de filtros de medio granular para obtención de agua potable.

Sin embargo, aunque el diseño, configuración física de las unidades y su operación tienen los mismos principios básicos en ambas aplicaciones, debe tomarse en cuenta que hay diferencias significativas entre su uso en agua potable y en aguas residuales previamente tratadas. (Romero, 2009).

En la figura 5 se presentan diferentes trenes de tratamiento y la ubicación de la filtración. Ha de notarse que siempre la filtración aparece como tratamiento terciario:

Figura 6. Ubicación de las unidades de filtración como tratamientos terciarios en los procesos de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Romero, J. *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño*. (2009)

1.4. El Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*)

El Jacinto de agua también es conocido por sus nombres comunes, tales como lirio acuático, lechuguilla, taruya, batata, oreja de mula, etc., dependiendo de los diversos países latinoamericanos.

Es una planta acuática, perenne, vascular, flotante, de climas cálidos y/o fríos. Su habilidad de crecimiento y adaptación le permite sobrevivir y extenderse en diversos sitios y condiciones ambientales.

El componente principal de la planta es agua (más del 95% de la masa total), lo cual es un factor de gran importancia en su disposición cuando se le utiliza como sistema de tratamiento de agua. (Romero, 2010). La composición típica del Jacinto de Agua se detalla en la tabla III:

Tabla III. **Valores de composición típica del Jacinto de Agua (*Eichornia crassipes*) cultivado en aguas residuales**

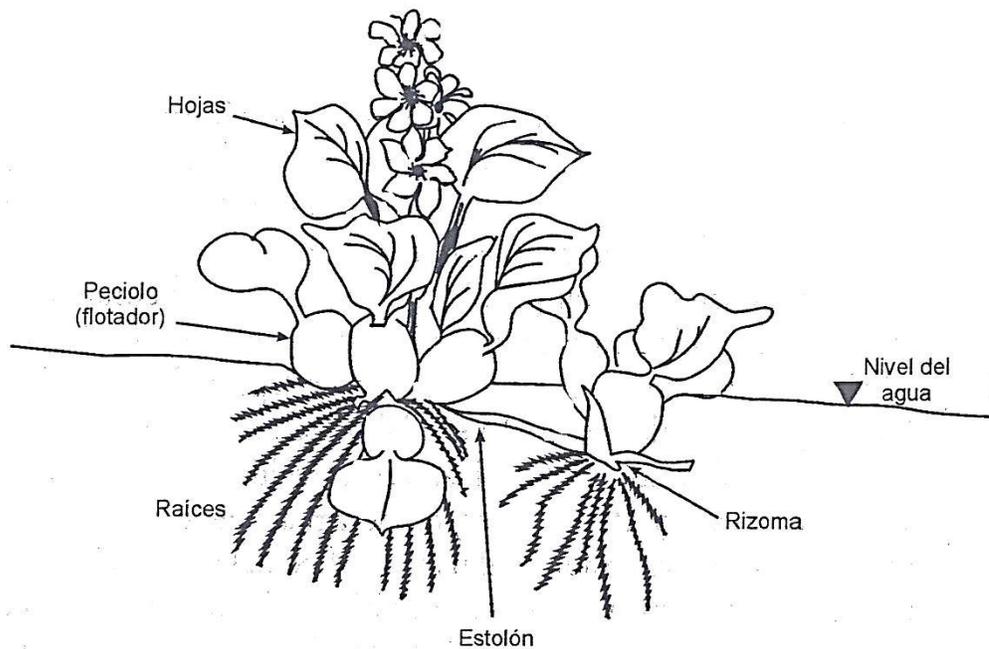
Constituyente	% de la masa seca	
	Promedio	Intervalo
Proteína cruda	18.1	9.7 – 23.4
Grasa	1.9	1.6 – 2.2
Fibra	18.6	17.1 – 19.5
Cenizas	16.6	11.1 – 20.4
Carbohidratos	44.8	36.9 – 51.6
NTK	2.9	1.6 – 3.7
Fósforo	0.6	0.3 – 0.9

Fuente: Romero, J. *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño*. (2010)

Puede duplicar su tamaño en 10 días, y durante la estación normal de ocho meses de crecimiento, una sola planta es capaz de producir 70,000 plantas hijas. Gracias a su extenso sistema de raíces tiene excelente capacidad de filtración y de absorción de impurezas y contaminantes, tales como níquel, cadmio, plomo, mercurio, cromo, plata, cobre, fenoles y otros. Su morfología se ilustra en la Figura 7.

La flor del Jacinto puede producir semillas, pero el método principal de reproducción lo realiza mediante los rizomas subacuáticos.

Figura 7. **Morfología del Jacinto de Agua (*Eichornia crassipes*)**



Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño. (2010)

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Determinación estadística del número óptimo de muestras.

Se hizo necesario determinar inicialmente la cantidad óptima de muestras que deberían captarse y analizarse para contar con fundamento estadístico.

La cantidad de muestras a procesar se obtuvo de la aplicación de un análisis por medio de la prueba *t-student*.

El número mínimo de corridas se determina mediante la ecuación:

$$N \geq \left(\frac{ts}{U} \right)^2 \quad (3)$$

En donde:

N = Número de muestras a determinar u observar

t = Estadístico de *Student* para un nivel de confianza específico

s = Desviación estándar

U = Nivel aceptable de incertidumbre

Para asignar valores a los datos, se asumen los siguientes criterios:

- Para el valor de “U”, que corresponde al nivel aceptable de incertidumbre, se tomó en cuenta el límite de detección de la demanda bioquímica de oxígeno, puesto que este sería el parámetro principal indicador de la operación de la reducción de la materia orgánica proveniente del tratamiento secundario. Dicho límite tiene un valor de 10 mg/L, por lo tanto, se esperaría que ningún dato tenga incertidumbre mayor de 10, por lo que se asigna que $U = “10”$.
- Para estimar el valor de “s” que corresponde a la desviación estándar, se asume que la distribución de los datos observados se ajustará a una distribución perfectamente normal. De esta manera, se afirma que más del 68.27% de los datos estarán comprendidos entre el promedio \bar{X} y una desviación estándar, es decir,

$$\bar{X} \pm s \quad (4)$$

Entonces, se deduce el valor de s como “10”.

Para estimar el valor de “t” se busca en la tabla IV de *t-Student* para 95% de confianza y 10 grados de libertad, obteniéndose el valor de $t = 2.228$.

Sustituyendo los datos en la ecuación (2)

$$N \geq \left(\frac{(2.228)(10)}{(10)} \right)^2$$

Con lo que se obtiene un resultado de $N = 4.9639 \approx 5$ muestras.

Tabla IV. **Valores de t de Student para un intervalo del 95% de confianza**

Grados de libertad	t	Grados de libertad	t
1	12.706	16	2.120
2	4.303	17	2.110
3	3.182	18	2.101
4	2.776	19	2.093
5	2.571	20	2.086
6	2.447	21	2.080
7	2.365	22	2.074
8	2.306	23	2.069
9	2.262	24	2.064
10	2.228	25	2.060
11	2.201	30	2.048
12	2.179	40	2.021
13	2.160	60	2.000
14	2.145	120	1.980
15	2.131	∞	1.960

Fuente: Daniel, W. *Bioestadística, Base para el análisis de las ciencias de la Salud.* (2010)

2.2. Preparación y acondicionamiento del filtro

Al inicio de la presente investigación el filtro lento en estudio se encontraba en condiciones inadecuadas de operación. Por esta razón fue necesario llevar a cabo una etapa inicial de preparación y acondicionamiento para lograr una operación adecuada que permitiera efectuar las observaciones necesarias para la recopilación de datos, tanto de calidad de agua como de condiciones hidráulicas de operación.

En la figura 8 se observa el aspecto que presentaba el filtro al momento del inicio de la investigación.

Figura 8. **Vista del estado físico del filtro lento al inicio de la investigación**



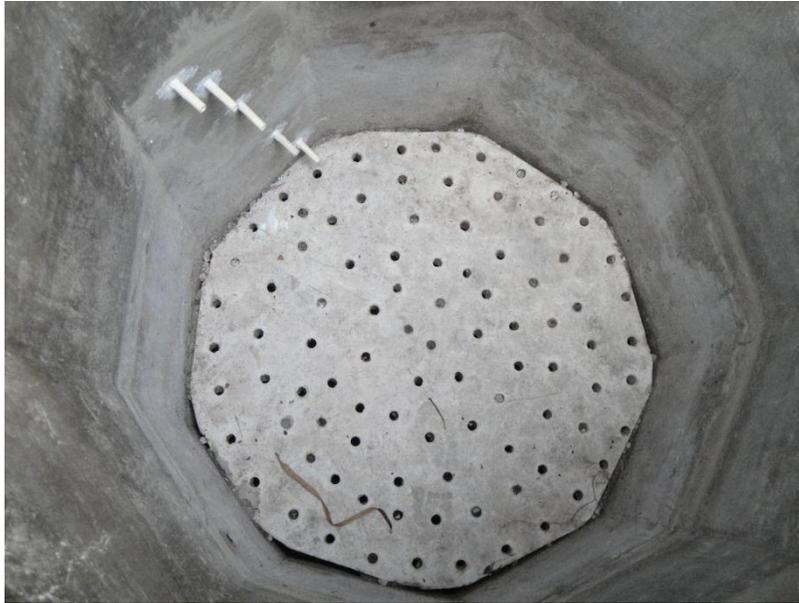
Fuente: elaboración propia.

Al observar el interior del filtro se encontró material filtrante consistente mayoritariamente en arena, de granulometría no definida y sin un falso fondo que detuviese la arena, por lo que esta se salía juntamente con el flujo de agua por la parte inferior.

Entonces se procedió a limpiarlo en su exterior y se construyó un falso fondo para colocarlo en el interior. Dicho fondo fue construido con concreto y se le dejó suficientes agujeros de 1" de diámetro para drenar el agua filtrada hacia la salida de la estructura del filtro.

En la figura 9 se observa el falso fondo ya instalado en el interior del filtro lento, previo a colocar el material filtrante.

Figura 9. **Falso fondo instalado en el interior del filtro lento**

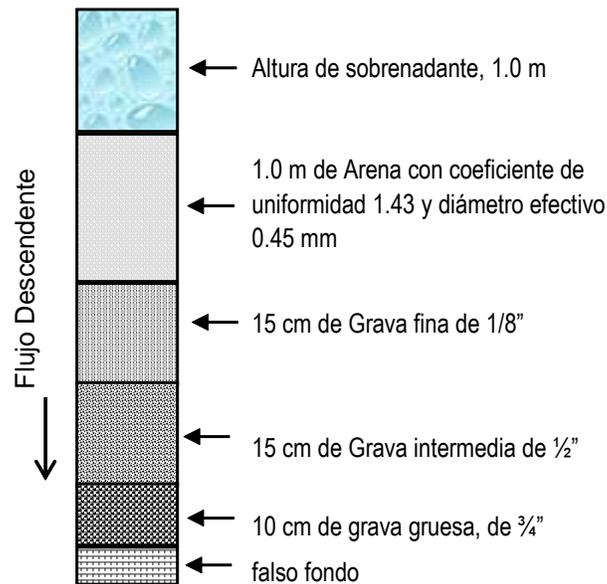


Fuente: elaboración propia.

Ya instalado el falso fondo, se procedió a colocar la capa de medio filtrante, consistente en una capa inicial de 10 cm de grava gruesa de 1" en la parte más baja; seguida de una capa de 15 cm de grava media de 1/2"; luego otra capa de 15 cm de grava fina de 1/8"; y finalmente, la capa de 1.00 m de arena. La altura de sobrenadante se fijó en 1.00 m.

La figura 10 muestra la morfología del medio filtrante:

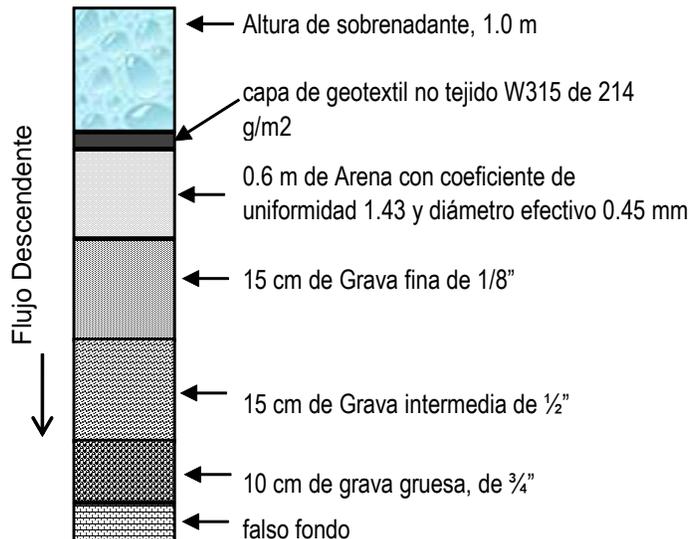
Figura 10. **Esquema del medio filtrante convencional en el interior del filtro lento**



Fuente: elaboración propia, empleando la disposición real de los materiales en el interior del filtro lento.

En la segunda etapa del estudio se debía modificar la conformación del medio filtrante, para lo cual se redujo el espesor de la capa de arena en un 40%. De esta manera, de 1.0 m de altura inicial, se redujo hasta dejarlo con altura de 0.60 m y sobre ella se colocó una capa de geotextil. La figura 11 muestra la forma como quedó conformado el lecho filtrante después de su modificación.

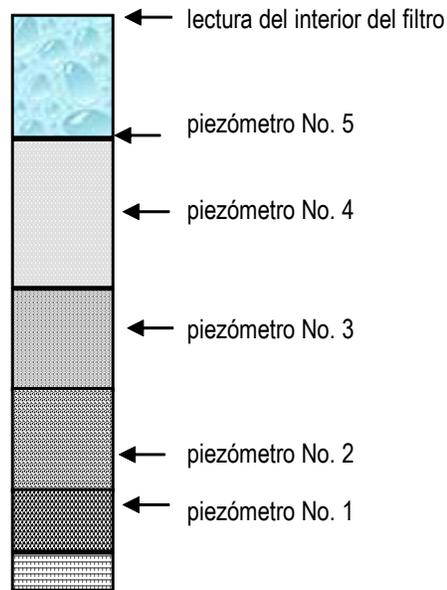
Figura 11. **Esquema del medio filtrante modificado, reduciendo 40% del espesor de arena y aplicando el geotextil**



Fuente: elaboración propia, empleando la disposición real de los materiales en el interior del filtro lento.

Seguidamente, para poder evaluar la pérdida de carga en los diferentes tramos se colocó tuberías de entrada a diferentes alturas, de manera que cada entrada coincidiera con las capas que conforman el medio filtrante, conforme a las figuras 10 y 11.

Figura 12. Esquema de la disposición de los piezómetros en el interior del filtro para medición de la pérdida de carga en cada tramo del lecho filtrante



Fuente: elaboración propia, empleando la disposición de los sifones conforme los materiales filtrantes en el interior del filtro lento.

En la figura 13 puede observarse en la parte interna del filtro, antes de colocar el medio filtrante, la manera como quedaron instaladas las tuberías para los piezómetros.

Figura 13. **Vista de la disposición real de los piezómetros en el interior del filtro para medición de la pérdida de carga**



Fuente: elaboración propia.

Las tuberías descritas en la figura anterior se conectaron en la parte exterior con los piezómetros, a los cuales se les colocó una conformación de sifón para poder apreciar el movimiento del nivel de agua a medida que la pérdida de carga fuera aumentando. Los sifones se conectaron con mangueras de vinil transparente para poder visualizar el nivel de agua.

En la figura 14 se aprecia la forma como quedaron construidos los sifones en el exterior del filtro para conectarlos a las mangueras de vinil y ensamblar así posteriormente el piezómetro múltiple.

Figura 14. **Disposición de sifones en el exterior del filtro para la colocación de los piezómetros**



Fuente: elaboración propia.

Para cuantificar la diferencia de alturas se le instaló a cada manguera una cinta métrica alineada con la que se encuentra en el interior del filtro, para poder estimar la diferencia de alturas entre los piezómetros en relación con la del sobrenadante. La figura 15 muestra la forma como quedó construido el piezómetro múltiple y sus niveles de referencia mediante cintas métricas.

Figura 15. **Piezómetro múltiple para evaluar la pérdida de carga**



Fuente: elaboración propia.

Para tener referencia de la diferencia de alturas de cada manguera conforme a la altura del sobrenadante en el interior del filtro, se colocó también una escala de medición en la parte interna. La figura 16 muestra la forma como se instaló el dispositivo para la medición de la altura del sobrenadante en el interior del filtro.

Figura 16. **Dispositivo para la medición de la altura de sobrenadante en el interior del filtro**



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para poder regular el flujo a la entrada del filtro fue necesario fabricar un vertedero triangular en disposición de 45° que sirviera para controlar la válvula que permite el ingreso de agua. La figura 17 muestra el vertedero fabricado y en el instante de la fotografía puede apreciarse una altura del agua en el nivel “4”, que corresponde a un flujo de $14 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, dentro del rango de la filtración lenta.

Figura 17. **Vertedero utilizado para regular el flujo a la entrada del filtro**



Fuente: elaboración propia.

La figura 18 muestra la forma como quedó la instalación del filtro lento y todos sus accesorios, al final de la investigación.

Figura 18. **Vista del estado físico del filtro al final de la investigación**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Procesamiento estadístico de la información

El primer paso para el análisis estadístico es calcular los promedios de cada muestreo, tanto en la entrada del filtro como en la salida, y su respectiva desviación estándar.

El segundo paso es determinar la existencia de diferencias significativas entre los resultados obtenidos con el medio filtrante convencional y los obtenidos con el medio reducido en 40% de su espesor, más la instalación del geotextil en la parte superior de la capa de arena.

Para ello, se aplica la prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias de dos poblaciones, obtenidas del muestreo a partir de poblaciones que siguen una distribución normal con varianza conocida. (Daniel, 2010).

Cuando cada una de las dos muestras aleatorias simples e independientes son extraídas de una población que sigue una distribución normal con varianza conocida, la estadística de prueba para la hipótesis nula de las medias iguales de dos poblaciones es la siguiente:

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (5)$$

Donde:

\bar{x}_1, \bar{x}_2 = Promedios de cada serie.

μ_1, μ_2 = Diferencia de medias esperada. Al término se asigna valor "0", porque la hipótesis nula parte de que $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$.

σ_1, σ_2 = Desviaciones estándar de cada serie.

n_1, n_2 = Número de observaciones de cada serie. En este caso, ambas series tuvieron 5 observaciones cada una, de modo que $n_1 = n_2 = 5$.

3. RESULTADOS

Como se mencionó en la metodología experimental, se investigó inicialmente el comportamiento del medio filtrante convencional para tomarlo como control y referencia.

Luego se redujo el espesor de la capa de arena en un 40%, es decir, dejando solamente una altura de 60 cm, y sobre ella se colocó el geotextil para así proceder a la segunda parte del experimento, que fue evaluar el comportamiento del medio filtrante modificado.

3.1. Resultados de la evaluación desde el punto de vista de los parámetros de calidad del agua.

La primera fase de evaluación del medio filtrante con y sin modificación se basó en observar el comportamiento de la calidad del agua. En la tabla V se resumen los parámetros medidos y sus resultados.

Dicha fase tuvo una duración de cuatro meses, específicamente del 9 de agosto al 4 de diciembre del año 2012.

Tabla V. **Resumen de resultados del análisis fisicoquímico, utilizando el medio filtrante convencional de arena**

Muestreo No.	Fecha de muestreo	Lugar de muestreo	DQO	DBO ₅	Fósforo Total	Nitrógeno Total	Color	Oxígeno Disuelto
			(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(U. Pt-Co)	(mg/L)
1	Jueves 09/agosto/2012	ENTRADA al filtro	91	11	5.2	23.6	102	3.5
		SALIDA del filtro	45	4	1.7	18.0	45	0.0
2	Jueves 23/agosto/2012	ENTRADA al filtro	103	13	5.0	24.5	98	2.9
		SALIDA del filtro	61	6	4.5	20.6	57	0.0
3	Miércoles 10/octubre/2012	ENTRADA al filtro	143	38	3.4	26.0	220	1.8
		SALIDA del filtro	14	1	2.8	17.6	16	0.0
4	Miércoles 24/octubre/2012	ENTRADA al filtro	137	19	3.4	22.0	88	1.5
		SALIDA del filtro	79	1	3.0	17.8	51	0.0
5	Martes 04/diciembre/2012	ENTRADA al filtro	171	54	6.8	30.9	197	0.0
		SALIDA del filtro	128	35	6.5	28.8	164	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se removió el 40% de la altura de la arena en el medio filtrante para dejar una altura final de 0.60 m, y sobre ella se colocó el geotextil para iniciar la segunda fase del experimento.

Dicha fase tuvo una duración de tres meses, específicamente del 22 de mayo al 27 de agosto del año 2013.

Esta segunda fase se realizó prácticamente cinco meses después de la primera. Esto se debió a que para la preparación del filtro con el geotextil fue necesario hacer reparaciones en las unidades anteriores al filtro, es decir, la laguna de lirios y el Tanque Inhoff, ya que este último tenía deteriorado el canal colector de salida, por lo que se dio la proliferación de microalgas flotantes, y por consiguiente, la colmatación casi instantánea del filtro lento.

En la tabla VI se presenta el resumen de los resultados del análisis fisicoquímico:

Tabla VI. Resumen de resultados del análisis fisicoquímico, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante

Muestreo No.	Fecha de muestreo	Lugar de muestreo	DQO	DBO ₅	Fósforo Total	Nitrógeno Total	Color	Oxígeno Disuelto
			(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(U. Pt-Co)	(mg/L)
1	Miércoles 22/mayo/2013	ENTRADA al filtro	140	39	5.5	28.7	117	2.0
		SALIDA del filtro	95	30	4.6	23.1	85	0.0
2	Miércoles 05/junio/2013	ENTRADA al filtro	137	27	5.2	28.5	95	1.6
		SALIDA del filtro	115	18	4.8	26.2	62	0.0
3	Miércoles 24/julio/2013	ENTRADA al filtro	126	24	4.5	20.4	57	2.9
		SALIDA del filtro	102	17	4.1	19.3	56	0.0
4	Miércoles 07/agosto/2013	ENTRADA al filtro	49	25	4.1	20.7	55	3.8
		SALIDA del filtro	31	20	3.8	19.8	49	0.0
5	Jueves 22/agosto/2013	ENTRADA al filtro	68	15	4.0	18.3	57	3.3
		SALIDA del filtro	42	9	4.0	16.6	51	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos y presentados en la tabla VI se procedió a determinar los porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅). La Tabla VII presenta los resultados de manera comparativa:

Tabla VII. **Porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como DQO y DBO₅ utilizando el medio filtrante convencional**

Muestreo No.	Fecha de análisis	Lugar de Muestreo	DQO (mg/L)	% de remoción	DBO ₅ (mg/L)	% de remoción
1	Jueves 09/agosto/2012	ENTRADA al filtro	91	51	11	64
		SALIDA del filtro	45		4	
2	Jueves 23/agosto/2012	ENTRADA al filtro	103	41	13	54
		SALIDA del filtro	61		6	
3	Miércoles 10/octubre/2012	ENTRADA al filtro	143	90	38	97
		SALIDA del filtro	14		1	
4	Miércoles 24/octubre/2012	ENTRADA al filtro	137	42	19	95
		SALIDA del filtro	79		1	
5	Martes 04/diciembre/2012	ENTRADA al filtro	171	25	54	35
		SALIDA del filtro	128		35	
Promedio de los porcentajes de remoción				50		69
Desviación estándar				24.345		26.768

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, con los datos obtenidos y presentados en la tabla VII se procedió a determinar los porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅). La Tabla VIII presenta los resultados de manera comparativa:

Tabla VIII. **Porcentajes de remoción de carga orgánica expresada como DQO y DBO₅, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante**

Muestreo No.	Fecha de análisis	Lugar de Muestreo	DQO (mg/L)	% de remoción	DBO ₅ (mg/L)	% de remoción
1	Miércoles 22/mayo/2013	ENTRADA al filtro	140	32	39	23
		SALIDA del filtro	95		30	
2	Miércoles 05/junio/2013	ENTRADA al filtro	137	16	27	33
		SALIDA del filtro	115		18	
3	Miércoles 24/julio/2013	ENTRADA al filtro	126	19	24	29
		SALIDA del filtro	102		17	
4	Miércoles 07/agosto/2013	ENTRADA al filtro	49	37	25	20
		SALIDA del filtro	31		20	
5	Jueves 22/agosto/2013	ENTRADA al filtro	68	38	15	40
		SALIDA del filtro	42		9	
Promedio de los porcentajes de remoción				28		29
Desviación estándar				10.262		7.969

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la remoción de carga orgánica expresada como DQO y DBO₅, pudo determinarse que el medio filtrante convencional logra remover en cantidades mayores al 50%, mientras que el medio filtrante con el geotextil no logra remover más que en cantidades menores al 30%, por lo que el geotextil no resulta ser tan eficiente en comparación con el sujeto control.

De manera análoga, también se realizaron cuadros comparativos entre los dos medios filtrantes en cuanto a su eficiencia para remover nutrientes, expresados como fósforo total y nitrógeno total.

Las tablas IX y X presentan en forma comparativa los porcentajes de remoción de nutrientes, donde también puede notarse que el medio filtrante convencional resulta tener mayores porcentajes de remoción:

Tabla IX. Porcentajes de remoción de carga de nutrientes expresada como FÓSFORO TOTAL y NITRÓGENO TOTAL utilizando el medio filtrante convencional

Muestreo No.	Fecha de análisis	Lugar de muestreo	Fósforo total (mg/L)	% de remoción	Nitrógeno total (mg/L)	% de remoción
1	Jueves 09/agosto/2012	ENTRADA al filtro	5.2	66.7	23.6	23.7
		SALIDA del filtro	1.7		18.0	
2	Jueves 23/agosto/2012	ENTRADA al filtro	5.0	9.3	24.5	16.0
		SALIDA del filtro	4.5		20.6	
3	Miércoles 10/octubre/2012	ENTRADA al filtro	3.4	17.1	26.0	32.3
		SALIDA del filtro	2.8		17.6	
4	Miércoles 24/octubre/2012	ENTRADA al filtro	3.4	11.9	22.0	19.2
		SALIDA del filtro	3.0		17.8	
5	Martes 04/diciembre/2012	ENTRADA al filtro	6.8	4.6	30.9	6.8
		SALIDA del filtro	6.5		28.8	
Promedio de los porcentajes de remoción				21.9		19.6
Desviación estándar				25.4		9.4

Fuente: Elaboración propia.

Como se hace notorio en la tabla anterior, no obstante que existe un cierto porcentaje de remoción de nitrógeno y de fósforo, los valores de concentración a la salida de la unidad de filtración ponen en duda el cumplimiento constante con los límites máximos permisibles establecidos por la legislación guatemalteca vigente.

De igual forma, en la Tabla X puede notarse que aun utilizando el geotextil sobre el medio filtrante, los valores de concentración de nutrientes a la salida continúan siendo críticos.

Tabla X. Porcentajes de remoción de carga de nutrientes expresada como FÓSFORO TOTAL y NITRÓGENO TOTAL, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante.

Muestreo No.	Fecha de análisis	Lugar de muestreo	Fósforo total (mg/L)	% de remoción	Nitrógeno total (mg/L)	% de remoción
1	Miércoles 22/mayo/2013	ENTRADA al filtro	5.5	14.9	28.7	19.7
		SALIDA del filtro	4.6		23.1	
2	Miércoles 05/junio/2013	ENTRADA al filtro	5.2	7.5	28.5	8.3
		SALIDA del filtro	4.8		26.2	
3	Miércoles 24/julio/2013	ENTRADA al filtro	4.5	9.1	20.4	5.5
		SALIDA del filtro	4.1		19.3	
4	Miércoles 07/agosto/2013	ENTRADA al filtro	4.1	5.9	20.7	4.4
		SALIDA del filtro	3.8		19.8	
5	Jueves 22/agosto/2013	ENTRADA al filtro	4.0	0.7	18.3	9.3
		SALIDA del filtro	4.0		16.6	
Promedio de los porcentajes de remoción				7.6		9.4
Desviación estándar				5.1		6.1

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se elaboraron cuadros comparativos también para los porcentajes de remoción de color, que fue otro parámetro de control de la eficiencia de los filtros.

Con este parámetro, al igual que sucedió con los nutrientes, se observa que el valor de color a la salida del filtro no presenta una tendencia constante de reducirse por debajo del límite máximo permisible establecido en la legislación guatemalteca vigente para aguas residuales.

Las tablas XI y XII presentan los resultados:

Tabla XI. **Porcentajes de remoción de COLOR utilizando el medio filtrante convencional**

No. de muestreo	Fecha de análisis	Lugar de muestreo	COLOR	% de remoción
			(unidades Pt-Co)	
1	Jueves 09/agosto/2012	ENTRADA al filtro	102	56
		SALIDA del filtro	45	
2	Jueves 23/agosto/2012	ENTRADA al filtro	98	42
		SALIDA del filtro	57	
3	Miércoles 10/octubre/2012	ENTRADA al filtro	220	93
		SALIDA del filtro	16	
4	Miércoles 24/octubre/2012	ENTRADA al filtro	88	42
		SALIDA del filtro	51	
5	Martes 04/diciembre/2012	ENTRADA al filtro	197	17
		SALIDA del filtro	164	
Promedio de los porcentajes de remoción:				50
Desviación estándar:				28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XII. **Porcentajes de remoción de COLOR, una vez reducido el medio de arena en un 40% y aplicado el geotextil en la superficie del medio filtrante**

No. de muestreo	Fecha de análisis	Lugar de muestreo	COLOR	% de remoción
			(unidades Pt-Co)	
1	Miércoles 22/mayo/2013	ENTRADA al filtro	117	27
		SALIDA del filtro	85	
2	Miércoles 05/junio/2013	ENTRADA al filtro	95	35
		SALIDA del filtro	62	
3	Miércoles 24/julio/2013	ENTRADA al filtro	57	2
		SALIDA del filtro	56	
4	Miércoles 07/agosto/2013	ENTRADA al filtro	55	11
		SALIDA del filtro	49	
5	Jueves 22/agosto/2013	ENTRADA al filtro	57	11
		SALIDA del filtro	51	
Promedio de los porcentajes de remoción:				17
Desviación estándar:				13

Fuente: Elaboración propia.

La tabla XIII presenta en resumen los porcentajes de remoción obtenidos para cada parámetro, con el objetivo de poder visualizar la comparación entre el medio filtrante convencional y el medio modificado por la aplicación del geotextil.

Tabla XIII. Resumen de porcentajes de remoción de cada parámetro estudiado, obtenidos con el medio filtrante convencional y con el medio modificado con el geotextil

Parámetro	% de remoción obtenido con el medio filtrante convencional		% de remoción obtenido con el medio filtrante reducido en 40% y modificado con el geotextil.	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Demanda química de oxígeno (DQO)	50	24.345	28	10.262
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	69	26.768	29	7.969
Fósforo total	22	25.400	8	5.100
Nitrógeno total	20	9.400	9	6.100
Color	50	28.000	17	13.000

Fuente: Elaboración propia

3.2. Prueba de la hipótesis para la diferencia entre las medias de dos poblaciones

Para la prueba de la hipótesis se seleccionó el modelo de muestreo a partir de poblaciones que siguen una distribución normal con varianza conocida.

- Regla de decisión:

Si se asigna que $\alpha = 0.05$, los valores críticos de “Z” se encuentran en el intervalo ± 1.96 . Toca entonces calcular los valores experimentales de “Z” y comparar si se encuentran dentro o fuera del intervalo de “no rechazo”.

El criterio para decidir se toma de la siguiente manera:

- Si el valor experimental calculado de “Z” se encuentra dentro del intervalo de “no rechazo”, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.
- Si el valor experimental calculado de “Z” se encuentra fuera del intervalo de “no rechazo”, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

El cálculo se realizó mediante la ecuación (5):

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1}{n_1} + \frac{\sigma_2}{n_2}}} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores obtenidos para cada parámetro se obtuvo el valor del parámetro “Z”, a fin de establecer si se encuentra dentro o fuera de la región de rechazo.

Como muestra de cálculo, a continuación se sustituyen los valores para el parámetro “demanda bioquímica de oxígeno”, obtenidos de la tabla XIII:

$$Z = \frac{(49.8 - 28.4) - (0)}{\sqrt{\frac{24.345}{5} + \frac{10.262}{5}}} = 8.134$$

Se determina entonces que el valor de “Z” es de 8.134.

- Regla de decisión:

Si se asigna que $\alpha = 0.05$, los valores críticos de “Z” se encuentran en el intervalo ± 1.96 . Dado que el valor calculado de “Z” (8.134) se encuentra fuera de la región de “no rechazo”, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, por lo que puede concluirse que **SÍ** existe diferencia significativa entre la filtración lenta de aguas residuales con medio convencional de arena y con geotextiles instalados sobre el medio convencional reducido en 40% de su espesor.

Lo anterior respalda la conclusión de que **no puede aplicarse geotextiles en sustitución del medio convencional de arena en el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas.**

De igual manera, para cada uno de los parámetros se realizaron los cálculos respectivos, lo que se presenta en la Tabla XIV juntamente con la conclusión del criterio de aceptación o rechazo de las hipótesis respectivas:

Tabla XIV. **Resumen de cálculo del factor “Z” y condición de la hipótesis nula**

Parámetro	Valor del factor “Z”			Condición de la hipótesis nula (Rechazo / No rechazo)
	Calculado	Crítico (-)	Crítico (+)	
Demanda bioquímica de oxígeno	15.176	-1.96	1.96	Rechazo
Demanda química de oxígeno	8.134	-1.96	1.96	Rechazo
Fósforo total	5.782	-1.96	1.96	Rechazo
Nitrógeno total	5.772	-1.96	1.96	Rechazo
Color	11.416	-1.96	1.96	Rechazo

Fuente: Elaboración propia

Dado que el valor calculado de “Z” para cada uno de los parámetros se encuentra fuera de la región de “no rechazo”, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, por lo que puede concluirse que **SÍ** existe diferencia significativa entre la filtración lenta de aguas residuales con medio convencional de arena y con geotextiles instalados sobre el medio convencional reducido en 40% de su espesor.

3.3. Resultados de la evaluación desde el punto de vista de los parámetros hidráulicos de operación expresados como pérdida de carga

La segunda fase de evaluación del medio filtrante se basó en observar el comportamiento de los parámetros hidráulicos de operación, expresados como pérdida de carga. Su medición se hizo directamente de la altura del agua en el interior de las mangueras que fungieron como piezómetros.

En cuanto al medio filtrante convencional, se observó variación en la altura de agua en las mangueras de la manera que se detalla en la tabla XV:

Tabla XV. **Comportamiento de la altura del agua en cada manguera del piezómetro múltiple con el uso del medio filtrante convencional.**

Fecha	Lectura del nivel del agua (en cm)						Pérdida de carga (h_f)
	Interior	Manguera 1	Manguera 2	Manguera 3	Manguera 4	Manguera 5	
23/ago/2012	18.5	24	24	23	22	22	5.5
29/ago/2012	18.5	24	24	23	22	22	5.5
6/sept/2012	18.5	26	25	24	24	24	7.5
12/sept/2012	18.5	30	30	30	28	28	11.5
19/sept/2012	18.5	80	80	72	70	70	61.5
2/oct/2012	18.5	145	145	144	144	143	126.5

Fuente: Elaboración propia

Como puede notarse en la anterior tabla, la colmatación se dio después de transcurridas seis semanas de operación, por lo que puede considerarse que el tiempo que el medio filtrante permanece sin necesitar limpieza es razonable con respecto a la operación normal en tratamiento de aguas residuales.

Finalmente, en la tabla XVI se presentan las lecturas del nivel del agua alcanzado durante la operación del filtro con el medio modificado por medio de la reducción del 40% de su espesor y aplicándole la capa de geotextil. Puede notarse que la variación en la pérdida de carga fue extremadamente rápida puesto que en cuestión de 24 horas se alcanzó el agotamiento de la carga.

Tabla XVI. Comportamiento de la altura del agua en cada manguera del piezómetro múltiple con el uso del medio filtrante con geotextil

Fecha	Lectura del nivel del agua (en cm)						Pérdida de carga (hr)
	Interior	Manguera 1	Manguera 2	Manguera 3	Manguera 4	Manguera 5	
22/mayo/2013	18.5	24	24	23	22	22	5.5
23/mayo/2013	18.5	145	145	144	144	143	126.5
5/junio/2013	18.5	23	24	22	22	22	4.5
6/junio/2013	18.5	145	145	144	144	144	126.5
24/Julio/2013	18.5	23	22	22	20	20	4.5
25/julio/2013	18.5	140	138	138	135	134	121.5
7/ago/2013	18.5	24	24	23	22	21	5.5
8/ago/2013	18.5	144	143	143	142	142	125.5
22/ago/2013	18.5	26	25	24	24	23	7.5
23/ago 2013	18.5	145	145	145	145	145	126.5

Fuente: Elaboración propia

Como puede notarse, la colmatación se dio apenas después de transcurridas 24 horas de operación, por lo que puede considerarse que el tiempo que el medio filtrante modificado permanece útil antes de necesitar limpieza no es razonable para la operación normal en tratamiento de aguas residuales, ya que implicaría efectuar limpieza del geotextil diariamente, lo que lo vuelve poco práctico en sentido de operación y mantenimiento.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En primer término, se hace referencia a los resultados desde el punto de vista de los parámetros de calidad del agua, según lo descrito en la sección 3.1.

En la tabla V pueden notarse las fechas de los muestreos realizados. Se efectuó el monitoreo en intervalos de dos semanas entre cada uno, durante un período total de 4 meses, iniciando el jueves 9 de agosto de 2012.

Sin embargo, aparece un lapso correspondiente al mes de septiembre sin muestreos, debido a que al alcanzar la colmatación del lecho filtrante fue necesario efectuar el raspado de la capa superficial de arena para retirar el material retenido por el medio.

Seguidamente, el llenado y ajuste de caudales tomó cerca de dos semanas, por lo que se justifica el período de un mes sin muestreos realizados.

De igual manera se hizo en el mes de diciembre del mismo año, con lo que se pudo notar que el período de colmatación del medio filtrante convencional se puede aproximar a seis semanas.

La colmatación se pudo comprobar por medio de los niveles de agua dentro de las mangueras del piezómetro múltiple que se instaló en el filtro para esa función.

En segundo término, se hace referencia a la evaluación del medio filtrante modificado por medio de la reducción de su espesor en 40%, es decir, la altura

original de la arena que era de 1.0 m se redujo hasta alcanzar una altura final de 0.60 m. Seguidamente, se colocó sobre dicho medio una capa de geotextil del tipo W315 de 214 g/m².

En la tabla VI pueden notarse las fechas de los muestreos realizados. Se efectuó el monitoreo en intervalos de dos semanas entre cada uno, durante un período total de 3 meses, iniciando el miércoles 22 de mayo de 2013.

Al alcanzar la colmatación del lecho filtrante fue necesario efectuar el vaciado del filtro para extraer la capa de geotextil y proceder a su lavado para retirar el material retenido por el medio.

En esta etapa siempre se observó la colmatación del filtro en un tiempo menor a 24 horas. Al día siguiente de la puesta en marcha del filtro, los niveles de agua en las mangueras de los piezómetros se encontraban a la altura de la capa del medio de soporte de mayor granulometría, es decir, en más de 120 cm de diferencia entre el nivel del sobrenadante en el interior del filtro.

De acuerdo con la teoría, la diferencia de niveles cuando el material filtrante se encuentra completamente limpio debería ser alrededor de los 10 cm. Por tal razón pudo concluirse que el comportamiento hidráulico del filtro con el medio modificado con el geotextil no es práctico para acciones de operación y mantenimiento, ya que obligaría a efectuar la limpieza diaria del filtro. Esto aumentaría grandemente los costos de operación y de mantenimiento.

Otro factor —y probablemente el principal— que se vio afectado en la operación con estos períodos tan cortos, es que no se contó con el tiempo suficiente para que se formara y madurara la biopelícula (*schmutzdecke*) que realmente efectúa el tratamiento del agua.

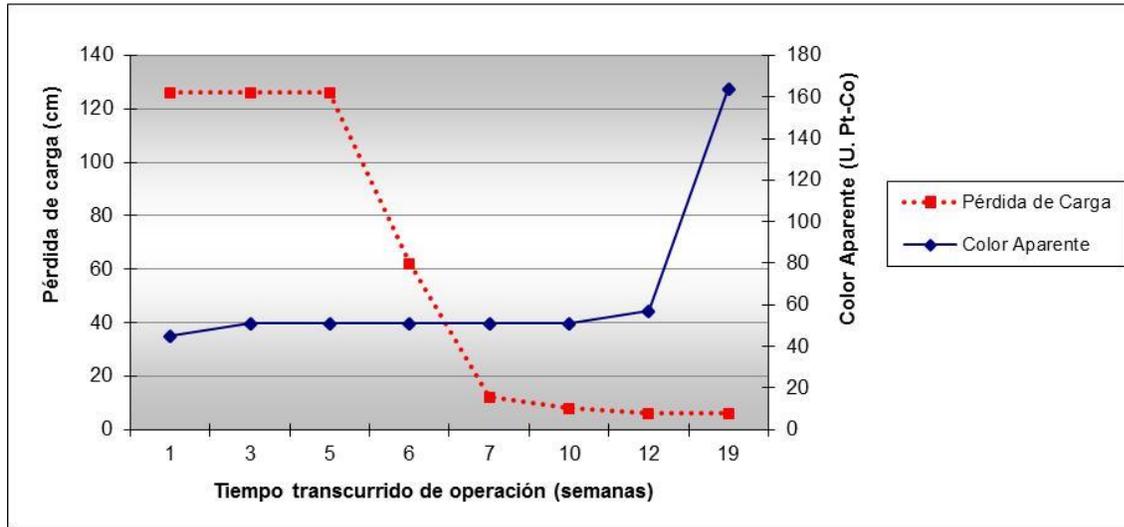
Dadas las características de las sustancias presentes en el agua, no sería suficiente la filtración física, ya que no se trata de sustancias suspendidas, sino más bien de sustancias disueltas que requieren imprescindiblemente de la acción de los microorganismos. Estos no pueden desarrollarse adecuadamente por los lapsos tan cortos de colmatación, y de ahí las bajas eficiencias encontradas en el proceso.

Por tales razones se ha recomendado que el medio filtrante se evalúe cuando se utilice arena de granulometría apropiada para filtración rápida, que permita un tiempo de colmatación mayor y la formación adecuada de la capa biológica.

Adicionalmente, se planteó el uso de gráficas para una mejor interpretación de la evolución de los parámetros obtenidos a la salida del filtro en función del tiempo transcurrido de operación.

En la figura 19 se observa el comportamiento de la remoción de color comparado con la pérdida de carga en función del tiempo de operación. En dicha gráfica puede notarse que la línea de pérdida de carga expresada como altura de agua dentro de la manguera No. 1, que representa el fondo del lecho filtrante, se cruza con el aumento del color expresado en unidades de platino-cobalto en un tiempo de operación de seis a siete semanas.

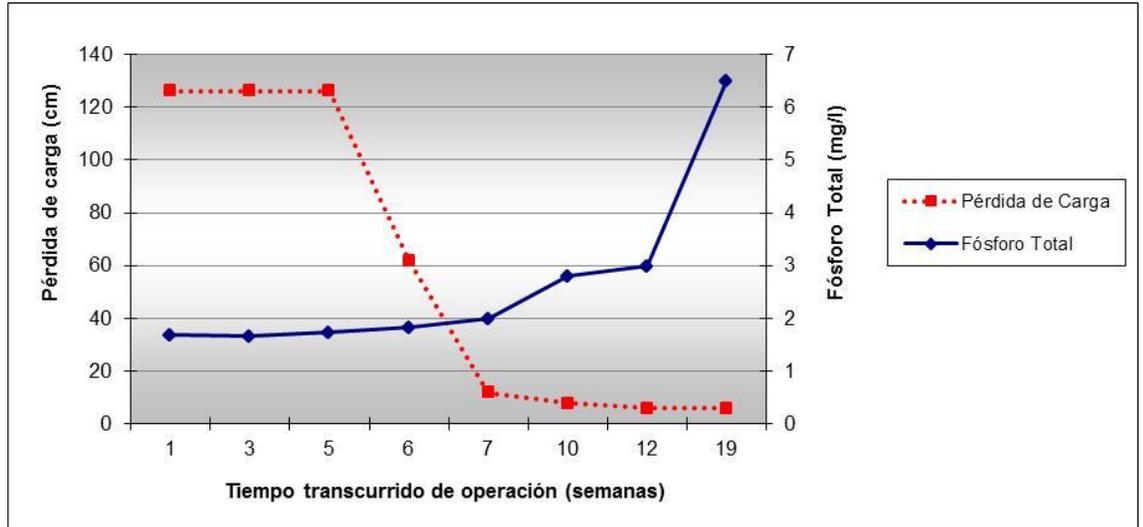
Figura 19. **Comparación de la evolución de la remoción de color aparente vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional**



Fuente: Elaboración propia, empleando Excel 2010.

Seguidamente, en la figura 20 se observa el comportamiento de la remoción de fósforo total comparado con la pérdida de carga en función del tiempo de operación. En dicha gráfica puede notarse que la línea de pérdida de carga expresada como altura de agua dentro de la manguera No. 1, que representa el fondo del lecho filtrante, se cruza con el aumento de la concentración de fósforo total expresado en miligramos por litro como P, en un tiempo de operación de seis a siete semanas.

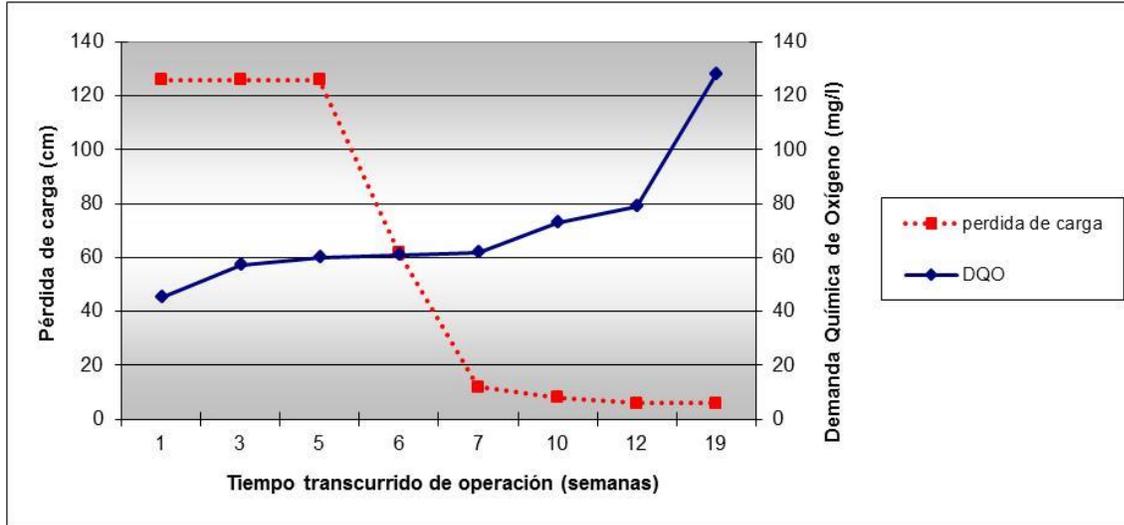
Figura 20. **Comparación de la evolución de la remoción de color aparente vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional.**



Fuente: Elaboración propia, empleando Excel 2010.

Finalmente, en la figura 21 se observa el comportamiento de la remoción de demanda química de oxígeno –DQO- comparado con la pérdida de carga en función del tiempo de operación. En dicha gráfica puede notarse que la línea de pérdida de carga expresada como altura de agua dentro de la manguera No. 1, que representa el fondo del lecho filtrante, se cruza con el aumento de la concentración de la demanda química de oxígeno expresada en miligramos por litro como DQO, en un tiempo de operación de seis a siete semanas.

Figura 21. **Comparación de la evolución de la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) vrs. la pérdida de carga en función del tiempo de operación del medio filtrante convencional.**



Fuente: Elaboración propia, empleando Excel 2010.

En las tres gráficas anteriores puede notarse que la pérdida de carga se vuelve crítica en un período de hasta siete semanas, mientras que la remoción de parámetros aún puede considerarse aceptable en períodos superiores.

Este comportamiento respalda la conclusión de que el medio filtrante podría ser adecuado para el tratamiento terciario de las aguas residuales, pero el comportamiento hidráulico del sistema impide el funcionamiento práctico de la unidad.

CONCLUSIONES

1. No es viable el uso de geotextiles en filtración lenta como parte del tratamiento terciario de aguas residuales, debido a que el comportamiento hidráulico expresado como pérdida de carga no es adecuado para una operación económica, ya que el tiempo de colmatación resultó menor a 24 horas, lo cual es muy corto para una operación razonable y económica.
2. Desde el punto de vista de la calidad del agua, no es viable el uso de geotextiles ya que se presentan porcentajes de remoción menores a 30% en todos los parámetros, por lo que la calidad del agua no se mejora en forma significativa.
3. Dado que el valor calculado de “Z” para todos los parámetros se encuentra fuera de la región de “no rechazo”, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, por lo que se concluye que Sí existe diferencia significativa entre la filtración lenta de aguas residuales con medio convencional de arena y con geotextiles aplicados al medio convencional reducido en 40% de su espesor.
4. Se determinó que el medio convencional en la filtración lenta del efluente del biofiltro funciona adecuadamente conforme a lo esperado para la calidad del agua, ya que se remueve aproximadamente el 50% de la demanda química de oxígeno y muy cerca del 70% de la demanda bioquímica de oxígeno. Por lo que se concluye que el medio filtrante es suficientemente efectivo para remover carga orgánica.

5. El medio convencional de arena no logra remover más del 20% de la carga de nutrientes, expresada como nitrógeno total y fósforo total, por lo que se concluye que el medio convencional no es suficientemente efectivo para remover nutrientes.
6. En cuanto al color, se determinó que el filtro logra remover aproximadamente el 50%, pero dado que el afluente tiene desde un inicio valores que cumplen con la normativa vigente para aguas residuales, el medio convencional puede considerarse suficientemente efectivo.
7. La pérdida de carga en el medio filtrante indica una colmatación del filtro en un tiempo de cuatro semanas, lo que se considera adecuado, y por tanto se concluye que el medio filtrante convencional es adecuado para la filtración terciaria del agua proveniente del reactor biológico de lirios.
8. Se determinó que el medio de arena modificado con geotextiles en la filtración lenta del efluente del biofiltro no rindió resultados adecuados según lo esperado para el mejoramiento de la calidad del agua ya que se remueve menos del 30%, tanto de la demanda química de oxígeno como de la demanda bioquímica de oxígeno, por lo que se concluye que el medio filtrante modificado no es suficientemente efectivo para remover carga orgánica.
9. Asimismo, el medio filtrante modificado con geotextiles no logra remover más del 22% de la carga de nutrientes, expresada como nitrógeno total y fósforo total, por lo que se concluye que el medio filtrante modificado no es suficientemente efectivo para remover nutrientes.

10. En cuanto al color, se determinó que el filtro logra remover menos del 20%. Sin embargo, dado que el afluente tiene desde un inicio valores que cumplen con la normativa vigente para aguas residuales, puede considerarse indiferente el uso de geotextiles en el medio filtrante para este parámetro.

11. Dado que se observó que la pérdida de carga en el medio filtrante indica una colmatación del filtro extremadamente rápida (menos de 24 horas), conforme a la operación adecuada de filtros lentos, se concluye que el medio filtrante modificado con la aplicación de geotextiles NO es adecuado para la filtración terciaria del agua proveniente del reactor biológico de lirios.

RECOMENDACIONES

1. Estudios posteriores deberán evaluar el comportamiento del medio filtrante con granulometría adecuada para filtración rápida, a fin de evitar la colmatación del filtro en períodos cortos de tiempo.
2. También deberán evaluarse otros tipos de geotextiles de características diferentes al del presente estudio.
3. Deberá estudiarse el comportamiento del filtro cuando el geotextil sea aplicado en otra posición diferente a la del presente estudio, como por ejemplo en la interfase entre la capa de arena y la de grava fina, a efecto de evitar que el geotextil flote en el cuerpo de agua sobrenadante que se emplea dentro del filtro.
4. Se recomienda que el caudal de agua que se deriva desde el canal de entrada de la planta hacia el sistema de tratamiento anaerobio-aerobio sea tomado después de la etapa de sedimentación primaria, a efecto de aumentar la eficiencia de los tratamientos secundarios y asegurar así que el efluente de los biofiltros será de menor carga para el filtro terciario.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Water Works Association. American Public Health Association (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. USA. ISBN: 0-87553-235-7.
2. Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo II*. Colombia: McGraw-Hill. ISBN: 958-41-0014-9.
3. Bernardo, L. (1991). *Uso da manta sintética não tecida em tratamento de água de abastecimento*. Congresso Internacional de Não-tecidos, São Paulo. Recuperado de: <http://www.cenaridus.ufc.br/trabalhos.htm>.
4. Castro, M. (1981). *Manual de Instrucción. Programa Regional CEPIS-OPS-OMS. Ciclo: Ciencias Básicas de Tratamiento de Agua. Módulo 2.7: Ensayos de Laboratorio. Submódulo 2.7.3: determinación de variables químicas*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011991-5.pdf.
5. Correal, R. (2002). *Tratamiento y postratamiento de aguas residuales*. Colombia: Ediciones UNIBOYACÁ. ISBN: 958-95234-2-0.

6. Daniel, W. (2010). *Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud*. México: LIMUSA-WILLEY. ISBN: 978-968-18-6164-3.
7. Departamento De Sanidad Del Estado De Nueva York. (2011). *Manual de tratamiento de aguas negras*. México: LIMUSA. ISBN: 978-968-18-0464-0.
8. Fair, G. M. (2008). *Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales*. Tomo 2: Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. México: LIMUSA. ISBN-13: 978-968-18-0167-0.
9. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Guatemala. Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Diario de Centroamérica.
10. Hernández, M. (1995). *Diagnóstico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II*. Tesis de Maestría en ciencias en Ingeniería Sanitaria, Guatemala; USAC, ERIS, Facultad de Ingeniería.
11. Hincapié, M. (2015). *Diagnóstico de aguas. Manual de Laboratorio*. Colombia: Sello Editorial Universidad de Medellín. ISBN: 978-958-8815-67-1.

12. Lux M. (2011). *Medidores de flujo en canales abiertos* (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf.
13. Orozco, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental ACODAL. ISBN: 958-96454-5-3.
14. Paterniani, J. (2006). Pré-filtração em Pedregulho e Filtração Lenta com Areia, Manta Não Tecida e Carvão Ativado para Polimento de Efluentes Domésticos Tratados por Leitos Cultivados, 08/2006. *XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Vol. 1, pp.1-3, João Pessoa, PB, Brasil. Recuperado de: <http://www.unicamp.br/anuario/2006/FEAGRI/FEAGRI-0012.html>.
15. Pelczar, R. (1982). *Microbiología*. México: McGraw-Hill. ISBN: 968-6046-65-8.
16. Romero, J. (2009). *Calidad del Agua*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN: 978-958-8060-83-5.
17. Romero, J. (2010). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN: 958-8060-13-3.

18. Ruano, R. (2005). *Determinación de período apropiado de corte del pasto Napier (*Penisetum purpureum*) después del riego por aspersión con agua residual sedimentada, en la planta de tratamiento Aurora II, para reducir la contaminación bacteriológica foliar y propiciar buenas características agronómicas* (Tesis Maestría en ciencias en Ingeniería Sanitaria). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala.
19. Sierra, C. (2011). *Calidad del Agua. Evaluación y Diagnóstico*. Colombia: Ediciones de la Universidad de Medellín. ISBN: 978-958-8692-06-7.
20. Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-289087-8.
21. Turcios, A. (2011). *Evaluación de la calidad de las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento Aurora II con fines de riego en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)* (Tesis Maestría en ciencias en Recursos Hidráulicos, opción Gestión Integrada de Recursos Hídricos). Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala.