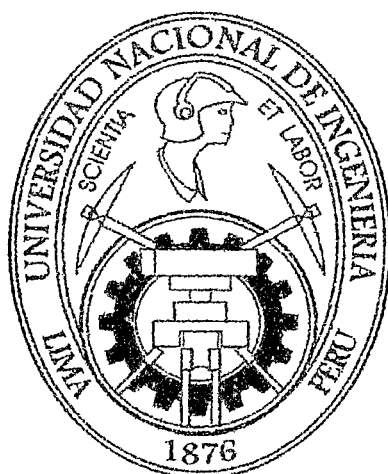


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

SECCIÓN DE POSTGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN



**“ESTUDIO DEL USO DE FILTRACIÓN LENTA EN LA REMOCIÓN
DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES DEL EFLUENTE DEL
SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES - PLANTA UNITRAR”**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:
TRATAMIENTO DE AGUAS Y REUSO DE
DESECHOS**

PRESENTADO POR:

CARMEN JUANA BARZOLA CHOQUE

LIMA, PERÚ

2010

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

DEDICATORIAS

*A mi amado Víctor, mi esposo,
por su asesoría profesional y por ser el crítico perseverante que me hizo falta
para terminar este proyecto.*

*A mis amados hijos,
Andrea Alejandra y Víctor Manuel, por el tiempo que no les pude dar y que a
su corta edad supieron entender lo importante que es para mí el logro de mis
aspiraciones profesionales.*

*A mis amados padres,
Pedro Barzola Urco y Juana Choque de Barzola, mi amor y agradecimiento
eterno; por todo su apoyo en la atención, protección y amor brindado a mis
niños, cuando más lo necesité; y por ser los gestores de mi desarrollo
personal y profesional.*

*A Dios,
que tiene poder sobre todas las cosas y que, en virtud de la fuerza con que
actúa con nosotros, es capaz de hacer mucho más de lo que nosotros
pedimos o pensamos, a él la gloria en la Iglesia y en Cristo Jesús por siempre
y para siempre. Amén.*

Efesios 3, 20-21

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por facilitarme las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería – UNITRAR, para la realización del presente estudio, y a los operadores y brigadistas del UNITRAR.

Al Msc. Ing. Víctor Maldonado Yactayo, por su asistencia técnica para la implementación del Filtro Lento piloto.

Finalmente, un reconocimiento y agradecimiento especial a la Msc. Ing. Rosa Elena Yaya Beas en calidad de asesora de la tesis, a quien debo reconocer su excelente calidad personal y profesional.

RESUMEN

El estudio del uso de filtros lentos de arena (FLA), a escala piloto, para optimizar la remoción microbiológica del efluente de un sistema de humedales subsuperficiales fue realizado en la Planta UNITRAR de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú. En la primera fase experimental se aplicaron tasas superficiales de 0,18 m³/m².h, 0,164 m³/m².h, 0,123 m³/m².h, 0,065 m³/m².h y 0,039 m³/m².h.; y el máximo porcentaje de remoción de DBO₅ y de Coliformes termotolerantes fue de 76,77% de 40,09%, respectivamente, con una tasa superficial aplicada de 0,039 m³/m².h. En una segunda fase experimental se aplicaron tasas superficiales de 0,008 m³/m².h, 0,049m³/m².h, 0,033m³/m².h, 0,016m³/m².h y 0,008m³/m².h, obteniéndose a ésta última tasa superficial el mayor porcentaje de remoción de Coliformes termotolerantes: 94,50%(1,26log). El FLA logró remover el 100% de los Quistes de *Entamoeba coli* presentes en el afluente en concentración de 4 Quistes/, con una tasa superficial aplicada de 0,049 m³/m².h.

Con la prueba F ANOVA se concluyó que existe una diferencia significativa en los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos; y con el estadístico de comparación múltiple de Tukey Kramer; se determinó que la tasa superficial de 0,008m³/m².h tiene un rendimiento de remoción significativamente mejor que la tasa superficial de 0,049m³/m².h, pero no existe evidencia de una diferencia significativa entre las comparaciones de las demás tasas superficiales.

Finalmente, se concluye que el FLA piloto mejora la calidad microbiológica del efluente secundario del humedal subsuperficial, en términos de Coliformes termotolerantes operando a una tasa superficial de 0,008 m³/m².h; lo que califica a dicho efluente dentro de la categoría B de las Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura, con las condiciones de reutilización en Irrigación de cereales, cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles.

ABSTRACT

The study of the use of slow sand filters (SSF) a pilot scale to optimize the removal of microbiological effluent subsurface wetland system was developed at the UNITRAR Plant - National University of Engineering, Lima - Peru.

In the first experimental phase were applied surface rates of 0,18 m³/m².h, 0,164 m³/m².h, 0,123 m³/m².h, 0,065 m³/m².h y 0,039 m³/m².h; and the maximum percent removal of BOD₅ and thermotolerant coliforms was 76.77% and 40.09%, respectively, with a applied surface rates of 0,039m³/m².h.

In a second experimental phase were applied surface rates of 0.049 m³/m².h, 0.033 m³/m².h, 0.016 m³/m².h and 0.008 m³/m².h, in the latter surface rates was achieved the maximum percent removal of thermotolerant coliforms: 94.50% (1.26 log).

The SSF was able to remove 100% of the cysts of Entamoeba coli present in the influent at a concentration of 4 cysts /L, with applied surface rate of 0.049 m³/m².h.

The ANOVA F-test concluded that there is a significant difference in the logarithms of thermotolerant coliform removal obtained and the statistical Tukey Kramer multiple comparison, it was determined that the surface rate of 0.008 m³/m².h has a removal efficiency significantly better than the surface rate of 0.049 m³/m².h, but there is no evidence of significant differences among the other comparisons of surface rates.

Finally, this study conclude that the SSF pilot improving the microbiological quality of secondary effluent from the wetland subsurface thermotolerant coliforms in terms of operating at surface rate 0,008 m³/m².h., then this effluent qualifies into the category B of the WHO Guidelines (1989) on parasitological and microbiological quality of wastewater for agricultural use under the conditions of reuse in irrigation of cereals, industrial crops, fodder, grass and trees.

INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco Normativo y criterios de calidad	5
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Filtros Lentos de Arena para el tratamiento de aguas residuales	22
2.2 Componentes	24
2.3 Mecanismos de la filtración	25
2.4 Diseño de Filtros	33
2.5 Aplicaciones	35
2.6 Rendimiento	36
2.7 Ventajas y Limitaciones	37
2.8 Experiencias del uso de FLA en el tratamiento de aguas residuales	38
3. OBJETIVOS	43
3.1 Objetivos Generales	43
3.2 Objetivos Específicos	43
4. MATERIALES Y MÉTODOS	44
4.1 Diseño del sistema de tratamiento experimental	44
4.2 Diseño Experimental del Filtro Lento de Arena	62
4.3 Muestreo	67
4.4 Análisis	69
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
5.1 Calidad del efluente secundario a tratar	71
5.2 Caudales de ingreso	74
5.3 Efecto de la temperatura	76
5.4 Efecto del pH	79
5.5 Remoción de carga orgánica	82
5.6 Remoción de parásitos	84
5.7 Remoción de coliformes termotolerantes	91

5.8 Análisis del rendimiento del FLA piloto para la remoción de coliformes termotolerantes	101
6. CONCLUSIONES	110
7. RECOMENDACIONES	117
8. LITERATURA CITADA	118
ANEXOS	122
ANEXO A. Valor Crítico de F	123
ANEXO B. Valores críticos del alcance Q estudentizado	124

Relación de Tablas

	pág.
Tabla 1. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas	8
Tabla 2. Guías sugeridas para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento	15
Tabla 3. Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura	17
Tabla 4. Medidas de control de protección a la salud	19
Tabla 5. Principales cultivos empleados para reuso de aguas residuales domésticas	20
Tabla 6. Características técnicas del Geotextil	52
Tabla 7. Características del medio filtrante y cargas hidráulicas aplicadas Fase I	66
Tabla 8. Características del medio filtrante y cargas hidráulicas aplicadas Fase II	67
Tabla 9. Calidad del efluente aplicado al Filtro Lento de Arena piloto	71
Tabla 10. Densidad de Coliformes Termotolerantes en el efluente del Filtro Lento de Arena piloto	96
Tabla 11. Remoción de log. de Coliformes Termotolerantes obtenidos a diferentes tasas superficiales aplicadas al FLA piloto	103
Tabla 12. Cálculo Intercuartil IQR/S de logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes obtenidos con la aplicación de tasas superficiales de $0,008\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$, $0,016\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$, $0,033\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$, $0,049\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$,	105
Tabla 13. Análisis de varianza de los Logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,033\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,049\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	107
Tabla 14. Comparación Múltiple de Logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,033\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,049\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	109
Tabla 15. Características de diseño del FLA piloto	111

Relación de Gráficos

	pág.
Gráfico 1. Densidad de Coliformes Termotolerantes en el afluente y efluente del tanque séptico y efluente del Humedal, Diciembre 2003-Octubre 2004	72
Gráfico 2. Densidad de Coliformes Termotolerantes a la salida del Humedal artificial durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	72
Gráfico 3. Variación de la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) durante el periodo de estudio Diciembre 2003- Octubre 2004	73
Gráfico 4. Variación de la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) a la salida del Humedal, durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	74
Gráfico 5. Caudales de ingreso, Tasa superficial y Tiempos de retención diseñados para el FLA piloto durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	75
Gráfico 6. Caudales de ingreso, Tasa superficial y Tiempos de retención diseñados para el FLA piloto durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009	75
Gráfico 7. Valores promedios de Temperatura en el afluente y efluente del FLA piloto y logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	77
Gráfico 8. Efecto de la Temperatura en la remoción de Coliformes Termotolerantes en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero – Marzo 2009	78
Gráfico 9. Correlación de la variación del pH, entre el ingreso y salida del FLA piloto, frente al Tiempo de retención durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	80
Gráfico 10. Efecto del pH en la remoción de Coliformes Termotolerantes en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009	81

Gráfica 11. Porcentajes de remoción de Coliformes Termotolerantes y DBO5 en el FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008	82
Gráfica 12. Remoción de Nemátodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,049 m ³ /m ² .h	84
Gráfico 13. Remoción de Céstodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,049 m ³ /m ² .h	85
Gráfico 14. Remoción de Protozoarios en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,049 m ³ /m ² .h	86
Gráfico 15. Remoción de ciliados y Coccidios en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,049 m ³ /m ² .h	87
Gráfico 16. Remoción de Nemátodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,008 m ³ /m ² .h	88
Gráfica 17. Remoción de Céstodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,008 m ³ /m ² .h	89
Gráfico 18. Remoción de Protozoarios en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,008 m ³ /m ² .h	90
Gráfico 19. Remoción de ciliados y Coccidios en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,008 m ³ /m ² .h	90
Gráfico 20. Remoción de Coliformes Termotolerantes a densidad máxima de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008	91
Gráfico 21. Remoción de Coliformes Termotolerantes a densidad promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008	92
Gráfico 22. Remoción de Coliformes Termotolerantes a densidad mínima de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008	92
Gráfico 23. Efecto de la tasa superficial en la remoción de coliformes termotolerantes a densidades máximas de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a marzo 2009	94
Gráfico 24. Efecto de la tasa superficial en la remoción de coliformes termotolerantes a densidades promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a marzo 2009	95

Gráfico 25. Efecto de la tasa superficial en la remoción de coliformes termotolerantes a densidades mínima de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a marzo 2009	96
Gráfico 26. Grado de asociación entre las tasas superficiales y la remoción de coliformes termotolerantes a densidades mínima, máxima y promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a marzo 2009	97
Gráfico 27. Histograma de los logaritmos de remoción obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	104
Gráfico 28. Curva de Probabilidad Normal de los Logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	106
Gráfico 29. Relación de los logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes a densidad mínima con el tiempo de retención en el FLA piloto, durante la Fase II del aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	114
Gráfico 30. Relación de los logaritmos de remoción de Coliformes Termotolerantes a densidad máxima con el tiempo de retención en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero – Marzo 2009	115

Relación de Figuras

	pág.
Figura 1. Relación entre el tamaño y poro de la arena	27
Figura 2. Transporte en el agua de la partícula discreta	28
Figura 3. Flujo de la película y los efectos de tratamiento sobre las partículas del medio filtrantes	32
Figura 4. Filtro de arena intermitente	34
Figura 5. Filtro de arena recirculante	35
Figura 6. Esquema de las unidades que conformaron el sistema de tratamiento experimental	46

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua y el saneamiento serán uno de los futuros desafíos principales en un mundo con crecimiento demográfico e industrial. La toma de conciencia cada vez mayor sobre la escasez de recurso de agua, la competencia por el recurso de agua y el impacto negativo del agua contaminada sobre la salud humana y el ambiente, obliga a desarrollar estrategias adecuadas en la gestión del agua. Las nuevas estrategias de gestión para el abastecimiento de aguas dulces, los procesos para tratar y reciclar las aguas negras jugarán un papel importante en la solución de los problemas a futuro⁽³²⁾.

El mayor reuso de las aguas residuales en el mundo es para la irrigación, en una proporción del 60% del total, mientras que la segunda mayor reutilización que representa aproximadamente el 30%, es para la refrigeración industrial y aguas de proceso.

La escasez general del agua en el mundo y los altos costos que representa desarrollar nuevas fuentes de agua, son los dos principales factores que hace necesario el transformar el agua de los efluentes de aguas residuales.

La reutilización directa de efluentes secundarios implica someterlos a un proceso de tratamiento terciario.

Dos tipos principales de reutilización han sido desarrollados y practicados en todo el mundo:

A-Uso potable

- directo, empleo de agua reclamada para aumentar suministro de agua potable después de los altos niveles de tratamiento
- indirecto después de pasar por el entorno natural

B- Empleos no potables

- agricultura irrigada
- el empleo para irrigar parques, los sitios públicos de silvicultura (lo más rápido reutiliza el uso en Europa: Irrigación de canchas de golf)
- empleo para acuicultura
- la capa acuífera recarga (la reutilización indirecta)
- o empleos en industria y establecimientos urbanos

Idelovitch ⁽¹⁸⁾, explican la distinción entre la irrigación restringida y sin restricción (dependiendo de la clase de cosecha):

Restringido

- empleo de efluentes de baja calidad en áreas limitadas y para cosechas específicas
- Las restricciones son impuestas basadas en el tipo de suelo, la proximidad del área irrigada a una capa acuífera potable, el método de irrigación, la técnica de la cosecha, y la tarifa de uso de fertilizante
- Simple y precio bajo, en el general sólo aplicable a las pequeñas cantidades de aguas negras, usadas en posiciones específicas, donde las áreas y cosechas son bien definidas e improbable para cambiarse
- La limitación de cosecha impuesta debe ser hecha cumplir y controlada
- Los agricultores deben ser entrenados para manejar el efluente de calidad baja

Sin restricción

- El empleo de efluentes de alta calidad, en vez de agua dulce, para irrigar cualquier cosecha sobre cualquier tipo de suelo, es decir sin limitaciones.

- El contacto y la ingesta accidental no ocasione peligros para la salud
- Las cosechas sin cualquier restricción incluyen también verduras la materia prima comida.

Reciclar las aguas residuales urbanas y usarlas para los cultivos agrícolas puede ayudar a mitigar los problemas de escasez de agua y reducir la contaminación del agua, pero se trata de una práctica que no está tan extendida como debiera, según un último informe de la FAO "La riqueza de los residuos: economía del uso de las aguas residuales en la agricultura", publicado en la Semana Mundial del Agua (Estocolmo, del 5 al 11 de septiembre 2010).

"Los estudios de caso incluidos en el informe indican que una gestión segura de las aguas residuales en la producción alimentaria supone una forma de aliviar la competencia entre las ciudades y la agricultura por el agua en regiones en la escasez va en aumento", explicó Pasquale Steduto, Director Adjunto de la División de Tierra y Aguas de la FAO. "En un contexto adecuado -añadió- puede ayudar también con el tratamiento de las aguas residuales y la consiguiente contaminación de los ríos".

En Lima las aguas residuales domésticas sólo se reusa para el riego de los cultivos de tallo alto como la caña de azúcar y el maíz. Así como, para los sistemas forestales de la ciudad: parques y árboles.

En promedio se necesitan 3 000 l de agua por persona para generar los productos necesarios para la alimentación diaria.

Siendo Lima una ciudad con crecimiento poblacional considerable, requiere contar con una fuente de abastecimiento suficiente para la producción de agua potable, y hacer un uso restrictivo y adecuado solo para consumo humano y no para uso agrícola e industrial; por lo cual es importante considerar que el agua residual doméstica, tratada adecuadamente puede ser una fuente de agua valiosa que satisfaga la demanda para uso no potable.

El Tratamiento Terciario es un paso adicional para remover más contaminantes de las aguas residuales de lo que generalmente se elimina con el tratamiento secundario de aguas residuales convencionales. Este tratamiento terciario incluye, filtración (lenta o rápida), precipitación química, adsorción con carbón u ósmosis inversa. La selección de un proceso de tratamiento terciario depende principalmente de la calidad o la meta de agua.

Un Filtro de arena bien diseñado, construido, operado y con mantenimiento adecuado, produce un efluente de alta calidad.

La literatura menciona dos tipos de diseños de filtros que son comunes para el tratamiento de efluentes secundarios, el de "paso simple" y el de "recirculación". Ambos tienen mecanismos de tratamiento y rendimiento similares, pero que funcionan de manera diferente. El de "paso simple" históricamente llamado "filtro intermitente", descarga el efluente tratado del tanque séptico después de un paso a través del medio filtrante.

El filtro de recirculación, recolecta y recircula el efluente tratado, descargándolo varias veces a través del medio filtrante. Cada uno tiene sus ventajas para diferentes aplicaciones ⁽²⁾.

La utilización de la filtración lenta en el tratamiento de desagües domésticos representa una alternativa viable, desde el punto de vista técnico y económico, sobre todo en desagües pretratados procedentes de pequeñas poblaciones.

Ellis (1984), realizó una extensa revisión de la historia, rendimiento y la influencia de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos en los Filtros Lentos de Arena, cuyo uso para tratamiento de efluentes secundarios, fue un concepto recientemente explorado en los años 80.

La práctica combinada de sistemas de tratamiento de agua residual y una racional irrigación agrícola, como se realiza en otros países, significaría una estrategia económicamente viable para desarrollar una fuente de agua crucial para la agricultura peruana.

Si bien es cierto que en el Perú, la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales corresponden a lagunas de estabilización, tanques Imhoff y filtros biológicos, se han realizado investigaciones para diseñar nuevos sistemas a mas bajo costo, amigables al ambiente y con potencial económico a partir de procesos observados en la naturaleza, como es el sistema de humedales de tipo subsuperficial de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – UNITRAR, el cual ha logrado con una carga orgánica aplicada máxima de DBO₅ de 250,00 mg/L y de DQO de 500,00 mg/L, una máxima eficiencia de remoción del orden de 93% y 97% respectivamente. La eficiencia de remoción máxima reportada de sólidos suspendidos totales (SST) fue del 94%. El fósforo total reportó una eficiencia de remoción máxima de 99,9%. El N-Amoniacal (NH₃) reportó una máxima eficiencia de 48%. Los análisis de parásitos reportaron en promedio una eficiencia del orden del 100% en la remoción de huevos de parásitos como ascarioideos (100%), Hymenolepis nana (100%), Trichuris trichiura (100%) y Ascaris lumbricoides (100%). Los análisis bacteriológicos reportaron una eficiencia de 99,89% en la reducción de Coliformes termotolerantes, lo que representó valores promedios de coliformes termotolerantes de $7,61 \times 10^5 \pm 6,81 \times 10^5$ NMP/100ml a la salida del efluente del humedal subsuperficial ⁽²⁰⁾.

El presente estudio es una extensión del trabajo reportado por V. Maldonado ⁽²⁰⁾, con el propósito de evaluar el rendimiento de un Filtro Lento de Arena piloto de flujo continuo para la remoción de Coliformes termotolerantes; en base a procesos biológicos naturales.

1.1 Marco Normativo y criterios de calidad

1.1.1 Normas Nacionales

Las normas Peruanas sobre la calidad del agua para las aguas receptoras se basan principalmente en la **La Ley de Recursos Hídricos N° 29338**, la cual regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea,

continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable.

La presente Ley tiene por finalidad regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta.

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los **Estándares de Calidad Ambiental del Agua para Agua (Decreto Supremo N°002-2008-MINAM)** y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reuso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la Autoridad Ambiental Nacional.

El titular de una licencia de uso de agua está facultado para reutilizar el agua residual que genere siempre que se trate de los mismos fines para los cuales fue otorgada la licencia.

Los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, tienen por objeto establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. Los Estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural en su estado natural y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Estos Estándares se clasifican por su uso en cuatro categorías:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

Categoría 2: Actividades Marino Costeras

Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebidas de Animales

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Tabla 1. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua ⁽²⁵⁾

ANEXO I
ESTÁNDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA
CATEGORÍA 1: POBLACIONAL Y RECREACIONAL

PARÁMETRO	UNIDAD	Agua superficiales destinadas a la producción de agua potable			Agua superficiales destinadas para recreación	
		A1	A2	A3	B1	B2
		Agua que pueden ser potabilizadas con desinfección	Agua que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Agua que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Contacto Primario	Contacto Secundario
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
FÍSICOS Y QUÍMICOS						
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	1	1,00	1,00	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,005	0,022	0,022	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,08	0,08	0,08	0,08	**
Cloruros	mg/L	250	250	250	**	**
Color	Color verdadero escala Pt/Co	15	100	200	sin cambio normal	sin cambio normal
Conductividad	us/cm ²⁰	1 500	1 600	**	**	**
D.B.O. ₅	mg/L	3	5	10	5	10
D.Q.O.	mg/L	10	20	30	30	50
Dureza	mg/L	500	**	**	**	**
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	0,5	na	0,5	Ausencia de espuma persistente
Fenoles	mg/L	0,003	0,01	0,1	**	**
Fluoruros	mg/L	1	**	**	**	**
Fósforo Total	mg/L P	0,1	0,15	0,15	**	**
Materiales Flotantes		Ausencia de material flotante	**	**	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos	mg/L N	10	10	10	10	**
Nitritos	mg/L N	1	1	1	1(5)	**
Nitrógeno amoniacal	mg/L N	1,5	2	3,7	**	**
Olor		Aceptable	**	**	Aceptable	**
Oxígeno Disuelto	mg/L	>= 6	>= 5	>= 4	>= 5	>= 4
pH	Unidad de pH	6,5 - 8,5	5,5 - 9,0	5,5 - 9,0	6-9 (2,5)	**
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500	**	**
Sulfatos	mg/L	250	**	**	**	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**	**	0,05	**
Turbiedad	UNT ²⁰	5	100	**	100	**
INORGÁNICOS						
Aluminio	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	**
Antimonio	mg/L	0,006	0,006	0,006	0,006	**
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,05	0,01	**
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	0,7	**
Berilio	mg/L	0,004	0,04	0,04	0,04	**
Boro	mg/L	0,5	0,5	0,75	0,5	**
Cadmio	mg/L	0,003	0,003	0,01	0,01	**
Cobre	mg/L	2	2	2	2	**
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	**
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	**
Hierro	mg/L	0,3	1	0,3	0,3	**
Manganeso	mg/L	0,1	0,4	0,5	0,1	**
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,001	**
Níquel	mg/L	0,02	0,025	0,025	0,02	**
Plata	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	0,05
Plomo	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	**
Selenio	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	**
Uranio	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Vanadio	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zinc	mg/L	3	5	5	3	**
ORGÁNICOS						
I. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES						
Hidrocarburos totales de petróleo, HTP	mg/L	0,05	0,2	0,2		
Trihalometanos	mg/L	0,1	0,1	0,1	**	**
Compuestos Orgánicos Volátiles COVs						
1,1,1-Tricloroetano -- 71-55-6	mg/L	2	2	**	**	**
1,1-Dicloroetano -- 75-35-4	mg/L	0,03	0,03	**	**	**
1,2-Dicloroetano -- 107-06-2	mg/L	0,03	0,03	**	**	**
1,2-Diclorobenceno -- 95-50-1	mg/L	1	1	**	**	**
Hexaclorobutadieno -- 87-68-3	mg/L	0,0006	0,0006	**	**	**
Tetracloroetano -- 127-18-4	mg/L	0,04	0,04	**	**	**
Tetracloruro de Carbono -- 56-23-5	mg/L	0,002	0,002	**	**	**
Tricloroetano -- 79-01-6	mg/L	0,07	0,07	**	**	**
BEIX						

PARÁMETRO	UNIDAD	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Aguas superficiales destinadas para recreación	
		A1	A2	A3	B1	B2
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Contacto Primario	Contacto Secundario
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
Benceno – 71-43-2	mg/L	0,01	0,01	**	**	**
Etilbenceno – 100-41-4	mg/L	0,3	0,3	**	**	**
Tolueno – 108-88-3	mg/L	0,7	0,7	**	**	**
Xilenos – 1330-20-7	mg/L	0,5	0,5	**	**	**
Hidrocarburos Aromáticos						
Benzo(a)pireno – 50-32-8	mg/L	0,0007	0,0007	**	**	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,009	0,009	**	**	**
Triclorobenzenos (Totales)	mg/L	0,02	0,02	**	**	**
Plaguicidas						
Organofosforados:						
Malatión	mg/L	0,0001	0,0001	**	**	**
Metamidofós (restringido)	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Paraquat (restringido)	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Paratión	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Organoclorados (COP)*:						
Aldrín – 309-00-2	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Clordano	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
DDT	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Dieldrin – 60-57-1	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Endosulfán	mg/L	0,000056	0,000056	*	**	**
Endrin – 72-20-8	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Heptacloro – 76-44-3	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Heptacloro epóxido 1024-57-3	mg/L	0,00003	0,00003	*	**	**
Lindano	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Carbamatos:						
Aldicarb (restringido)	mg/L	Ausencia	Ausencia	Ausencia	**	**
Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)						
(PCBs)	mg/L	0,000001	0,000001	**	**	**
Otros						
Asbesto	Millones de fibras/L	7	**	**	**	**
MICROBIOLÓGICO						
Celiformes Termotolerantes (44,5 °C)	NMP/100 mL	0	2 000	20 000	200	1 000
Celiformes Totales (35 - 37 °C)	NMP/100 mL	50	3 000	50 000	1 000	4 000
Enterococos fecales	NMP/100 mL	0	0		200	**
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 mL	0	0		Ausencia	Ausencia
Formas parasitarias	Organismo/Litro	0	0		0	
<i>Giardia duodenalis</i>	Organismo/Litro	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
<i>Salmonella</i>	Presencia/100 mL	Ausencia	Ausencia	Ausencia	0	0
<i>Vibrio Cholerae</i>	Presencia/100 mL	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia

UNT Unidad Nefelométrica Turbiedad

NMP/ 100 mL Número más probable en 100 mL

* Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)

** Se entenderá que para esta subcategoría, el parámetro no es relevante, salvo casos específicos que la Autoridad competente determine.

CATEGORÍA 2: ACTIVIDADES MARINO COSTERAS

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUA DE MAR		
		Sub Categoría 1	Sub Categoría 2	Sub Categoría 3
		Extracción y Cultivo de Moluscos Bivalvos (C1)	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas (C2)	Otras Actividades (C3)
ORGANOLÉPTICOS				
Hidrocarburos de Petróleo		No Visible	No Visible	No Visible
FISICOQUÍMICOS				
Aceites y grasas	mg/L	1,0	1,0	2,0
DBO ₅	mg/L	**	10,0	10,0
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=4	>=3	>=2,5
pH	Unidad de pH	7 - 8,5	6,8 - 8,5	6,8 - 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	**	50,0	70,0
Sulfuro de Hidrógeno	mg/L	**	0,05	0,08
Temperatura	celcius	**delta 3 °C	**delta 3 °C	**delta 3 °C
INORGÁNICOS				
Arseniaco	mg/L	**	0,08	0,21
Arsénico total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cadmio total	mg/L	0,0093	0,0093	0,0093
Cobre total	mg/L	0,0031	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05
Fosfatos (P-PO4)	mg/L	**	0,03 - 0,09	0,1

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUA DE MAR		
		Sub Categoría 1	Sub Categoría 2	Sub Categoría 3
		Extracción y Cultivo de Moluscos Bivalvos (C1)	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas (C2)	Otras Actividades (C3)
Mercurio total	mg/L	0,00094	0,001	0,0001
Níquel total	mg/L	0,0082	0,1	0,1
Nitratos (N-NO3)	mg/L	**	0,07 - 0,28	0,3
Plomo total	mg/L	0,0081	0,0081	0,0081
Silicatos (Si-SiO3)	mg/L	**	0,14 - 0,70	**
Zinc total	mg/L	0,081	0,081	0,081
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos de petróleo totales (Inclusión aromática)	mg/L	0,007	0,007	0,01
MICROBIOLÓGICOS				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	* ≤14 (área aprobada)	≤30	1000
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	* ≤88 (área restringida)		

NMP/ 100 mL Número más probable en 100 mL

* Área Aprobada : Áreas de donde se extraen ó cultivan moluscos bivalvos seguros para el comercio directo y consumo, libres de contaminación fecal humana ó animal, de organismos patógenos ó cualquier sustancia deletérea ó venenosa y potencialmente poligraa.

** Área Restringida: Áreas acuáticas impactadas por un grado de contaminación donde se extraen moluscos bivalvos seguros para consumo humano luego de ser depurados

** Se entenderá que para este uso, el parámetro no es relevante, salvo casos específicos que la Autoridad competente lo determine

*** La temperatura corresponde al promedio mensual multiannual del área evaluada.

CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO Y TALLO ALTO		
PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
Fisicoquímicos		
Bicarbonatos	mg/L	370
Calcio	mg/L	200
Carbonatos	mg/L	5
Cloruros	mg/L	100-700
Conductividad	(uS/cm)	<2 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Fluoruros	mg/L	1
Fosfatos - P	mg/L	1
Nitratos (NO ₃ -N)	mg/L	10
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	0,06
Oxígeno Disuelto	mg/L	> =4
pH	Unidad de pH	6,5 - 8,5
Sodio	mg/L	200
Sulfatos	mg/L	300
Sulfuros	mg/L	0,05
Inorgánicos		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,05
Bario total	mg/L	0,7
Boro	mg/L	0,5-6
Cadmio	mg/L	0,005
Cianuro Wad	mg/L	0,1
Cobalto	mg/L	0,05
Cobre	mg/L	0,2
Cromo (6+)	mg/L	0,1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2,5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,2
Plata	mg/L	0,05
Plomo	mg/L	0,05
Selenio	mg/L	0,05
Zinc	mg/L	2
Orgánicos		
Aceites y Grasas	mg/L	1
Fenoles	mg/L	0,001
S.A.A.M. (detergentes)	mg/L	1
Plaguicidas		
Aldicarb	ug/L	1
Aldrin (CAS 309-00-2)	ug/L	0,004
Clordano (CAS 57-74-9)	ug/L	0,3
DDT	ug/L	0,001
Dieldrin (N° CAS 72-20-8)	ug/L	0,7
Endrin	ug/L	0,004

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO Y TALLO ALTO		
PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
Endosulfán	ug/L	0,02
Heptacloro (N° CAS 76-44-8) y heptacloripóxido	ug/L	0,1
Lindano	ug/L	4
Paratión	ug/L	7,5

CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES			
PARÁMETROS	Unidad	Vegetales Tallo Bajo	Vegetales Tallo Alto
		Valor	Valor
Biológicos			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	1 000	2 000(3)
Coliformes Totales	NMP/100mL	5 000	5 000(3)
Enterococos	NMP/100mL	20	100
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	100	100
Huevos de Helmintos	huevo/fruto	<1	<1(1)
<i>Salmonella</i> sp.		Ausente	Ausente
<i>Vibrio cholerae</i>		Ausente	Ausente
PARÁMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES			
PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR	
Físicoquímicos			
Conductividad Eléctrica	(uS/cm)	<=5000	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	<=15	
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40	
Fluoruro	mg/L	2	
Nitratos-(NO3-N)	mg/L	50	
Nitritos-(NO2-N)	mg/L	1	
Oxígeno Disuelto	mg/L	> b	
pH	Unidades de pH	6,5 – 8,4	
Sulfatos	mg/L	500	
Sulfuros	mg/L	0,05	
Inorgánicos			
Aluminio	mg/L	5	
Arsénico	mg/L	0,1	
Berilio	mg/L	0,1	
Boro	mg/L	5	
Cadmio	mg/L	0,01	
Cianuro WAD	mg/L	0,1	
Cobalto	mg/L	1	
Cobre	mg/L	0,5	
Cromo (6+)	mg/L	1	
Hierro	mg/L	1	
Litio	mg/L	2,5	
Magnesio	mg/L	150	
Manganeso	mg/L	0,2	
Mercurio	mg/L	0,001	
Niquel	mg/L	0,2	
Plata	mg/L	0,05	
Plomo	mg/L	0,05	
Selenio	mg/L	0,05	
Zinc	mg/L	24	
Orgánicos			
Aceites y Grasas	mg/L	1	
Fenoles	mg/L	0,001	
S.A.A.M. (detergentes)	mg/L	1	
Plaguicidas			
Aldicarb	ug/L	1	
Aldrin (CAS 309-00-2)	ug/L	0,03	
Clordano (CAS 57-74-9)	ug/L	0,3	
DDT	ug/L	1	
Dieldrin (N° CAS 72-20-8)	ug/L	0,7	
Endosulfán	ug/L	0,02	

Endrín	ug/L	0,004
Heptacloro (N° CAS 76-44-8) y heptacloropóxido	ug/L	0,1
Lindano	ug/L	4
Paratión	ug/L	7,5
Biológicos		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	1 000
Coliformes Totales	NMP/100mL	5 000
Enterococos	NMP/100mL	20
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	100
Huevos de Helminfos	huevos/litro	<1
<i>Salmonella</i> sp.		Ausente
<i>Vibrio cholerae</i>		Ausente

NOTA :

NMP/100: Número más probable en 100 mL

Vegetales de Tallo alto: Son plantas cultivables o no, de porte arbustivo o arbóreo y tienen una buena longitud de tallo. Las especies leñosas y forestales tienen un sistema radicular pivotante profundo (1 a 20 metros). Ejemplo: Forestales, árboles frutales, etc.

Vegetales de Tallo bajo: Son plantas cultivables o no, frecuentemente porte herbáceo, debido a su poca longitud de tallo alcanzan poca altura. Usualmente, las especies herbáceas de porte bajo tienen un sistema radicular difuso o fibroso, poco profundo (1 a 30 cm). Ejemplo: Hortalizas y verdura de tallo corto, como ajo, lechuga, fresas, col, repollo, apio y arveja, etc.

Animales mayores: Entiéndase como animales mayores a vacunos, ovinos, porcinos, camélidos y equinos, etc.

Animales menores: Entiéndase como animales menores a caprinos, cuyes, aves y conejos

SAAM: Sustancias activas de azul de metileno

CATEGORÍA 4: CONSERVACIÓN DEL AMBIENTE ACUÁTICO

PARÁMETROS	UNIDADES	LAGUNAS Y LAGOS	RÍOS		ECOSISTEMAS MARNO COSTEROS	
			COSTA Y SIERRA	SELVA	ESTUARIOS	MARNOS
FÍSICOS Y QUÍMICOS						
Aceites y grasas	mg/l	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	1	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/l	<5	<10	<10	15	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	<0,02	0,02	0,05	0,05	0,08
Temperatura	Celsius					delta 3 °C
Oxígeno Disuelto	mg/l	≥5	≥5	≥5	≥4	≥4
pH	unidad	6,5-8,5	6,5-8,5		6,8-8,5	6,8-8,5
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	500	500	500	500	
Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	≤25	≤25 - 100	≤25 - 400	≤25-100	30,00
INORGÁNICOS						
Arsénico	mg/l	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05
Bario	mg/l	0,7	0,7	1	1	—
Cadmio	mg/l	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005
Cianuro Libre	mg/l	0,022	0,022	0,022	0,022	—
Clorofila A	mg/l	10	—	—	—	—
Cobre	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
Cromo VI	mg/l	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Fenoles	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001	—
Fosfatos Total	mg/l	0,4	0,5	0,5	0,5	0,031 - 0,033
Hidrocarburos de Petróleo Aromáticos Totales	Ausente				Ausente	Ausente
Mercurio	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,0001
Nitratos (N-NO3)	mg/l	5	10	10	10	0,07 - 0,28
INORGÁNICOS						
Nitrógeno Total	mg/l	1,6	1,6		—	—
Níquel	mg/l	0,025	0,025	0,025	0,002	0,0082
Plomo	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,0081	0,0081
Silicatos	mg/l	—	—	—	—	0,14-0,7
Sulfuro de Hidrógeno (H2S indisoluble)	mg/l	0,002	0,002	0,002	0,002	0,06
Zinc	mg/l	0,03	0,03	0,3	0,03	0,081
MICROBIOLÓGICOS						
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100mL)	1 000	2 000		1 000	≤30
Coliformes Totales	(NMP/100mL)	2 000	3 000		2 000	

NOTA : Aquellos parámetros que no tienen valor asignado se debe reportar cuando se dispone de análisis

Dureza: Medir "dureza" del agua muestreada para contribuir en la interpretación de los datos (método estándar recomendada: APHA-AWWA-WPCF 2340C)

Nitrógeno total: Equivalente a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (Nitrógeno orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrilo (NO)

Amonio: Como NH3 no ionizado

NMP/100 mL: Número más probable de 100 mL

Ausente: No deben estar presentes a concentraciones que sean detectables por olor, que afecten a los organismos acuáticos comestibles, que puedan formar depósitos de sedimentos en las orillas o en el fondo, que puedan ser detectados como películas visibles en la superficie o que sean nocivos a los organismos acuáticos presentes.

1.1.2 Normas Internacionales

a) Uso en agricultura

En los años sesenta y setenta se establecieron directrices muy severas para el **uso agrícola** de aguas residuales en el riego de cultivos comidos crudos. Estas directrices correspondían casi a normas de calidad para aguas potables que tenían su origen en un enfoque de cero riesgo.

En los Estados Unidos de Norte América (California -Departamento de Salud Pública, 1968), estas directrices fueron establecidas para una concentración (indicadora) mínima bacteriana detectable por medio de un control de rutina (≤ 2.2 coliformes/100 ml) que servía para indicar que las aguas residuales estaban exentas de patógenos.

Unos años más tarde, un Comité de la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció directrices para métodos de tratamiento (OMS, 1973). Con respecto a los cultivos consumidos crudos, se estableció un nivel que se podía alcanzar prácticamente con la cloración después de un tratamiento convencional, a saber, 100 coliformes/100 ml. En los años ochenta, este nivel fue considerado demasiado restrictivo, utilizando un margen de seguridad más alto de lo necesario. Además, la cloración de aguas residuales y otros procesos de tratamiento avanzados no son viables en el marco de la mayor parte de los países en desarrollo.

La agricultura requiere mayor cantidad de agua que otros usos, como el doméstico o el industrial; sin embargo, para el uso de aguas residuales debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Esta es considerada la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reuso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones ⁽³⁶⁾.

La FAO publico en 1999 la guía sugerida para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.

Tabla 2. Guías sugeridas para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento

Tipos de reuso agrícola	Calidad del agua residual	Opción de tratamiento
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 DBO <10 mg·L ⁻¹ <2 UNT <14 NMP coli fecal/100 mL* <1 huevos/L (nematodos intestinales)	Secundario Filtración desinfección
Reuso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección
Reuso agrícola en cultivos que no se consumen	pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección

Fuente FAO,1999 modificada.

DBO, demanda bioquímica de oxígeno; SS, sólidos suspendidos; UNT, unidades nefelométricas de turbidez; RAS, relación absorción/sodio; NMP, número más probable,*Coliformes Fecales NMP/100mL. Media geométrica de más de 10 muestras por mes; ninguna muestra debe ser mayor de 200 NMP/100mL.

La Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA) clasifico el reuso en ocho categorías, de acuerdo con la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reuso indirecto potable (EPA, 2004 ⁽³⁶⁾).

Debido a que la escasez de agua dulce está aumentando en ciertas regiones áridas del mundo, considerar el agua reciclada para satisfacer esta demanda de agua e incentivar su uso, es una propuesta de la Organización Mundial de la Salud y uno de estos usos corresponde al de aguas servidas tratadas en la agricultura.

Después de más de una década de la publicación de las guías de efluentes en riego, orientado principalmente a reducir riesgos en salud pública asociados a esta

práctica, la OMS solicitó a un Comité de Científicos la revisión y actualización de esta guía microbiológica para reuso ⁽²⁸⁾.

En la Tabla 3 se presentan las guías microbiológicas propuestas por el estudio de Blumenthal ⁽⁷⁾, para las guías OMS 1989 sobre uso de efluentes de aguas servidas en agricultura.

Este estudio de revisión de las directrices de la OMS relacionadas a la actividad microbiológica de las aguas residuales tratadas para uso en agricultura concluye lo siguiente:

- Para riego sin restricción hay evidencias que avalan la validez de la guía de coliformes fecales actual de 1000 UFC/100 mL, por lo tanto no se aprecian evidencias que sugieran la necesidad de modificarla.
- Hay evidencias epidemiológicas que demuestran que la guía de 1 huevo de nematodo por L no es adecuada en condiciones que favorecen la supervivencia de los huevos (bajas temperaturas medias, riego superficial), por lo que es necesario revisar la disminución propuesta a 0,1 Huevo por L.

Tabla 3. Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura^a

Categoría	Condiciones de reutilización	Grupo expuesto ^b	Nematodos intestinales	Coliformes fecales
			(promedio aritmético de huevos/L) ^c	(promedio geométrico/100 mL)
A	Irrigación de cultivos probablemente consumidos crudos. Campos deportivos, parques públicos.	Agricultores, consumidores, público	≤0,1 ^d	≤10 ³
B	Irrigación de cereales. Cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles ^e .	Agricultores, pero no niños <15 años, y comunidades cercanas	≤1 Riego por aspersión	≤10 ⁵
		Agricultores, pero no niños <15 años y comunidades cercanas	≤1 Riego por surco	≤10 ³
		Agricultores, incluyendo niños <15 años, y comunidades cercanas	≤0,1 Cualquier tipo de riego	≤10 ³
C	Irrigación localizada de cultivos en la categoría B, si no están expuestos los trabajadores y el público.	Ninguno	No aplicable	No aplicable

Fuente: Adaptado de Blumenthal et al, 2000

^a En casos específicos, los factores locales epidemiológicos, socioculturales y ambientales deben ser tomados en cuenta, y las directrices modificadas conformemente.

^b Áscaris, trichuros y anquilostomas.

^c Durante el periodo de riego.

^d Una directriz más rigurosa (≤200 coliformes fecales por 100mL) es apropiado para céspedes públicos, tales como céspedes de hoteles, con los que el público entra en contacto directo. ^e En el caso de árboles frutales, se debe suspender el riego dos semanas antes de la recolección de frutas y no se deben recoger del suelo. También se debe evitar el riego por aspersión; el mismo periodo aplica para alimentación de animales con forraje regado con aguas residuales.

- Para riego restricto hay evidencias que afirman la necesidad de incluir los coliformes fecales, para proteger los trabajadores agrícolas, sus niños y la población cercana de infecciones entéricas virales y bacterianas. La guía apropiada dependerá del método de riego aplicado y de quienes están expuestos. Por ej., si los expuestos son trabajadores agrícolas adultos y se riega por aspersión, la guía de ≤10⁵ CF por 100 ml es necesaria. Una guía más reducida de ≤10³ por 100 mL ofrece garantías cuando los trabajadores son adultos y hay menores de 15 años expuestos (por trabajo y juego), y el riego es por inundación

o por surco. La guía de \leq de 1 huevo de nematodo se considera adecuada siempre que no hayan niños expuestos; en ese caso se recomienda disminuir la guía a $\leq 0,1$ huevo por L.

- El riesgo de exposición de la población depende del método de riego usado. El riego a la salud es mayor cuando los cultivos se riegan por aspersión. Y el riesgo a los trabajadores es mayor cuando el riego se realiza por inundación o surcos. La guía propuesta toma en cuenta este riesgo.

Los criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura dependen del tipo de cultivo: cuando el reuso agrícola se realiza en cultivos que se consumen crudos y no se procesan comercialmente, como es el caso de las hortalizas frescas, el riego es *restringido*; cuando se aplica en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente, como es el caso del tomate enlatado, y en cultivos que no se consumen por el hombre, como pastos, el riego es *no restringido* ^(7,8).

El 2006, la OMS publicó nuevas guías de uso de aguas residuales, excretas y aguas grises ⁽³⁴⁾, que son una herramienta de manejo preventivo de aguas residuales en agricultura para maximizar la seguridad para la salud pública; esta modificación de las citadas guías se basó en la combinación de la evidencia de riesgos en la salud ocasionados por el uso de las aguas servidas, avalada por estudios epidemiológicos, y estudios de la transmisión de patógenos seleccionados de acuerdo al modelo QMRA (Quantitative microbial risk assessment), aplicado para infecciones virales derivadas del reuso de aguas servidas aplicado por Asano, (1992) en California. Estos estudios permiten medir la exposición real que ocurre dentro del tiempo y no dependen de una dosis media estimada diaria, ni del análisis dosis-respuesta basado en experiencias con voluntarios sanos desde donde se extrapolan los datos que proporcionan estimados de efectos en dosis bajas.

La guía incluye el análisis microbiano, esencial para el análisis del riesgo, que comprende la recolección de información relativa a patógenos presentes en aguas

residuales, campos y cosechas regados. Estos factores varían según la región, clima, estación, etc. y deben ser medidos siempre que sea posible, sobre un sitio específico. La guía no da valores sugeridos para patógenos virales, bacteriales o protozoarios, únicamente valores para huevos de helmintos ($\leq 1/L$) tanto para riego con como sin restricción; para el riego por goteo en cultivos de alto crecimiento, no da recomendación alguna.

A través de un análisis cuantitativo del riesgo microbiano se puede lograr la remoción de patógenos requerida para no superar el riesgo aceptable por infección. Adicionalmente, se incluyen las medidas de control para la protección de la salud:

Tabla 4. Medidas de control de protección a la salud

Medida de control	Remoción de patógenos (unidades log)	Comentarios
Tratamiento	1-6	La remoción de patógenos requerida depende de la combinación selectiva de medidas de control para la protección de la salud.
Riego por goteo en cultivos de bajo crecimiento	2	Tubérculos y hortalizas, como lechuga, que crecen justo sobre el suelo con contacto parcial.
Riego por goteo en cultivos de alto crecimiento	4	Cultivos en los que las partes a cosechar no están en contacto con el suelo, como tomates.
Inactivación de patógenos por decaimiento	0,5-2 por día	Es la reducción del número de patógenos por decaimiento que ocurre entre el último riego y el consumo final. La meta en la remoción de unidades log depende de condiciones climáticas (temperatura, intensidad solar), tipo de cultivo, etc.
Lavado con agua	1	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con agua limpia.
Desinfección	2	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con una solución diluida de desinfectante y enjuague con agua limpia.
Pelado	2	Frutas y tubérculos.

Fuente: WHO, 2006

La Tabla 5 muestra los principales cultivos en los que se aplica el reuso de aguas residuales domésticas en América Latina (Cepis, 2003). En esta tabla se observa que el mayor porcentaje (83,1%) de las aguas residuales es usado principalmente en tres tipos de cultivos: hortalizas (30,2%), industriales (29,5%) y forrajes (23,4%).

Tabla 5. Principales cultivos empleados para reuso de aguas residuales domésticas*.

Cultivos regados con agua residual	Área (ha)	Caudal (L·s ⁻¹)
Forestales	97	99
Frutales	46,772	40
Industriales	391,418	1,473
Forrajes	6,943	1,172
Hortalizas	48,691	1,511
Otros	806	696
Total	494,727	4991

*Países incluidos: Argentina, Colombia, México, Nicaragua, Perú y República Dominicana.
Fuente: Adaptada de Cepis, 2003.

Esta situación es preocupante, pues mientras los cultivos industriales se someten previamente a un proceso de transformación, el forraje lo consumen directamente los animales y las hortalizas, los seres humanos, lo que eleva el riesgo de contaminación microbiológica o parasitológica y, por lo tanto, la generación de problemas de salud pública significativos. La misma situación ocurre para los cultivos de frutales, cuya área regada también representa un elevado porcentaje.

b) Uso en Acuicultura

Peces criados en aguas residuales o viveros fertilizados con excretas pueden contaminarse con bacterias y virus que son transportados de manera pasiva en las escamas, en los bronquios, en el fluido intraperitoneal, el tubo digestivo o en el músculo del pez. Una revisión de la literatura acerca de la supervivencia de los patógenos en el pez (Strauss, 1985) reveló que:

- a) Una invasión del músculo del pez es probable si éste es criado en viveros conteniendo concentraciones de coliformes fecales y Salmonella mayores a 10^4

y 10^5 por 100 ml respectivamente. El potencial de invasión muscular aumenta con el período de exposición del pez a aguas contaminadas.

- b) Hay evidencia de poca acumulación de organismos entéricos y patógenos sobre la carne de peces comestibles o de penetración en la misma si la concentración de coliformes fecales en las aguas de viveros es inferior a 10^3 por 100 ml.
- c) Se detectaron concentraciones de patógenos en el tubo digestivo y en el fluido intraperitoneal de los peces, incluso a niveles de contaminación más bajos.

Un número de infecciones helmínticas, distomas (trematodos) en particular, son también de interés con respecto al uso de materias fecales en la acuicultura. Esquistosomiasis es la infección de trematodos más generalizada. En América Latina, es endémica principalmente en Brasil. La transmisión de esquistosomiasis es probable si las personas caminan en viveros conteniendo caracoles infectados, y la larva de esquistosoma penetra en la piel humana.

Los datos experimentales y de campo sobre los efectos para la salud del uso en acuicultura de materias fecales y aguas residuales son, en general, limitados. Se requieren, por lo tanto, investigaciones adicionales antes de poder establecer una norma definitiva de calidad bacteriana para la piscicultura. La OMS considerando estos factores, recomendó una directriz bacteriana tentativa equivalente a un número geométrico promedio de $\leq 10^3$ coliformes fecales por 100 ml para las aguas de viveros (OMS, 1989). En viveros fertilizados con aguas residuales, el alcance de esta concentración indicadora bacteriana ambiental es generalmente posible si las aguas residuales son tratadas a un nivel de 10^3 - 10^4 coliformes fecales por 100 ml, con tal que las aguas residuales entrantes se diluyen con las del vivero.

Si el pescado es consumido crudo o medio crudo, la transmisión directa de infecciones bacterianas o virales es probable. Con la directriz bacteriana arriba mencionada, se evitará una invasión del músculo del pez. No obstante, los

patógenos pueden acumularse en el tubo digestivo y el fluido intraperitoneal del pez, resultando en un riesgo para el consumidor por medio de una contaminación transversal de la carne del pez u otras partes comestibles si las normas de higiene en la preparación del pescado son inadecuadas.

Una medida complementaria necesaria de protección de la salud es, por consiguiente, asegurar el mantenimiento de altas normas de higiene al preparar y, especialmente, al destripar el pescado. Cocer el pescado, una costumbre en muchas zonas donde se practica la irrigación de viveros con desechos, es una medida de protección importante.

2. MARCO TEORICO

2.1 Filtros Lentos de Arena para el tratamiento de Aguas Residuales

Los Filtros de Arena (FLA) son en su mayoría unidades de tratamiento de aguas residuales, con procesos biológicos y físicos (sin embargo el mismo proceso químico se produce como la adsorción), a través del cual las aguas residuales se filtran y se pulen.

El FLA es un proceso de filtración relativamente simple, no requiere de la adición de productos químicos para su operación. La eliminación de partículas es realizada a través de procesos biológicos cuya actividad se realiza en la capa biológica que se encuentra principalmente en la superficie superior del filtro; sin embargo investigaciones recientes reportan que el proceso biológico se realiza en toda la profundidad del lecho del filtro.

Este sistema es barato y técnicamente simple para el aprovechamiento del efluente en regadío; por lo que la aplicación de esta técnica como sistema alternativo de depuración, constituye un mecanismo eficaz de regulación de los recursos hídricos en zonas altamente deficitarias e incluso, en determinados casos, como sistema para crear barreras hidráulicas y combatir la intrusión marina (Mantecón *et al*, 1991). Estos métodos se han puesto de actualidad con la aparición y divulgación del concepto *vertido de contaminación cero* o *vertido cero*.

Los FLA son una de las tecnologías más antiguas para la depuración de aguas residuales que se conoce.

La reutilización de aguas negras no es una invención reciente. Hay indicadores que las aguas negras fueron usadas para la irrigación en Grecia antigua y en la civilización de Minan (3000 - 1000 AC) ^(3,4).

Cuando se emplean de forma adecuada consiguen llegar a niveles de depuración muy elevados. Consisten en lechos de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema de afino de aguas tratadas previamente mediante otros sistemas como puede ser un tanque séptico u otro sistema similar.

El mantenimiento de estos dispositivos, que se colmatan con cierta facilidad, depende mucho de la eficacia del sistema de tratamiento previo.

Los filtros lentos de arena consisten básicamente en tres secciones: sistema de drenaje, capa de grava y lecho filtrante, de los cuales sólo el lecho filtrante juega un rol directo en el proceso de purificación.

Los parámetros claves del FLA son la profundidad del lecho de arena y el tamaño efectivo de la arena ^(28,40). Los pocos estudios de FLA en aguas residuales reportados en la literatura muestran una eliminación total de 60-80% de sólidos suspendidos, y una remoción de más de una orden de la bacteria *E. coli*, con capa superior de arena gruesa (tamaño de grano de aproximadamente 0,6 mm), mientras que la arena de tamaño fino (aproximadamente 0,3 mm) mejora la filtración sólo un poco, causando carreras cortas de filtración ^(1, 10, 14,15).

Los filtros de arena se utilizan como tratamiento complementario de los efluentes de tanques sépticos u otros sistemas de tratamiento de tratamiento secundario, habiendo reportado niveles considerables de eficiencia en la remoción de DBO y bacterias coliformes ^(13,15).

2.2 Componentes ⁽³⁵⁾

El Filtro Lento de Arena se puede dividir en los siguientes elementos básicos:

2.2.1 Caja del Filtro

La caja del filtro es usualmente de forma rectangular o cilíndrica con paredes verticales por encima de 3m de alto, hecha en concreto reforzado o de acero y su piso tiene concreto. Debe ser hermético para evitar la pérdida de agua de la caja del filtro.

2.2.2 Depósito de agua

El agua por encima del lecho de arena, con una profundidad común de 1-1.5m, proporciona la pérdida de carga suficiente para obtener la tasa de filtración deseada por un período apreciable de la carrera de filtración.

Aunque varios materiales han sido empleados como medio filtrante en el filtro lento de arena, la arena es de lejos el más común. La arena utilizada se caracteriza por su Tamaño Efectivo (TE), que se define como el diámetro por el cual el 10% de la arena es más fina en peso, y su Coeficiente de Uniformidad (CU), que se define como la relación de d_{60} y d_{10} .

El rango típico de TE es de 0,15mm-0,35mm mientras que el CU se sugiere que sea menor a 3,0, preferiblemente menor que 2,0.

La profundidad necesaria del filtro para un apropiado proceso de purificación es de 60cm a 70cm por lo que la profundidad de uso común del lecho filtrante inicial es de 1 a 1,2 m para permitir un buen número de limpiezas de los filtros.

2.2.3 La Grava

La capa de soporte de grava se coloca debajo de la capa de arena. Consiste en una serie de capas graduadas con mayor tamaño en la parte inferior y el más pequeño en la parte superior. Esta capa de soporte de grava cumple una doble

función, la de impedir la entrada de arena en la drenajes y la de garantizar de la abstracción uniforme del agua filtrada. La profundidad total de todas las capas por lo general está entre 20-50cm.

2.2.4 Sistema de Drenaje

Se coloca en la parte inferior del filtro. Su función principal es recoger y dirigir el agua filtrada a la salida del filtro. Puede adoptar diferentes formas, tales como tubos perforados, ladrillos de juntas abiertas y tubos porosos no esmaltados.

2.2.5 Vertedero de agua y depósito de agua clara

Estas constituyen las estructuras auxiliares que facilitan el funcionamiento de un sistema de filtración. Los sistemas de desagüe inferior dirigen el agua a la cámara de vertedero. La altura del vertedero se ubica por encima del nivel máximo superficie de la arena, para evitar el desarrollo de presiones negativas en el lecho de arena. La cámara de vertedero está abierta en la parte superior para permitir el contacto con la atmósfera. Como el agua fluye sobre el vertedero, se da oportunidad de restaurar cualquier reducción de oxígeno que ocurra durante la operación del filtro. El depósito de agua limpia es un reservorio de almacenamiento para el agua filtrada.

2.2.6 Válvulas de control

El sistema de control de válvulas regula la velocidad del flujo a través del lecho filtrante, a fin de que el nivel del afluente se encuentre por debajo de un mínimo predeterminado durante la operación y se ajuste el nivel en el filtro cuando se vuelva a poner en operación después de la limpieza.

2.3 Mecanismos de la Filtración ^(9,17)

La filtración biológica se logra haciendo pasar el agua cruda a través del lecho filtrante. Durante el paso de las partículas de impurezas se ponen en contacto con la

superficie de los granos de arena. Esta es materia inerte que es retenida hasta que eventualmente es removida durante los procesos de limpieza, mientras que aquellos que son susceptibles de degradación química o biológica se convierten en formas más simples que permanecen en la solución, con el material inerte, para su posterior eliminación.

Una serie de complejas fuerzas contribuyen a cada una de estas etapas, que, por conveniencia, se hará referencia a los mecanismos de transporte, el apego y la purificación, respectivamente. Cabe destacar que, aunque estas fuerzas se describen por separado la división entre ellos en condiciones reales de trabajo no es en absoluto clara. De hecho, todavía hay una necesidad de investigación considerable antes de la interacción de todos estos procesos se entiende completamente

2.3.1 Mecanismos de Transporte

Los principales procesos por los cuales las partículas se ponen en contacto con los granos de arena son:

Cernido: este es el proceso más evidente para la intercepción y retención de partículas demasiado grandes para pasar a través de los intersticios entre los granos de arena. Esto ocurre casi completamente en la superficie del filtro y es independiente de la tasa de filtración.

Como se ve en la Figura 1 los poros apretados del lecho filtrante de granos de arena esféricos de tamaño uniforme son lo suficientemente pequeñas para impedir el paso de las partículas de una séptima parte del diámetro de los granos de arena. Por tanto, con un tamaño de grano de 150um, los poros más pequeños son un poco más de 20um de diámetro y no son capaces de interceptar las partículas coloidales (diámetro de 1um o menos) o bacterias (longitud hasta 15um).

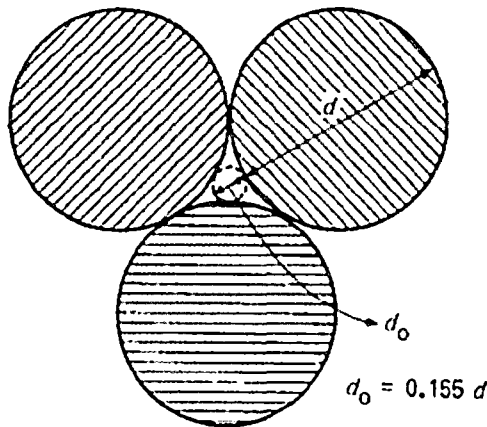


Figura 1. Relación entre el tamaño y poro de la arena

En el movimiento de torsión del flujo a través del lecho de arena, las pequeñas partículas en el agua se ponen en contacto con él y alguna otra agregación se lleva a cabo. Cuando las partículas aglomeradas son lo suficientemente grandes para ser retenidas por el mecanismo de cernido, éstas se depositarán.

Como la capa biológica del filtro, las formas con la maduración del filtro, contribuyen a la eficiencia del lecho filtrante que es aún mayor en el tiempo por los depósitos de los granos de arena que gradualmente estrechan las aberturas de los poros. El efecto total es una mejora en la eficacia del rendimiento del filtro, con la duración del uso, pero esta eficacia se acompaña de un aumento de la resistencia al paso del agua hacia abajo que indica la necesidad de limpieza del lecho filtrante.

Sedimentación: La acción de sedimentación ocurre dentro de los poros, por lo que las partículas suspendidas se precipita sobre los granos, siendo comparable a un tanque de sedimentación convencional donde el sedimento se forma solo en la parte inferior, mientras que en un filtro el área superficial total que envuelve a todos los granos de arena es teóricamente utilizable.

La eficiencia de la sedimentación es una función de la relación entre la superficie de carga y velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas. Cuando este último es igual o mayor que la anterior, puede esperarse una remoción completa.

La materia en suspensión de origen orgánico tiene una densidad sólo ligeramente mayor que la del agua, y la proporción de la densidad de la materia en suspensión A /densidad del agua es generalmente menor que 0,01.

Fuerzas de inercia y centrífuga: En la Figura 2 se observa como las fuerzas de inercia y centrífuga actúan sobre las partículas con un peso específico superior a la del agua circundante, haciendo que se salgan de las líneas de flujo y entren en contacto con los granos de arena.

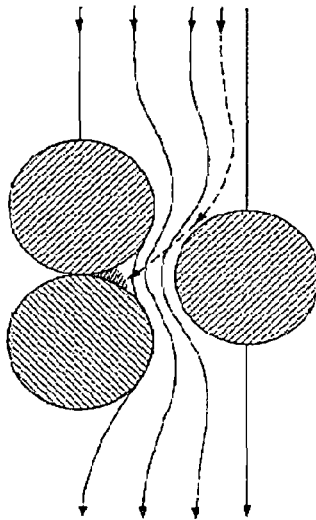


Figura 2. Transporte en el agua de la partícula discreta

Difusión (Movimiento Browniano): La difusión, eleva las partículas suspendidas que están en contacto con la superficie que las contienen, su acción a lo largo de toda la profundidad del filtro es independiente a la tasa de filtración, incluso cuando el agua no está fluyendo, aunque sus efectos son menores en comparación con los descritos anteriormente.

Atracción de masas (Fuerzas Van der Waals): Esta fuerza opera universalmente y contribuye tanto al mecanismo de transporte como al de adhesión.

La fuerza de Van der Waals, sin embargo, complementa las fuerzas de inercia y centrifuga cuando éstos han traído partículas en proximidad muy cercana a la superficie del grano.

Fuerzas de atracción electrostática y electrocinética (fuerzas de Coulomb): El efecto principal de estas fuerzas es mantener las partículas retenidas en contacto con los granos de arena, y a su vez contribuyen al mecanismo de transporte total antes que se efectúe el contacto.

2.3.2 Mecanismos de adherencia

Las mayores fuerzas que mantienen a las partículas en un lugar luego que han hecho contacto con las superficies de los granos de arena son:

Atracción electrostática: Así como la fuerza de Van der Waals, la fuerza por atracción electrostática puede complementar otros mecanismos de transporte cuando estos han traído alguna partícula en las inmediaciones de un grano de arena que tiene una carga eléctrica opuesta. Un grano de arena que tiene una carga similar, por supuesto, rechazará la partícula, la cual seguirá su curso hasta que encuentra un grano de carga opuesta.

Debido a la naturaleza de su estructura limpia la arena de cuarzo cristalino tiene una carga negativa y por lo tanto es capaz de atraer las partículas con carga positiva de la materia coloidal (por ejemplo en forma de cristales de carbonatos, y flóculos de hierro y de hidróxido de aluminio), así como los cationes de hierro, manganeso, aluminio y otros metales. Partículas coloidales de origen orgánico, incluyendo bacterias, por lo general tienen una carga negativa y por consiguiente son repelidos, esta es una de las razones por las cuales las impurezas no se eliminan en la

primera puesta en marcha de un filtro con arena limpia. Sin embargo, durante el proceso inicial de maduración las partículas cargadas positivamente se pueden acumular en algunos de los granos del filtro hasta el punto de sobresaturación en que se produce un cambio de la carga, lo que hace que el grano y sus partículas se fijan de carga positiva.

La adsorción en los granos le permite eliminar las impurezas con carga negativa, incluyendo la materia coloidal de origen animal o vegetal y aniones tales como el nitrato y el fosfato de los radicales, hasta que la sobresaturación de nuevo conduce a revertir la carga. Esta continua reversión de la carga, una vez iniciado, continúa durante toda la vida del lecho filtrante. Un factor que contribuye a este fenómeno es el arrastre de distancia por corrientes de agua de los iones adsorbidos débilmente de la red cristalina de la arena:

Fuerzas de Van der Waals: La atracción de masas tiene un efecto muy pequeño en la red de las partículas contenidas en el agua, es más efectivo que se mantenga una vez que las superficies entraron en contacto, ya que la distancia entre los centros de las masas es mucho más pequeña.

Adhesión: Durante el período de maduración, las partículas de origen orgánico son retenidas o se depositan en la superficie del filtro y los granos individuales en la parte superior del lecho filtrante. Estos depósitos se convierten rápidamente en el caldo de cultivo de bacterias y otros microorganismos que producen un material viscoso conocido como zooglea, que consiste en bacterias activas, sus desechos y células muertas, y en parte materiales orgánicos asimilados. La zooglea forma una película gelatinosa pegajosa sobre la superficie de los granos y arena, la capa biológica, a la que las partículas del agua cruda tienden a adherirse cuando se ponen en contacto por uno de los mecanismos de transporte. Las partículas que consisten de materia orgánica, se asimilarán a convertirse en parte a su debido tiempo de la película zoogleal, mientras que la materia inerte se mantiene hasta que finalmente es eliminada a través de la limpieza del filtro de arena.

2.3.3 Mecanismo de remoción de Bacterias Coliformes

Los Coliformes son considerados como organismos indicadores de contaminación bacteriana; por ser habitantes normales del sistema digestivo de animales de sangre caliente. Los coliformes son abundantes, por lo tanto, no es difícil de detectarlos, además de vivir por más tiempo que la mayoría de los agentes patógenos conocidos. Estas razones dan lugar a que se consideren a las bacterias coliformes como el indicador universal de la contaminación de aguas residuales.

Como se indicó anteriormente, la remoción total de partículas a través del FLA se debe al efecto conjunto del mecanismo de adherencia y el mecanismo biológico; el cual se produce por la contribución de especies filamentosas de algas, zooglea, en la formación de una capa biológica activa en la superficie del lecho filtrante, la cual es el medio para la captura y proliferación del plancton, diatomeas, protozoos, rotíferos, y las bacterias.

Al iniciarse el proceso en el FLA, el agua ingresa por encima del lecho filtrante y los organismos entran en contacto con las aguas residuales.

El aire presente entre los poros del lecho filtrante proporciona la transferencia de oxígeno a los microorganismos adheridos a su superficie, estos organismos aeróbicos dominan la actividad biológica y a medida que el efluente pasa lentamente a través del FLA, digieren los contaminantes presentes en las aguas residuales, Figura 3.

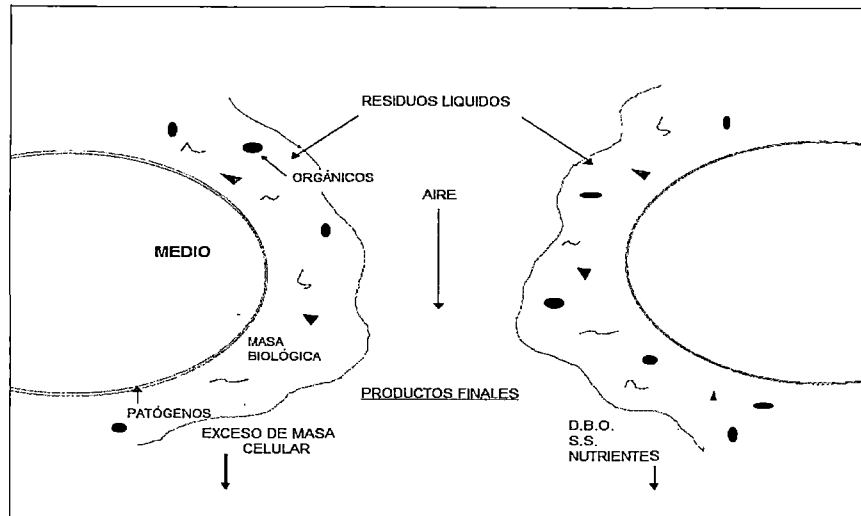


Figura 3. Flujo de la película y los efectos del tratamiento sobre las partículas del medio filtrante

Las bacterias, entre ellas las Coliformes termotolerantes se adhieren y son transportados por los granos de arena a través de los mecanismos de transporte y de adherencia.

Las condiciones dentro del lecho filtrante no son adecuadas para la multiplicación de las Coliformes termotolerantes; debido a que no sobreviven a temperaturas menores a 30°C y el contenido de materia orgánica de origen animal para satisfacer sus necesidades nutricionales es insuficiente, por lo que poco a poco empiezan a morir y pasan a ser comida para los protozoos y otros organismos mayores.

Muchos tipos de organismos predadores, tales como protozoos y metazoos menores, abundan en la capa superior del lecho filtrante, mientras que en las capas inferiores a partir de 0,30 a 0,50 m de profundidad, la actividad de las bacterias, como las Coliformes termotolerantes, disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración) debido a que el alimento adecuado es escaso, especialmente a altas temperaturas al aumentar su tasa metabólica; en cambio se producen reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación

microbiológica (como aminoácidos) en amoníaco y a los nitritos en nitratos (nitrificación).

Las algas, de acuerdo a algunos autores, producen sustancias nocivas para las bacterias, lo que reduce sus posibilidades de supervivencia.

Finalmente, en el efluente del Filtro Lento de Arena se descarga la materia orgánica degradada en dióxido de carbono y compuestos inorgánicos como nitritos, sulfatos y fosfatos (proceso de mineralización) y un número reducido de Coliformes termotolerantes y otros patógenos.

2.4 Diseño de los Filtros ⁽¹³⁾

Los Filtros de Arena son de diseño sencillo y relativamente pasivos para funcionar porque el proceso de la película fija es muy estable y utiliza pocos componentes mecánicos. Hay dos tipos de diseños de filtros que son comunes, el de "paso simple" y el de "recirculación".

Ambos tienen mecanismos de tratamiento y rendimiento similares, pero que funcionan de manera diferente. El de "paso simple" históricamente llamado "filtro intermitente", descarga el efluente tratado del tanque séptico después de un paso a través del medio filtrante.

El filtro de recirculación, recolecta y recircula el efluente tratado, descargándolo varias veces a través del medio filtrante. Cada uno tiene sus ventajas para diferentes aplicaciones.

2.4.1 Filtro de un solo paso

Los componentes básicos de los filtros de una sola pasada incluyen un tanque de dosis, la bomba y controles (o sifón), red de distribución, y el lecho filtrante con un sistema de desagüe inferior.

Las aguas residuales se dosifican de forma intermitente desde el tanque séptico, sobre el filtro a través de una línea de distribución. El agua residual se filtra a través del medio filtrante, pasa al drenaje del subsuelo y se descarga.

Para crear los tiempos de retención necesarios de los desagües para conseguir los resultados deseados del tratamiento, los filtros de un solo paso deben utilizar un medio fino que suele utilizar los filtros de recirculación.

El tamaño del medio fino marca los tiempos largos de residencia y gran contacto entre las aguas residuales y la superficie del medio y su adherencia de los sedimentos orgánicos. La DBO removida es mayor al 90% con una casi completa eliminación del amoníaco presente ^(13,16). Los filtros de un solo paso típicamente consiguen gran remoción de coliformes fecales que los filtros de recirculación debido al medio fino y menor carga hidráulica. La carga hidráulica diaria generalmente es limitada de 1 a 2 gpd/ft², según el tamaño de la arena, carga hidráulica y, especialmente, el número de dosis por día ⁽⁹⁾.

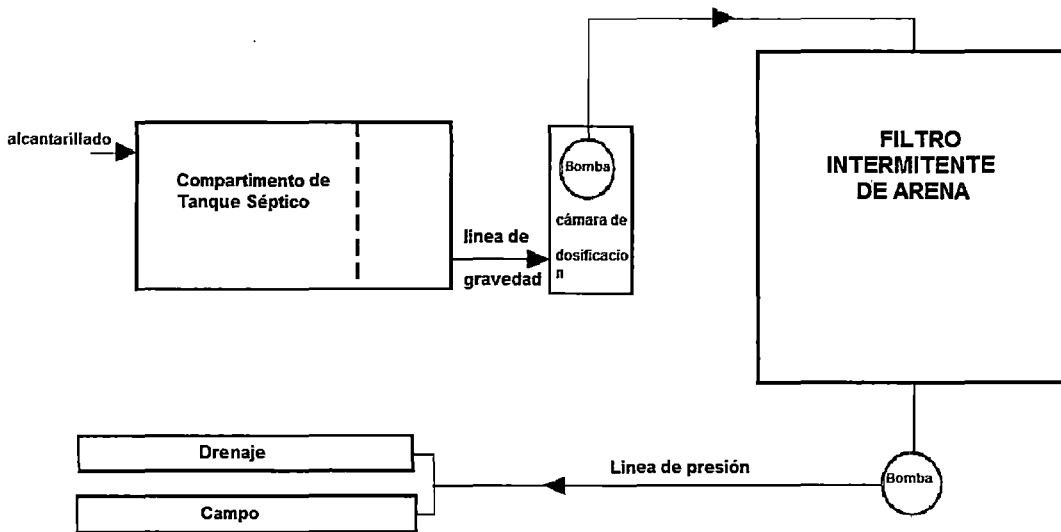


Figura 4. Filtro de arena intermitente (un solo paso)

2.4.2 Filtro de Recirculación

Los componentes básicos de los filtros de recirculación son un tanque de recirculación de la dosis, bomba y los controles, una línea de distribución, un lecho filtrante con un sistema de desagüe inferior, y una línea de retorno equipado con un

dispositivo de separación de flujo para devolver una porción del filtrado al tanque de recirculación de la dosis. El agua residual es dosificada sobre la superficie del filtro en un ciclo de tiempo de 1 a 3 veces por hora. La mezcla del filtrado retorna con efluente fresco del tanque séptico antes de retornar al filtro.

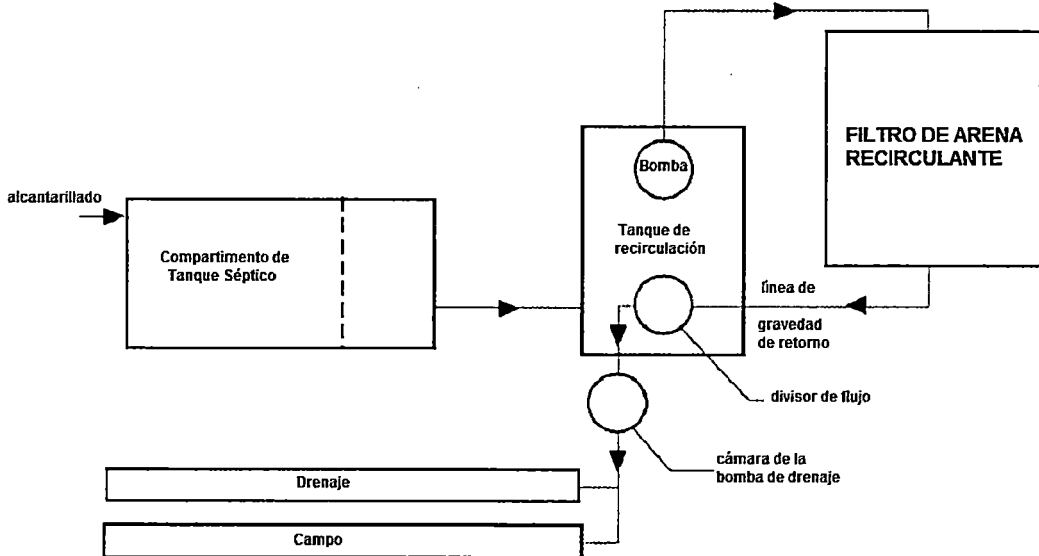


Figura 5. Filtro de arena recirculante

2.5 Aplicaciones

Los filtros de arena se pueden utilizar para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo viviendas unifamiliares, grandes establecimientos comerciales y pequeñas comunidades.

Con frecuencia se utiliza para tratamiento previo de las aguas residuales antes de la infiltración al subsuelo, en sitios donde el suelo tiene una escasa profundidad insaturada por encima del agua del subsuelo o lecho de roca para lograr un tratamiento adecuado. También se utilizan para cumplir con requisitos de calidad del agua antes de su vertido directo a una fuente superficial. Se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas, pero se han utilizado con éxito

en el pretratamiento para el tratamiento de aguas residuales con alta cantidad de material orgánico tales como los de restaurantes y supermercados.

Los filtros de un solo paso son frecuentemente utilizados para aplicaciones más pequeñas y donde la eliminación de nitrógeno no es necesaria.

Los Filtros de recirculación se utilizan tanto para flujos grandes como para pequeños y con frecuencia cuando es necesaria la eliminación de nitrógeno. Se puede lograr eliminación de nitrógeno de hasta 70 a 80 por ciento cuando se utiliza un reactor anóxico por delante del tanque de recirculación, donde el filtrado nitrificado que retorna puede mezclarse con el efluente rico en carbono del tanque séptico ^(2, 3, 24).

2.6 Rendimiento

Los filtros de arena de recirculación generalmente coinciden o superan a los filtros de un solo paso en la eliminación de DBO, SST, y nitrógeno. Las concentraciones típicas de efluentes de tratamiento de aguas residuales domésticas contienen menos de 10 mg/L para DBO y SST, y la eliminación de nitrógeno es aproximadamente el 50 por ciento. Los Filtros de arena de un solo paso pueden normalmente producir un efluente de menos de 10 mg/L para DBO y SST. El efluente es casi completamente nitrificado, pero cierta variabilidad se puede esperar en la capacidad de eliminación de nitrógeno. Pell y Nyberg (1989) encontraron que la remoción típica de nitrógeno es de 18 a 33% con un filtro de arena de un solo paso.

La remoción de coliformes fecales es algo mejor en filtros intermitentes. En ambos tipos de filtros el rango de remoción es de 2 a 4 logs. En los filtros de arena intermitentes la remoción de coliformes fecales es una función de la carga hidráulica; la remoción disminuye a medida que aumenta la carga hidráulica por encima de 1 gpm/ft² ⁽¹³⁾.

Los sólidos suspendidos del efluente del filtro lento son típicamente bajos. El medio retiene los sólidos. La mayoría de los sólidos orgánicos son finalmente digeridos. Los Filtros de Grava, en cambio, no retienen los sólidos así.

Se produce una acumulación excesiva de sólidos debido a la falta de bombeos periódicos de lodos para su eliminación. En tales casos, la capacidad de almacenamiento de los sólidos en el compartimiento puede ser excedido, lo que genera la descarga de los sólidos en el efluente.

2.7 Ventajas y limitaciones de los filtros de arena

Ventajas

1. Puede requerir menos espacio que otras buenas prácticas de tratamiento de control y puede ser localizado bajo tierra.
2. No requiere un flujo de base continua.
3. Conveniente para los desarrollos individuales y de áreas tributarias pequeñas de hasta 100 hectáreas.
4. No requiere de vegetación.
5. Útil en las cuencas donde las condiciones de calidad del agua subterránea o en el sitio impiden el uso de infiltración.
6. Alta capacidad de remoción de contaminantes.
7. Puede ser utilizado en ambientes altamente urbanizados.
8. Puede ser diseñado para una variedad de suelos.
9. Ideal para las regiones del acuífero.

Limitaciones

1. Área disponible es un factor limitante.
2. Pérdida de carga disponible para cumplir con los criterios de diseño.
3. Requiere mantenimiento frecuente para evitar la obstrucción.
4. No es efectivo en la eliminación de los contaminantes líquidos y disueltos.
5. Potencial obstrucción por presencia de sólidos suspendidos

6. Los filtros de arena pueden necesitar ser colocados en línea para protegerse durante las tormentas extremas.

2.8 EXPERIENCIAS DEL USO DE FILTROS LENTOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Estudios recientes han demostrado que la Filtración Lenta en Arena es igualmente confiable en el tratamiento de aguas residuales, como para el de aguas superficiales (12,13)

Los filtros de arena se pueden utilizar para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo viviendas unifamiliares, grandes establecimientos comerciales y pequeñas comunidades; con frecuencia se utiliza para tratamiento previo de las aguas residuales antes de la infiltración al subsuelo.

Los filtros de un solo paso "intermitentes" son frecuentemente utilizados para aplicaciones más pequeñas y donde la eliminación de nitrógeno no es necesaria.

Emerick ⁽¹²⁾, realiza el estudio de remoción de microorganismos en Filtro Intermitente de arena poco profunda. Doce filtros de arena poco profundas circulares (0,38 m de profundidad, diámetro, nominal de 1,2 m) fueron cargados de forma intermitente con efluente primario para evaluar los efectos de la tasa de carga hidráulica, unida a una frecuencia de dosificación alta y el medio de filtración características de la remoción de colifagos indígenas, coliformes totales, turbiedad, la demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales. Se aplicaron entre 0.041 y 0.162 m/d durante un período de 84 días a una frecuencia de 24 dosis / día.

Se investigaron filtros de arena de tamaño mediano y arena gruesa y vidrio molido. El tamaño efectivo varió de 0,44 a 3,3 mm, y los coeficientes de uniformidad entre 1,3 a 5,0. Las tasas de remoción promedio de 94, 96 y 92 por ciento se obtuvieron para la turbiedad, sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno, respectivamente, independientemente de las características del medio. La eliminación de los microorganismos se encuentra afectada por el aumento de la tasa

de carga hidráulica y la frecuencia de la dosis del afluente. Este estudio es una extensión de la obra informada por Darby et al. con el propósito de la evaluación de la remoción de microorganismos en Filtros Intermitentes de Arena.

Ellis ⁽¹¹⁾, diseñó un estudio para demostrar la viabilidad, o no, de la Filtración Lenta de Arena como medio de tratamiento terciario de efluentes secundarios derivados de tratamientos convencionales aeróbicos, en procesos biológicos que utilizaban aguas residuales municipales; para dicho estudio empleó efluentes secundarios derivados de una Planta de Lodos Activados y de una Planta de Filtración por percolación. La unidad básica del Filtro Lento de Arena utilizada consistió en un cilindro de plexiglás de 140 mm de diámetro, 2,65 m de altura y una profundidad de 950 mm de arena fina. Las tasas de velocidad estuvieron entre 3,5 m/d a 7,0 m/d y la arena utilizada tenía un tamaño efectivo inicial de 0,3 mm y luego de 0,6 mm.

Esta investigación demostró en laboratorio a escala piloto que la unidad de filtración lenta de arena es capaz de eliminar sistemáticamente al menos el 90% de los sólidos en suspensión, más del 65% de la DBO remanente y más del 95% de los organismos coliformes en el efluente decantado de una planta de filtros de percolación. Las carreras de filtración tuvieron en promedio un periodo de 20 días a 3.5 m.d⁻¹ y 13 días a 7m.d⁻¹. Resultados ligeramente inferiores se obtuvieron al utilizar el efluente decantado de una unidad de lodos activos operacionales.

Bellamy ⁽⁶⁾, observó una eliminación del 98% de coliformes totales usando arena de tamaño efectivo de 0,29 mm frente a 96% de remoción utilizando arena de tamaño efectivo de 0,62 mm en filtros con la misma profundidad y tasa de filtración. Control de la turbidez aumenta después de la maduración del filtro. Esto puede ser el resultado de la producción de polímeros naturales pegajosa de bacterias que habitan en el lecho filtrante; además altos niveles de nutrientes pueden promover mayor crecimiento biológico y el filtro lento puede desempeñar un rendimiento mejor que con menores niveles de nutrientes.

En el estudio realizado por Farooq et al, 1993 sobre la filtración lenta de arena como proceso de tratamiento terciario para los efluentes de tratamiento secundario de aguas residuales a escala piloto, se evidenció que la absorción microbiana en el filtro de arena que recibió efluente de tratamiento secundario clorado fue similar al del filtro de arena control que recibió efluente de un tratamiento secundario. Esto indica que la desinfección con 5mg/l de cloro no altera la capacidad operacional de la capa biológica del lecho filtrante. En la primera fase del estudio se determinó los parámetros de diseño óptimos de los filtros lentos de arena. Los porcentajes de remoción de coliformes totales y coliformes fecales obtenidos a la salida del filtro lento de arena control que recibió efluente de tratamiento secundario fue de 83,4% y 86,0%, respectivamente; los porcentajes de coliformes totales y coliformes fecales obtenidos a la salida del filtro lento de arena que recibió efluente de tratamiento secundario clorado fue de 92,9% y 86,4%, respectivamente; y los porcentajes de coliformes totales y coliformes fecales obtenidos a la salida de todo el sistema (cloración del efluente de tratamiento secundario + filtración lenta) fue de 98,2% y 98,1%, respectivamente.

Farooq ⁽¹⁶⁾, estudió la eficiencia operacional del filtro lento de arena como tratamiento terciario de efluentes secundarios a escala piloto, en filtros de arena fina y arena gruesa y tres profundidades del lecho de arena en el rango de 135 a 55 cm, encontrando que el tiempo de maduración del filtro de arena fina fue de 48 días en comparación al del filtro de arena gruesa que fue de 56 días.

Los porcentajes de remoción de bacterias coliformes para ambos tipos de arena disminuyeron a medida que disminuyó la profundidad del lecho filtrante.

Finalmente, reporta que el tiempo de duración de la carrera de filtración de la arena gruesa fue de 84 días, tiempo mucho mayor al del filtro de arena fina, que estuvo entre 9 y 26 días.

Loomis ⁽¹⁹⁾, investigó el rendimiento de un filtro de arena tipo recirculación, dos filtros de arena de un solo paso, tres filtros de arena Maryland tipo recirculación, cinco biofiltros cubo de espuma, y un filtro de recirculación de textiles. Todos los sistemas

de filtro de arena estudiados redujeron los sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) entre 90 a un 99%, alcanzando una reducción en los niveles de coliformes fecales de 2,3 a 3,8 log y de nitrógeno total (NT) entre 8 y 75%, dependiendo del tipo de sistema de filtro de arena y la temporada. El promedio de las reducciones Logarítmicas de coliformes fecales en los biofiltros de espuma estuvo alrededor de 1,5 independientemente de la temporada.

Prasad ⁽³¹⁾, llevó a cabo una investigación respecto al potencial de los filtros de arena de tipo intermitente para la reducción de contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos presentes en los desagües domésticos. Las aguas residuales domésticas se filtraron a través de lechos de arena y suelos constituidos a diferentes proporciones: 1:1, 1:3, 3:1; un filtro con lecho de arena al 100% y otro filtro con lecho de suelo al 100%. Los resultados demostraron que hubo una reducción significativa en parámetros microbiológicos y fisicoquímicos en filtros con lechos de constitución mixta: arena y suelos; destacando sobre todas la proporción 3:1, con una remoción máxima de bacterias coliformes de 82,4%. Los filtros con lechos de arena al 100% lograron una remoción máxima de bacterias coliformes del 33,4%.

Darby ⁽¹⁰⁾, demostraron que los Filtros Intermitentes de Arena de profundidad 0,38 m fueron capaces de producir tasas de remoción promedio de entre el 90 y el 99 por ciento para la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno orgánico y amoniacal, y la turbiedad y casi el 81 por ciento de la demanda química de oxígeno, independientemente de las características del medio, cuando se administra con efluentes primarios con una tasa superficial de 0.163 m/d o menos y una frecuencia de dosificación de 12 a 24 veces / día.

Sadiq ⁽³³⁾, evaluó el rendimiento de los filtros lentos de arena en la eliminación de coliformes totales mediante un método probabilístico. Tres filtros lentos de arena se construyeron a escala piloto en Alkhobar

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Dhahran, Arabia Saudita. La eficiencia de remoción microbiológica de los filtros se estimó bajo diferentes parámetros de control, que incluyeron la tasa de filtración (q), la profundidad del lecho de arena (d) y el tamaño de grano de arena (c). Para estimar las características de los parámetros se utilizaron tres tipos de distribución: normal, lognormal y distribución de tipo III. Los resultados fueron contrastados con el modelo de regresión empírico. Se definió como la capacidad del filtro 100 coliformes totales/100ml para determinar el riesgo de excederse el límite estándar, el cual fue menos de 50 en el 95% del tiempo. Una pre y pos desinfección será necesaria para conseguir un efluente con el estándar de calidad para uso de riego irrestricto en agricultura.

Sadiq ⁽³⁴⁾, realizó un estudio para evaluar y predecir el rendimiento de un filtro lento de arena usado para el tratamiento de aguas residuales. El método lógico Fuzzy con las reglas *si – entonces*, fue utilizado para construir un modelo de remoción de coliformes totales en filtros lentos de arena. El modelo Fuzzy fue validado usando datos experimentales de tres casos de estudios reportados en la literatura. Los resultados fueron comparados con el modelo de regresión múltiple.

Un análisis de riesgos posibilista se realizó sobre la eficiencia de remoción de los Filtros Lentos. El riesgo se estima con respecto al incumplimiento de las normas de reutilización agrícola sin restricciones. Además de los Filtros Lentos de Arena, se recomienda la cloración de las aguas residuales para mejorar la calidad de las aguas residuales conforme a las normas de reutilización agrícola.

Con base en las experiencias citadas, este estudio se centró en evaluar el rendimiento del Filtro Lento de Arena de flujo continuo para mejorar la calidad microbiológica del efluente de un sistema de tratamiento secundario en términos de Coliformes termotolerantes; como una alternativa de tratamiento terciario de aguas residuales para reuso en áreas verdes.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos Generales

- Estudiar el uso de la Filtración Lenta como tratamiento terciario para la remoción de Coliformes termotolerantes.

3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir el Filtro Lento de Arena piloto de flujo continuo
- Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes tasas de filtración en la eficiencia del Filtro Lento de Arena piloto de flujo continuo
- Evaluar y cuantificar los niveles de remoción alcanzados en términos de Coliformes termotolerantes
- Evaluar la factibilidad del reuso del efluente para irrigación de áreas verdes

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Diseño del sistema de tratamiento experimental

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNITRAR), la cual trata las aguas residuales domésticas que provienen de los Asentamientos Humanos de El Milagro y El Carmen pertenecientes al distrito de Independencia, ubicadas en la parte posterior a la Planta UNITRAR.



Foto 1. Asentamientos Humanos El Milagro y El Carmen pertenecientes al distrito de Independencia



Foto 2. Ubicación de la Planta UNITRAR -a



Foto 3. Ubicación de la Planta UNITRAR-b

El sistema de tratamiento experimental estuvo conformado por las unidades de tratamiento existentes en el UNITRAR, las mismas que aquellas utilizadas por Maldonado ⁽²⁰⁾: pretratamiento (rejas y desarenadores), tratamiento primario (tanque séptico) y tratamiento secundario (sistema de humedal subsuperficial); y luego del cual se instaló el Filtro Lento de Arena piloto.

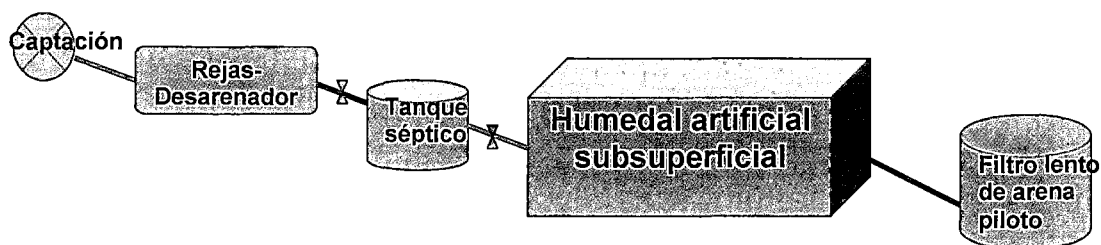


Figura 6. Esquema de las unidades que conformaron el sistema de tratamiento experimental

4.1.1 Pre-tratamiento

El agua residual doméstica captada pasa por las rejas gruesas, rejas finas y finalmente por el desarenador. Solo una fracción del caudal efluente del desarenador se deriva hacia un tanque séptico de 2 500 L de capacidad. El resto del caudal captado continúa su recorrido a través de las unidades de la Planta UNITRAR.

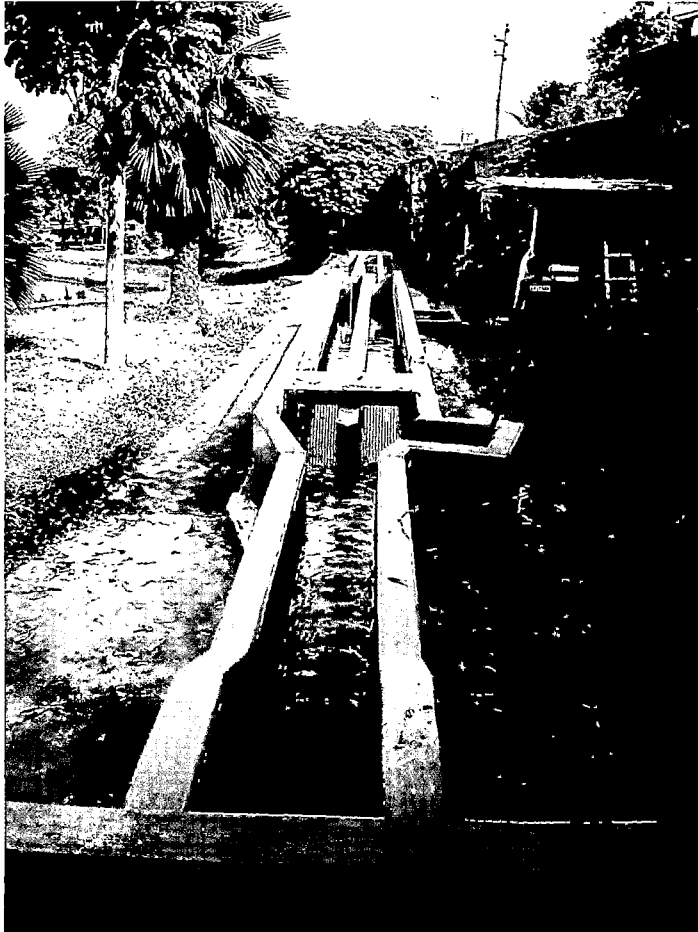


Foto 4. Cámara de rejas y desarenador

4.1.2 Tratamiento Primario

Tanque séptico

El tanque séptico es prefabricado de material Polietileno de alta densidad (HPDE), de 2,5 m³ de una capacidad; ubicado en la zona posterior a los desarenadotes.



Foto 5. Vista del tanque séptico utilizado durante el estudio.

4.1.3 Tratamiento Secundario

Humedal Artificial

El humedal artificial se ubicó en la zona posterior al tanque séptico. Las dimensiones del humedal fueron de 6 m x 36 m.

Esta unidad de tratamiento estuvo conformada por los siguientes elementos:

a) Dispositivo de regulación de caudal

Vertedero triangular de planchas de PVC, que controlaba el exceso de caudal a través de un rebose por medio de un vertedero rectangular.

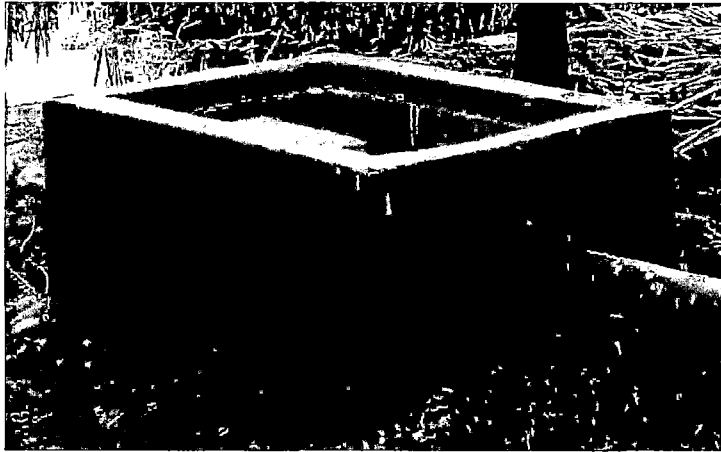


Foto 6. Vista del dispositivo de regulación de caudal.

b) Dispositivo de ingreso y salida

Tubería con orificios distribuidos cada 49 cm de con la finalidad de lograr una distribución homogénea del caudal de ingreso a lo largo del humedal.

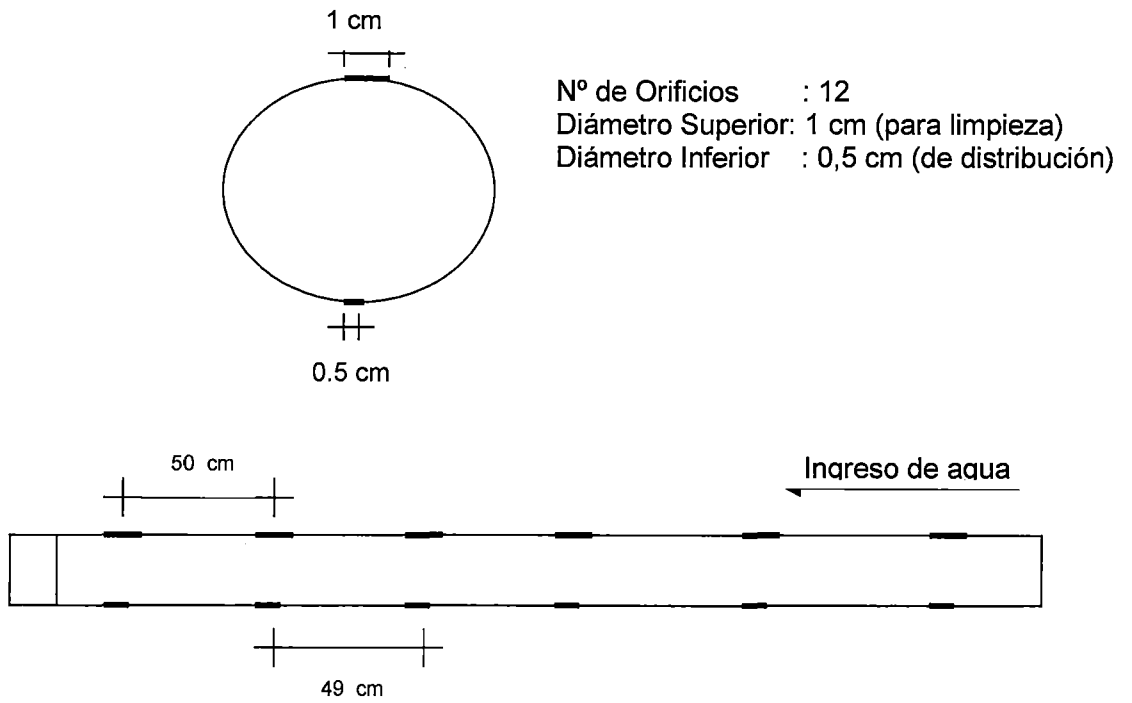


Figura 7. Distribución de orificios en el dispositivo de ingreso.



Foto 7. Vista del dispositivo de ingreso al humedal.

c) Capa impermeabilizante

Geomembrana de material Polietileno de alta densidad (HPDE) de 1mm de espesor, colocada sobre el terreno nivelado y compactado.

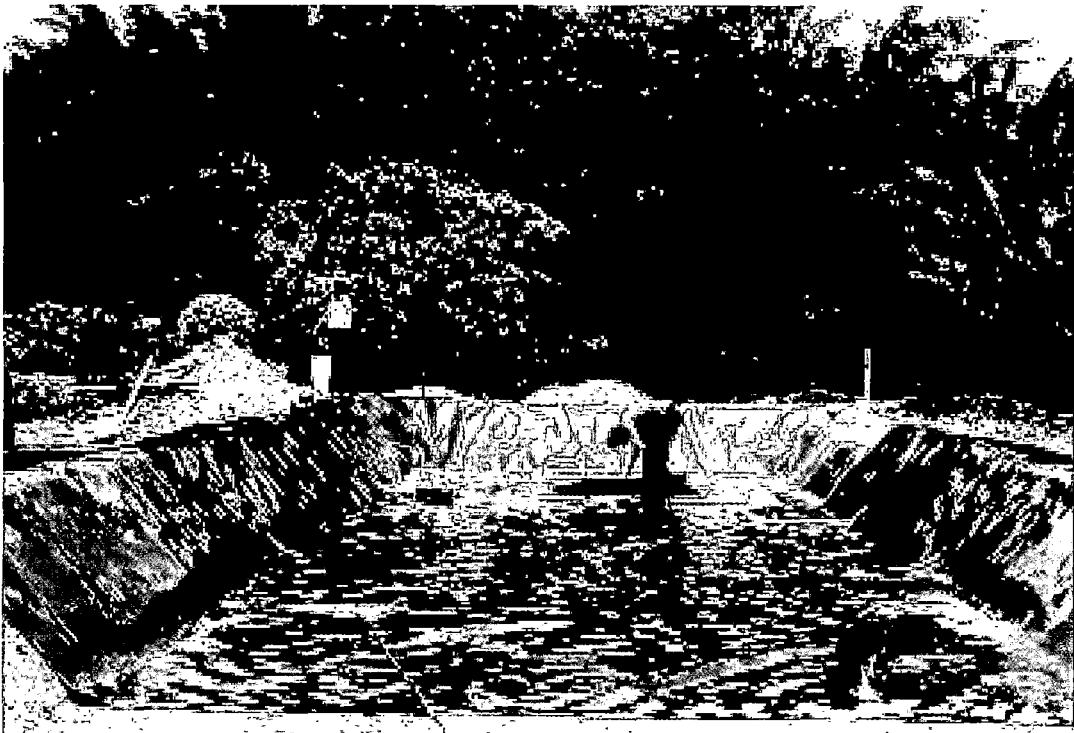


Foto 8. Capa de geomembrana.

Sobre la geomembrana se encuentra colocado un Geotextil no tejido de marca TREVIRA 011/200, a fin de brindarle protección. Este Geotextil es un geosintético fabricado a partir de filamentos continuos de poliéster estabilizado, agujado y laminado.

Tabla 6. Características técnicas del geotextil

PROPIEDAD	NORMA ASTM D	U	TREVIRA 011/200
Resistencia a la Tensión "Grab"	4632	K	104 / 82
		Lb	230 / 180
		N	1022 / 800
Elongación en la ruptura	4632	%	75 / 85
Resistencia al desgarre trapezoidal	4533	K	36,20
		Lb	80,00
		N	355,00
Resistencia al punzonamiento	4833	K	45,00
		Lb	100,00
		N	441,00
Resistencia al reventado	3786	MPa	2,27
		psi	322
Permitividad	4491	s ⁻¹	2,27
Permeabilidad	4491	cm/s	0,52
Abertura de malla	4751	#	70 - 100
		mm	< 0,21
Densidad superficial	5261	g/m ²	200
		Oz/y ²	6,00
Espesor	5199	mm mils	2,25 90,00
Ancho		m	1,60
Longitud		m	290

d) Medio de soporte

El medio de soporte estuvo formado por los siguientes elementos:

Grava: 0,40 m de espesor sobre la capa impermeable de geomembrana

Confitillo: 0,10 m de espesor sobre la capa de grava

Arena gruesa: 0,10 m de espesor sobre la capa de confitillo

e) Planta Emergente

La planta emergente fue la totora, perteneciente a la familia de las Ciperáceas. La totora es una gramínea muy parecida al junco en forma y características, aunque pertenecen a distintas familias.

La totora puede alcanzar una altura de hasta 4 m variando el ancho del tallo desde 3 cm, cerca de la raíz, hasta 3 mm en el ápice. Nace de rizomas escamosos, amarillo brillante y triangular. Raíces de textura esponjosa, de color rojo oscuro. Las hojas típicas son casi membranosas. Crece naturalmente en lagos y ríos, y en sus riberas.



Foto 9. La totora, planta emergente del humedal artificial subsuperficial

4.1.4 Tratamiento Terciario

Filtro Lento de Arena piloto

El Filtro Lento de Arena (FLA) piloto se ubicó a la salida del humedal artificial subsuperficial. Esta unidad de tratamiento estuvo conformada por:

- a) Dispositivo de regulación y control del filtro
- b) Sistema de drenaje
- c) Lecho filtrante

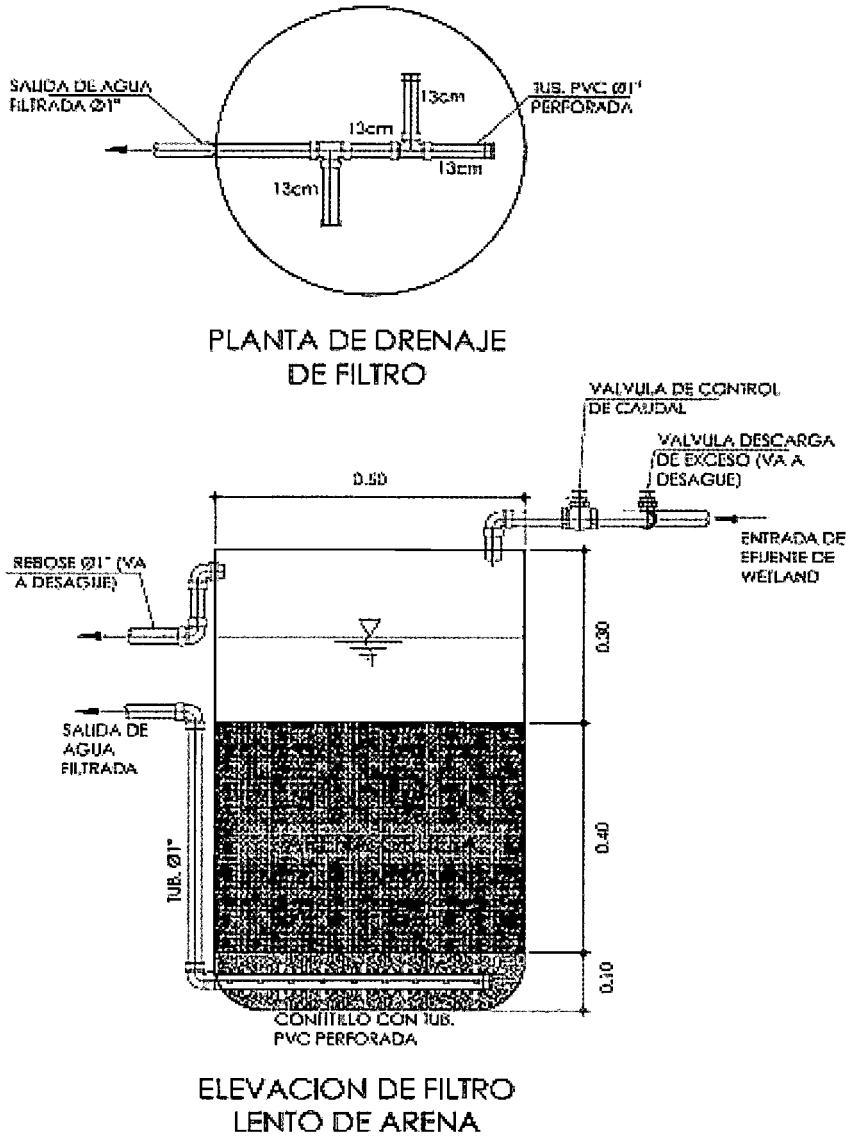


Figura 8. Diseño del Filtro Lento de Arena piloto

a) Dispositivo de regulación y control del FLA piloto

Se utilizó una tubería de 1" en PVC para el ingreso al FLA piloto del efluente del humedal subsuperficial. Se utilizó una válvula para la regulación del caudal de ingreso y otra para rebose.

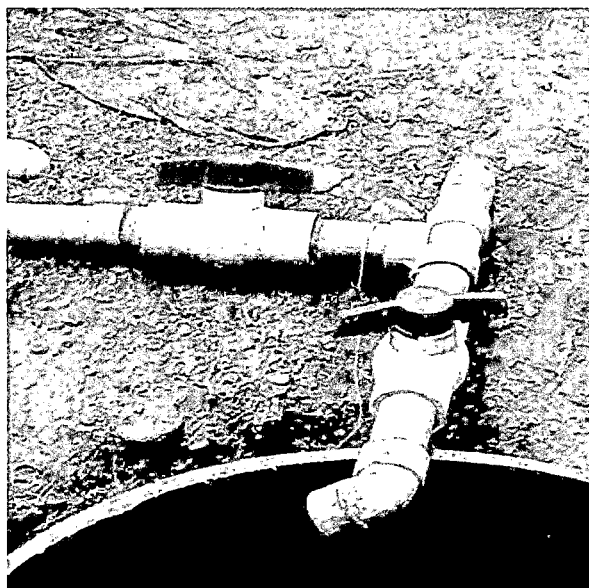


Foto 10. Válvula de regulación de caudal de ingreso al FLA piloto

El exceso de agua y sobrenadante se eliminaban por un orificio de rebose.

La medición del caudal se realizó por el método volumétrico utilizando una probeta de 100 ml y un cronómetro.



Foto 11. Tubería de ingreso del efluente del humedal subsuperficial al FLA piloto

b) Sistema de drenaje

Además de ofrecer soporte al medio filtrante asegurando que la filtración se mantenga uniforme a través de toda el área del filtro, este sistema permite la recolección del agua filtrada y su salida de la unidad.

Sobre las tuberías se colocó una capa de lecho de soporte, la malla mosquitera para evitar la obstrucción de los orificios y la capa de arena gruesa. La malla mosquitera se utilizó como una alternativa para no colocar una capa de grava de mayor espesor.

Este sistema estuvo compuesto por una tubería perforada principal y dos tuberías perforadas laterales con cuatro orificios de diámetro de 1", los cuales se unen a la tubería principal mediante una tee. Las tuberías fueron de material cloruro de polivinílico (PVC).



Foto 12. Tubería principal y laterales en PVC



Foto 13. Tubería de salida en PVC y orificio de rebose



Foto 14. Tubería de salida del efluente del FLA piloto

c) Lecho filtrante

El lecho filtrante estaba compuesto por arena gruesa de construcción colocada sobre la capa de lecho de soporte. Esta arena fue lavada previamente antes de ser colocada. El espesor del lecho filtrante fue de 40cm.

Se utilizó arena gruesa como medio filtrante a fin de evitar se obstruya rápido y se extienda el periodo de funcionamiento.



Foto 15. Capa de lecho de soporte

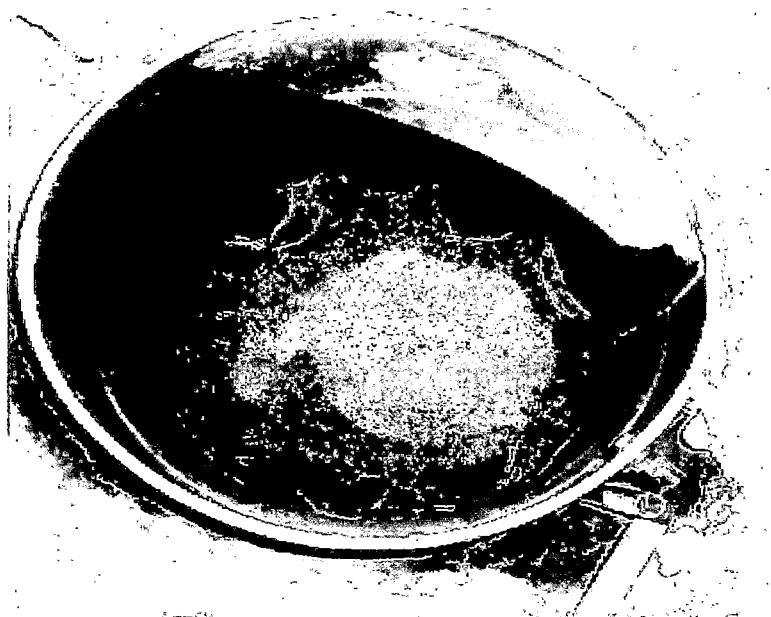


Foto 16. Malla mosquitera sobre la capa de lecho de soporte



Foto 17. Capa de arena gruesa de ϕ 0,10: 0,897 mm; C.U: 1,802; sobre la malla mosquitera

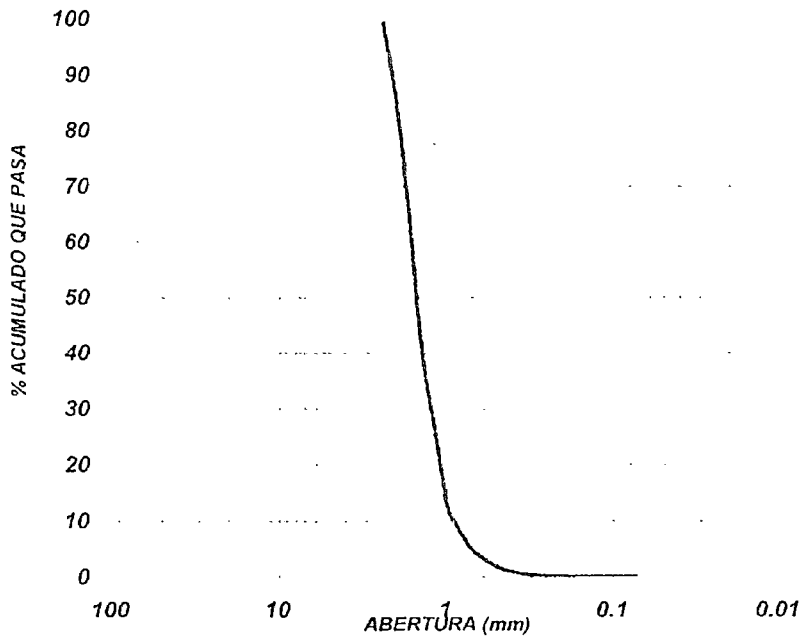
INFORME DE ANALISIS N° 231-2009 LAB. N° 20

Solicitante : CARMEN BARZOLA
Tipo de muestra : ARENA DE FILTRO
Fecha de muestreo : 01-09-09
Fecha de recepción : 01-09-09

ANALISIS GRANULOMETRICO

(Peso inicial = 500 grs)

Abertura	% que pasa
2.38	99.372
1.99	84.972
1.68	65.972
1.41	40.780
1.19	26.780
1.00	12.894
0.84	8.410
0.71	4.950
0.59	3.074
0.50	1.824
0.42	1.056
0.297	0.358
0.21	0.172
0.149	0.124
0.105	0.096
0.07366	0.072
FONDO	0.000



D60= 1.616 mm
D10= 0.897 mm
C.U.= 1.802

Lima, 08 de setiembre del 2009

Jorge Tello Cebberos
ING. JORGE TELLO CEBREROS
JEFE (e) DEL LABORATORIO N° 20

Figura 9. Análisis Granulométrico

4.2 Diseño experimental del Filtro Lento de Arena

4.2.1 Puesta en operación del FLA piloto

El efluente del FLA piloto se condujo a través de tubería de 1" ubicado a una cota de 5cm por encima del nivel del lecho, a fin de asegurar que el lecho filtrante este inundado todo el tiempo.



Foto 18. Llenado del FLA piloto con el efluente del Humedal

Durante la operación se verificó el caudal de ingreso a fin de mantener la tasa de filtración de interés.

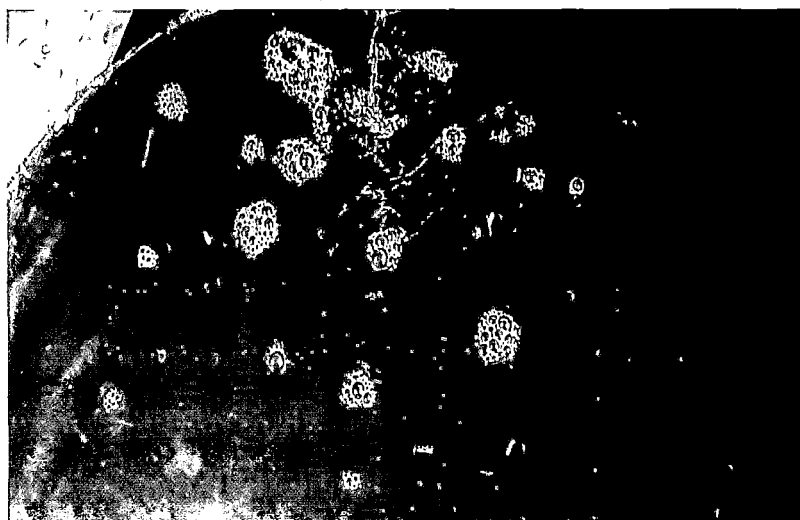


Foto 19. FLA piloto en operación

Después de 01 mes de operación hubo necesidad de limpiar el FLA piloto, para lo cual se desmontó la unidad y se hizo una limpieza general. En el presente estudio no se hicieron raspados sucesivos de la arena como se procede normalmente por que la unidad experimental tuvo una altura de 40 cm de lecho filtrante, que es considerada la altura mínima de operación en este tipo de unidades.

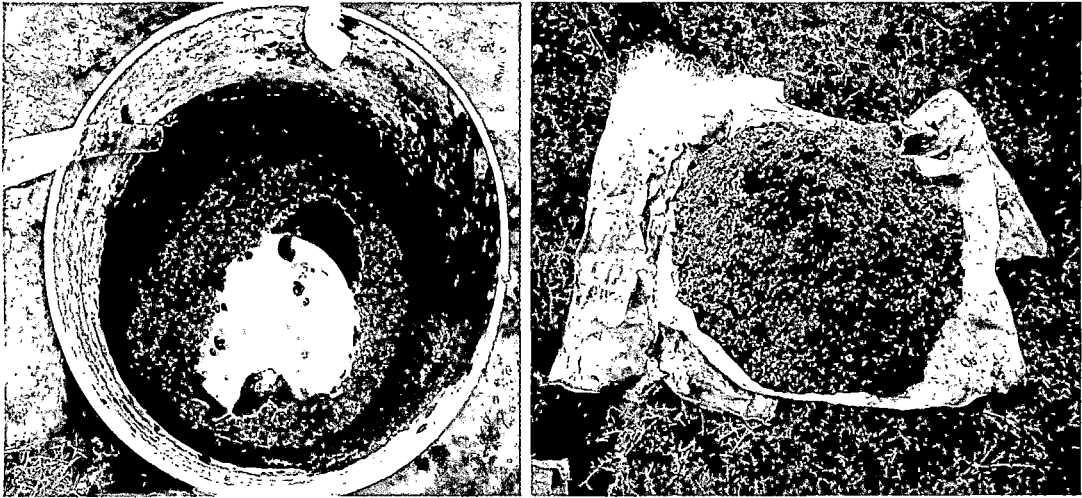


Foto 20. Retiro de la arena del FLA piloto

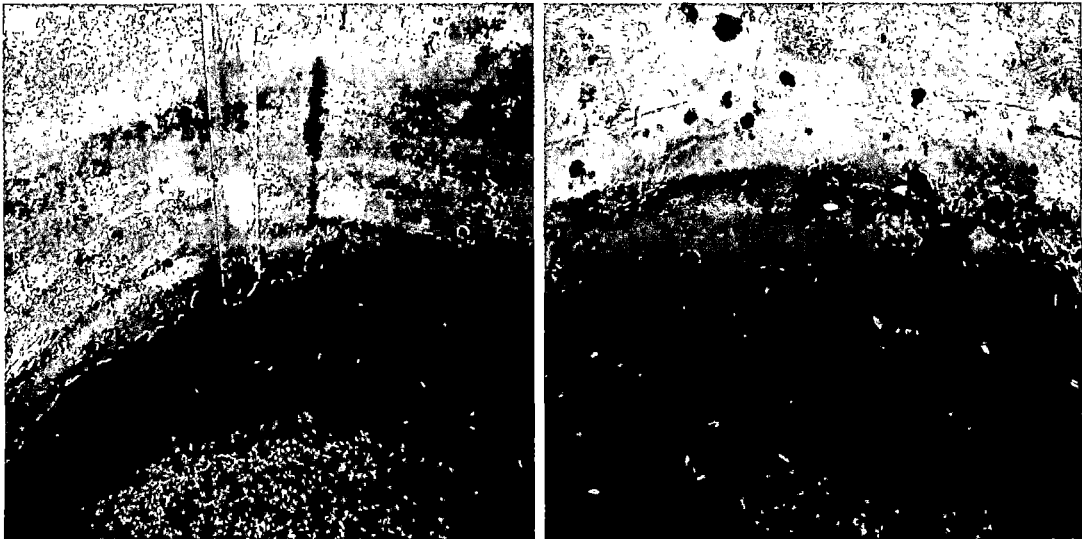


Foto 21. Crecimiento de algas en el FLA piloto

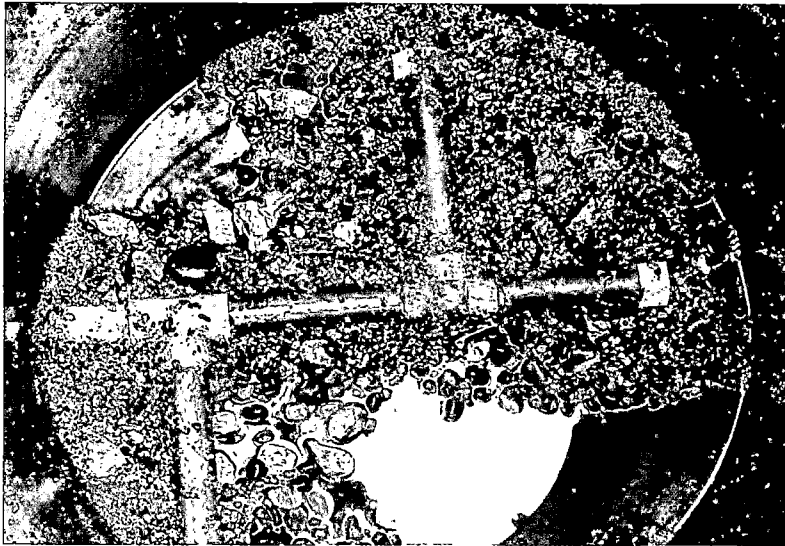


Foto 22. Lecho de soporte lavado

4.2.2 FASE experimental I

Para la primera fase el estudio se utilizó un FLA piloto con las características de diseño según se describe en la Tabla 7.

El FLA piloto operó con cinco diferentes tasas de filtración, con flujo continuo de febrero a junio 2008, determinándose este periodo de estudio por considerarlo el más crítico dada la generación de desagües domésticos con mayor carga orgánica en relación a los meses de temperaturas más bajas; sin embargo se puso en operación el FLA piloto en el mes de noviembre 2008 con una tasa superficial aplicada de $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, a fin de contrastar los resultados obtenidos.

En esta primera fase se aplicaron tasas de filtración de $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,164 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,123 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,065 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, las cuales se obtuvieron con la medición y regulación del caudal de ingreso al FLA piloto. La medición del caudal de ingreso fue por el método volumétrico utilizando una probeta de 100mL y un cronómetro.

Tabla 7. Características del medio filtrante y cargas hidráulicas aplicadas – Fase I

Material	Tamaño efectivo, mm	Coficiente de uniformidad	Tasa de carga hidráulica	Tipo de flujo aplicado
Arena gruesa	0,897	1,802	0,18 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0, 164 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0, 123 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0, 065 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0, 039 m ³ /m ² . h	Continuo

4.2.3 FASE experimental II

Habiéndose obtenido porcentajes de remoción de Coliformes Termotolerantes con valores máximos de 31%; se configuró una segunda fase experimental, para lo cual se diseñó los criterios de operación del FLA piloto el cual se describe en la Tabla 8. El FLA piloto operó con cuatro diferentes tasas superficiales, a flujo continuo de enero a marzo 2009, determinándose este periodo de estudio por considerarlo el más crítico dada la generación de desagües domésticos con mayor carga orgánica en relación a los meses de temperaturas más bajas.

En esta segunda fase se aplicaron tasas de filtración de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, las cuales se obtuvieron con la medición y regulación del caudal de ingreso al FLA piloto. La medición del caudal de ingreso fue por el método volumétrico utilizando una probeta de 100mL y un cronómetro.

Tabla 8. Características del medio filtrante y cargas hidráulicas aplicadas – Fase II

Material	Tamaño efectivo, mm	Coefficiente de uniformidad	Tasa de carga hidráulica	Tipo de flujo aplicado
Arena gruesa	0,897	1,802	0,049 m ³ /m ² . h,	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0,033 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0,016 m ³ /m ² . h	Continuo
Arena gruesa	0,897	1,802	0,008 m ³ /m ² . h	Continuo

4.3 Muestreo

Las muestras del efluente del FLA piloto fueron colectadas de la tubería de salida, no siendo necesaria la espera de cinco minutos de purgado, dado que la unidad es de flujo continuo.

Las muestras fueron colectadas durante el tiempo que se aplicó cada tasa de carga hidráulica; al ingreso y salida del FLA piloto; una vez por día y al mediodía.

Se midió el pH y temperatura del agua al ingreso y salida del FLA piloto utilizando un pH metro digital marca HANNA.

Las muestras para análisis de Coliformes termotolerantes se tomaron en frascos de vidrio esterilizados, de capacidad de 500 ml, dejando un espacio mínimo de 3 cm entre la boquilla del frasco y la superficie del agua. Las muestras de agua se conservaron en caja refrigerante hasta su traslado al Laboratorio N°20 de la UNI.



Foto 23. Toma de muestra a la entrada del FLA piloto



Foto 24. Toma de muestra a la salida del FLA piloto

El objeto del presente estudio no está dirigido a la evaluación de parásitos, por ser un parámetro cuya remoción del 100% a nivel del humedal artificial subsuperficial ha sido demostrado ⁽¹⁷⁾; sin embargo a modo de información, en esta Fase I, se tomaron muestras de agua a la entrada y salida del FLA piloto, para análisis de

parásitos, utilizando galoneras de plástico, lavadas, de capacidad de 3000 ml, las muestras se mantuvieron en caja refrigerante hasta su traslado al Laboratorio Servicios Analíticos Generales SAC - SAG.

4.4 Análisis de Laboratorio

La muestra de agua del efluente del sistema de tratamiento secundario- humedal artificial subsuperficial y del efluente del FLA piloto de flujo continuo obtenidos a diferentes tasas de carga hidráulica fueron analizadas para el parámetro de coliformes termotolerantes de acuerdo a la técnica de fermentación en Tubos Múltiples para determinar el Número Más Probable (NMP) de Coliformes termotolerantes por 100 ml ⁽²²⁾.

La muestra de agua del efluente del sistema de tratamiento secundario- humedal artificial subsuperficial y del efluente del FLA piloto de flujo continuo obtenidos a la tasa superficial de 0,049 m³/m².h y 0,008 m³/m².h fueron analizadas con el parámetro de Parásitos utilizando el método Bailenger Modificado ⁽²¹⁾.

Se realizaron 08 ensayos referenciales; puesto que en estudio anterior ⁽²⁰⁾; se evidenció la eficiencia del sistema de humedales para remover parásitos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez instalado el FLA piloto tal como se describe en el ítem 4.2.1, se inició la operación del FLA piloto, con el ingreso del efluente secundario proveniente del Humedal artificial subsuperficial, hasta una altura de agua de 20 cm por encima de la superficie del lecho de arena. El caudal de ingreso al FLA piloto fue controlado en forma horaria con el aforo respectivo haciendo uso de una probeta y un cronómetro; verificándose que se mantenga la altura de agua por encima de la superficie del lecho de arena.

Fase I

Se llevo a cabo entre los meses de febrero a marzo 2008, poniéndose en operación el FLA piloto, ubicado en zona posterior al humedal artificial subsuperficial. En esta primera Fase, el FLA piloto operó con 05 diferentes tasas superficiales: $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,164 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,123 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,065 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$., cuyos tiempos de retención fueron de 1,79 h, 1,96 h, 2,62 h, 4,95 h y 8,25 h, respectivamente.

Fase II

Se llevo a cabo entre los meses de enero a marzo 2009. En esta segunda Fase, el FLA piloto operó con 04 diferentes tasas superficiales: $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$; a fin de evaluar si la aplicación de tasas superficiales menores favorecen una mayor remoción de Coliformes termotolerantes.

El FLA piloto operó con las siguientes tasas superficiales: $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, con caudal tiempos de retención de 6,56 h, 9,75 h, 20,10 h y 40,21 h, respectivamente.

Dado los resultados obtenidos en la Fase I se procedió a ejecutar la Fase II con la aplicación de tasas superficiales menores, centrándose en la evaluación de la

remoción de Coliformes termotolerantes, objetivo del presente estudio así como algunos análisis de parásitos a modo de referencia.

5.1 Calidad del Efluente Secundario a tratar

El efluente del humedal artificial cumple las directrices de la OMS respecto al parámetro de parásitos, sin embargo la concentración de Coliformes termotolerantes en el efluente es de aproximadamente 10^5 NMP/100ml, por lo que de utilizarse para fines de riego de cultivos, se requerirá un tratamiento adicional que reduzca esta concentración a valores inferiores a 1000 NMP/100ml ⁽²⁰⁾.

Tabla 9. Calidad del efluente aplicado al Filtro Lento de Arena piloto

Parámetro	Unidad	Humedal artificial subsuperficial	
		Ingreso ^a	Salida ^a
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	$9,57 \times 10^7 \pm 7,92 \times 10^7$	$7,61 \times 10^5 \pm 6,81 \times 10^5$
Ascaroideos	huevos/l	$19,86 \pm 18,65$	$0,5 \pm 0,5$
<i>Hymenolepis nana</i>	huevos/l	$12,22 \pm 11,98$	$0,33 \pm 0,44$
<i>Trichuris trichiura</i>	huevos/l	$2,75 \pm 1,15$	$0,2 \pm 0,32$
<i>Ascaris lumbricoides</i>	huevos/l	--	0 ± 0
DBO ₅	mg/l	$130,6 \pm 51,61$	$25,67 \pm 9,87$
pH		$7,5 \pm 0,21$	$7,03 \pm 0,12$
Temperatura	°C	$20,35 \pm 4,52$	$20,17 \pm 4,59$

^a adaptado de ⁽¹⁶⁾

Los Humedales artificiales, son en general capaces de remover Coliformes termotolerantes entre uno o dos logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requerimientos de vertido el cual se especifica en < 1000 NMP/100 ml. Serían necesarios tiempos de retención superiores a 14 días para lograr reducciones de 3 ó 4 logaritmos.

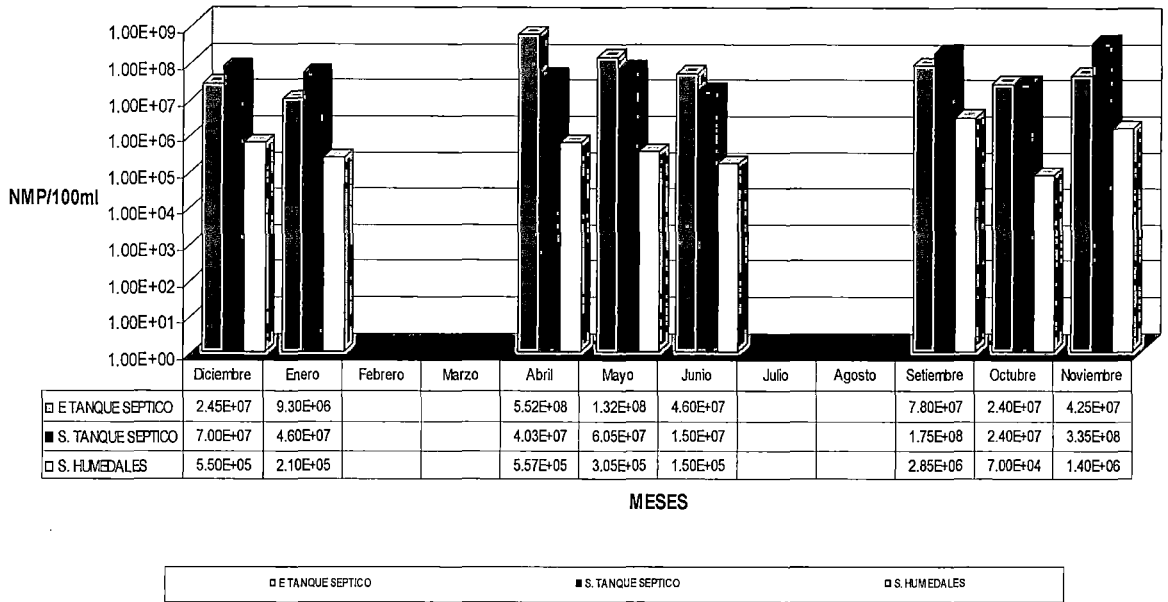


Gráfico 1 Densidad de Coliformes termotolerantes en el afluente y efluente del tanque séptico y efluente del Humedal, Diciembre 2003-Octubre 2004 ⁽¹⁸⁾

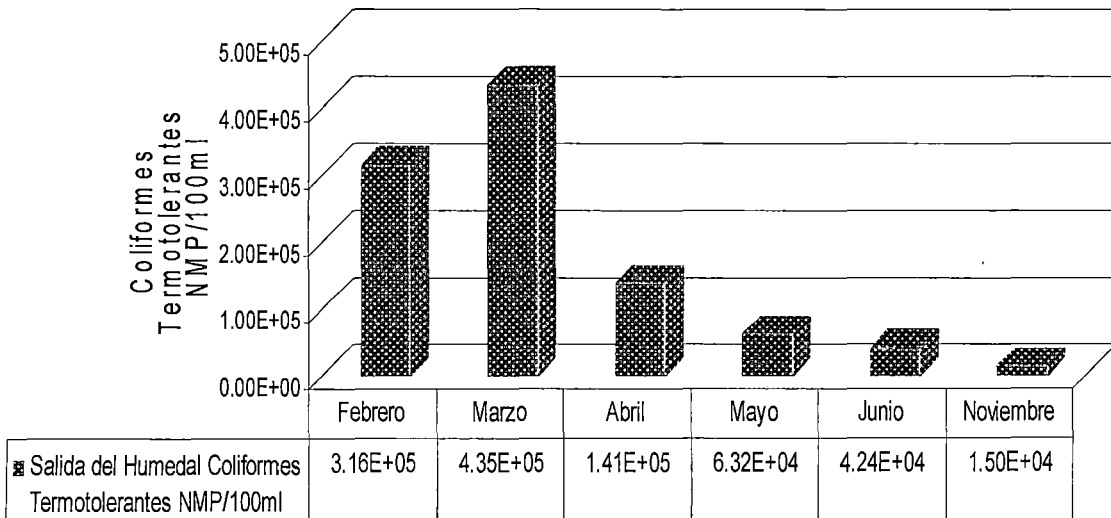


Gráfico 2 Densidad de Coliformes termotolerantes a la salida del Humedal artificial durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008

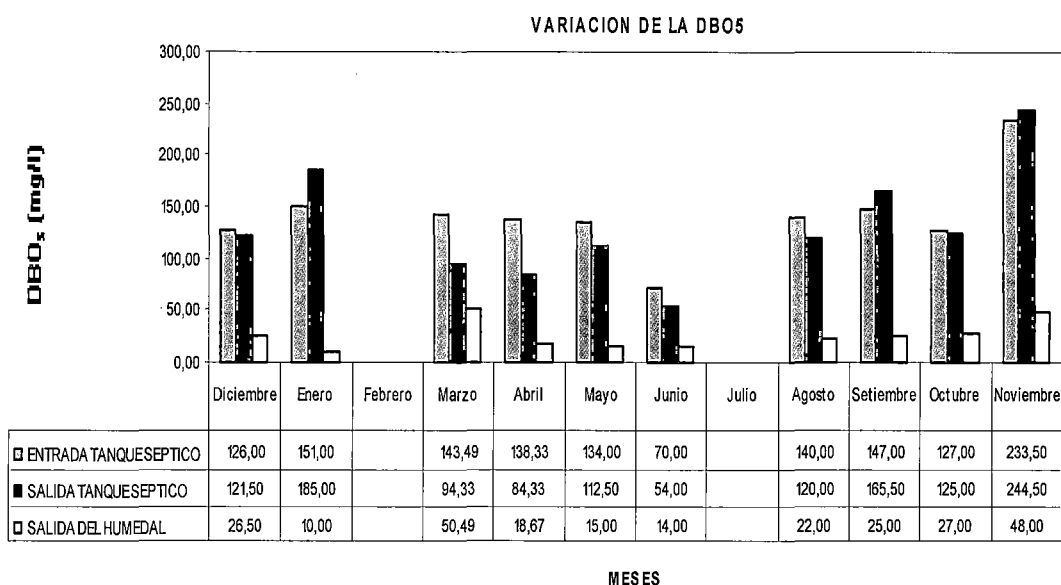


Gráfico 3 Variación de la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) durante el periodo de estudio Diciembre 2003-Octubre 2004 ⁽²⁰⁾

Si bien es cierto que el parámetro de DBO₅ no forma parte del objetivo de la presente investigación, se consideró su evaluación a fin de evidenciar las condiciones óptimas de operación del Humedal artificial subsuperficial durante el desarrollo del presente estudio.

Los valores reportados de DBO₅ a la salida de los humedales subsuperficiales generalmente se encuentran por debajo del 20 mg/L debido a la deposición y filtración, donde cerca del 50% de la DBO aplicada es eliminada en los primeros metros del humedal ⁽³⁹⁾.

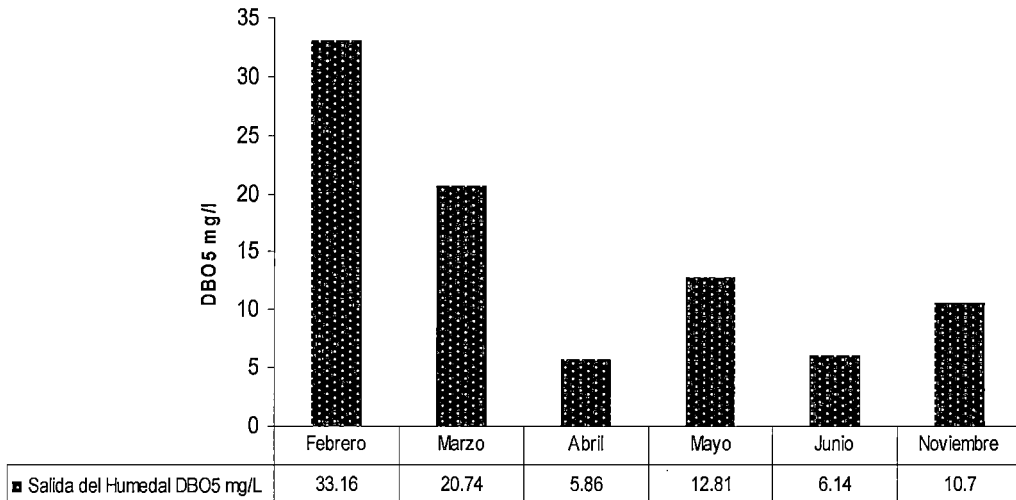


Gráfico 4 Variación de la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) a la salida del Humedal, durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008.

El efluente del Humedal artificial subsuperficial reportó valores de Coliformes termotolerantes y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) similares a los reportados por V. Maldonado ⁽²⁰⁾, lo que indica que se mantienen los niveles de eficiencia definidos para dicha unidad de tratamiento secundario.

5.2 Caudales de ingreso

El caudal de ingreso al FLA piloto fue regulado a fin de operar a distintas tasas superficiales: 0,18 m³/m².h, 0,164 m³/m².h, 0,123 m³/m².h, 0,065 m³/m².h y 0,039 m³/m².h en la primera fase y 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, en la segunda fase, cual estimó tiempos de retención mayores con la disminución de la tasa superficial.

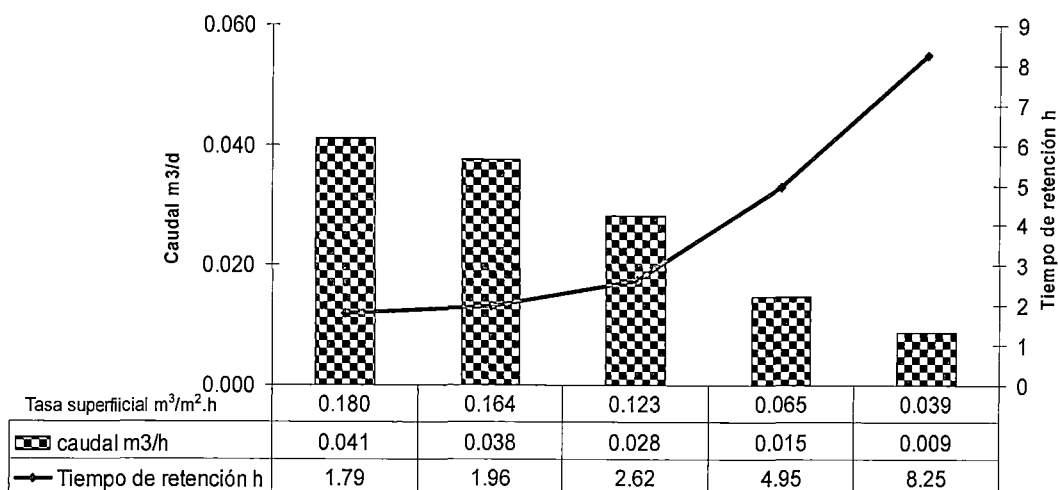


Gráfico 5. Caudales de ingreso, Tasa superficial y Tiempos de retención diseñados para el FLA piloto durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008

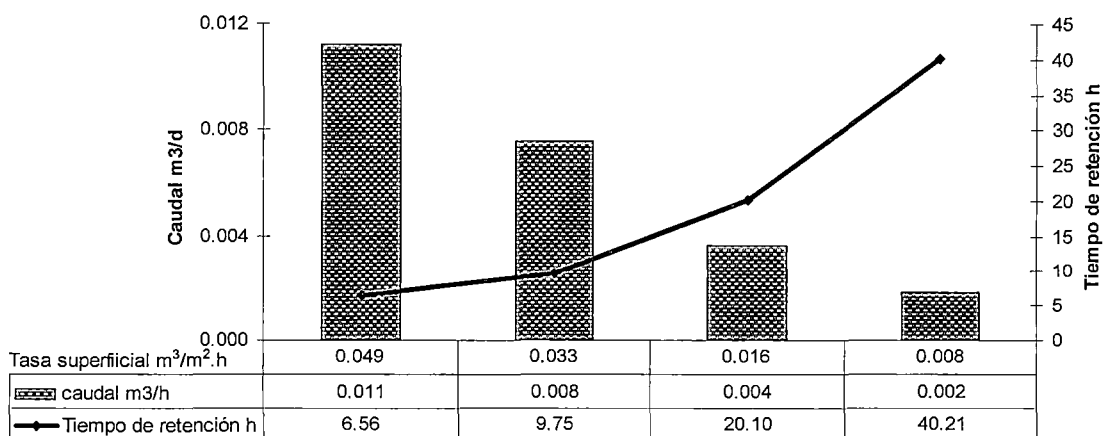


Gráfico 6. Caudales de ingreso, Tasa superficial y Tiempos de retención diseñados para el FLA piloto durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

5.3 Efecto de la Temperatura

La temperatura es un factor ambiental primario que afecta el crecimiento y la actividad microbiana. Cada microorganismo es capaz de crecer sólo dentro de un rango específico de temperatura. Existe una temperatura óptima en la cual el crecimiento es más rápido y la tasa de crecimiento alcanza su valor máximo. Para la mayoría de los microorganismos la temperatura óptima es mucho más cercana al máximo que a la mínima. El crecimiento a la temperatura mínima es típicamente lento. En general, la temperatura mínima de crecimiento está en el rango 10°C-15°C y temperatura óptima de 24°C-40°C dentro del rango óptimo valor máximo de 35°C-45°C⁽⁹⁾.

La eficiencia de la filtración lenta en arena puede verse seriamente reducida por bajas temperaturas, debido a la influencia de la temperatura tanto en la velocidad de las reacciones químicas como en la tasa de metabolismo de las bacterias y otros microorganismos.

Las condiciones dentro del filtro son inadecuadas para la multiplicación de las bacterias intestinales. Las bacterias, incluyendo *E. coli* no prosperan a temperaturas por debajo de 30°C, y el lecho del filtro por lo general no contiene suficiente materia orgánica de origen animal para satisfacer sus necesidades nutricionales⁽¹⁷⁾.

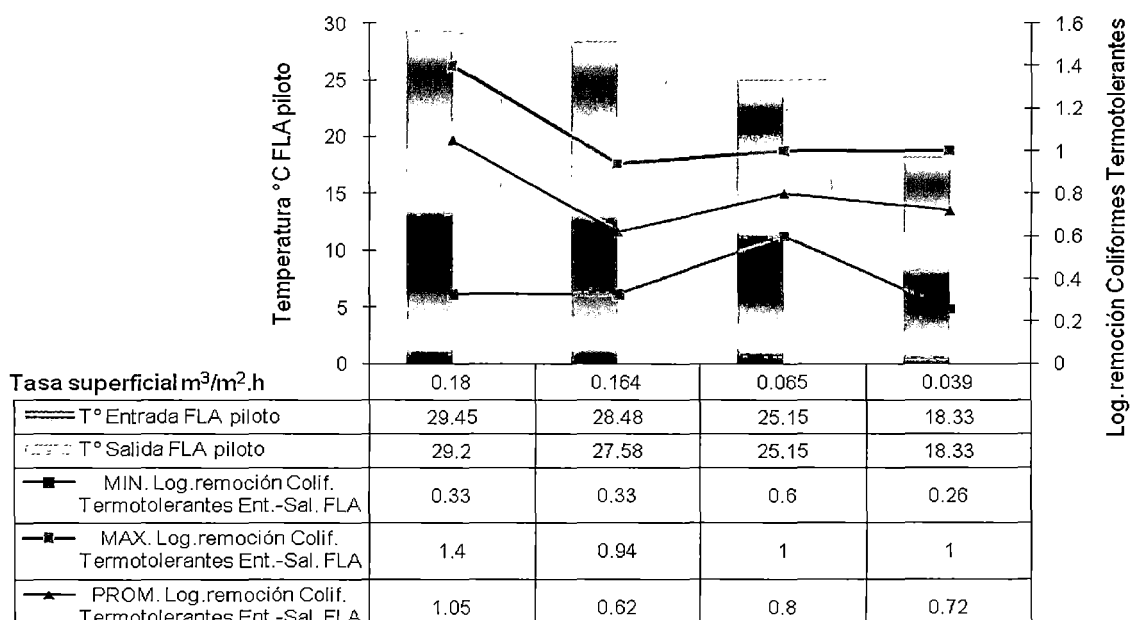


Gráfico 7. Valores promedios de Temperatura en el afluente y efluente del FLA piloto y logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008

Los valores de temperatura encontrados a la entrada y salida del FLA muestran una disminución mínima de 0,20°C, 0,9°C, 0°C y 0°C con tasas superficiales de 0,18 $m^3/m^2.h$, 0,164 $m^3/m^2.h$, 0,065 $m^3/m^2.h$ y 0,039 $m^3/m^2.h$, respectivamente.

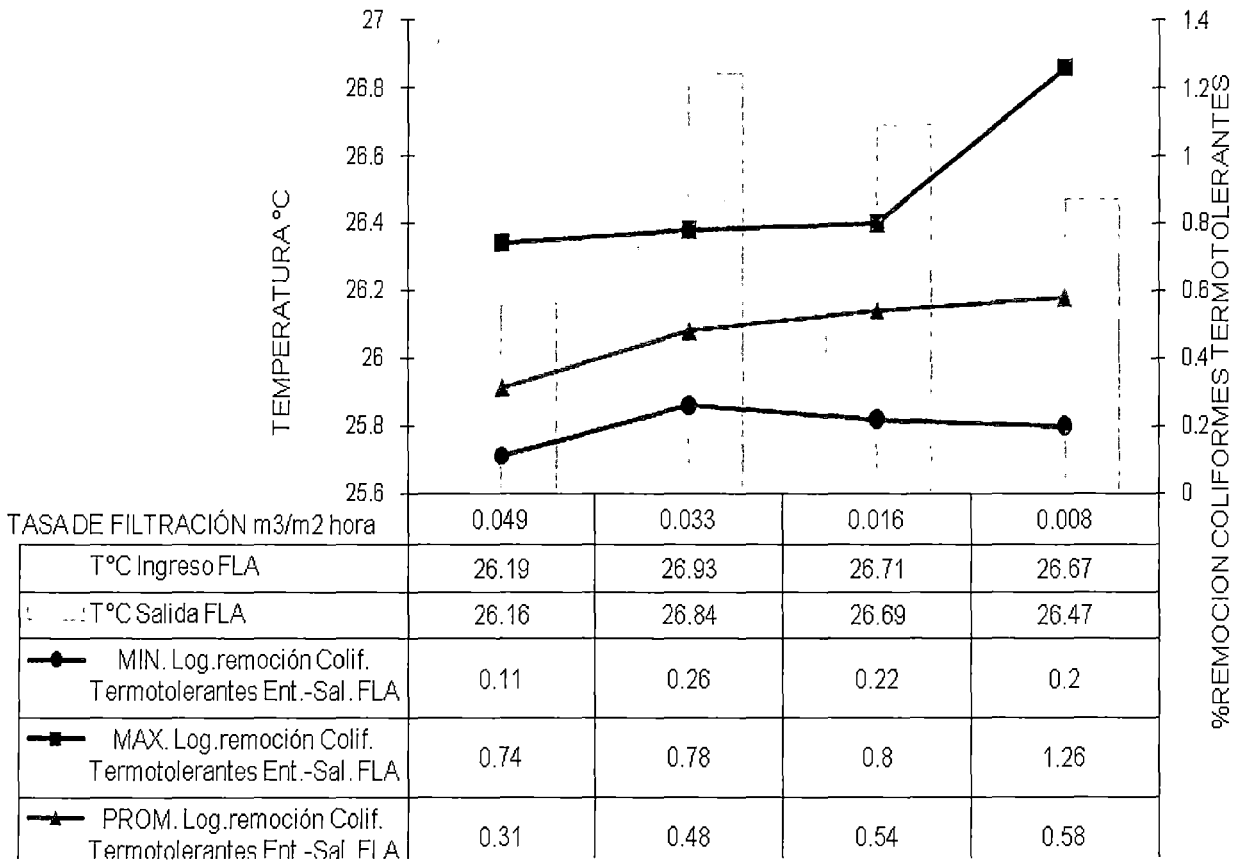


Gráfico 8. Efecto de la Temperatura en la remoción de Coliformes termotolerantes en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero – Marzo 2009

Los valores de temperatura encontrados a la entrada y salida del FLA muestran una disminución de 0,03°C, 0,09°C, 0,02°C y 0,20°C con tasas superficiales de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, respectivamente.

En promedio la temperatura a la cual operó el FLA piloto a las diferentes tasas superficiales estuvo sobre los 26°C; sin embargo se observa rendimientos diferentes; tal que a densidades máximas de Coliformes termotolerantes al ingreso del FLA piloto con tasa superficial aplicada de 0,008 m³/m².h, se obtuvo 0,74log, 0,78 log, 0,80 log y 1,28log de remoción.

Estos resultados, concuerdan con lo sustentado por otros autores, respecto a que la temperatura ejerce efecto importante en el desarrollo de la capa biológica; pero el rendimiento del FLA es el resultado de la intervención de otros factores decisivos como la tasa de filtración aplicada^(17, 33,34).

Como los organismos autótrofos, las algas necesitan luz para sus procesos fotosintéticos y por ello puedan ser casi totalmente inactivadas en el agua sobrenadante cuando las estructuras de filtro están cubiertas.

El desarrollo de especies filamentosas de algas en el lecho filtrante contribuye a la formación de la capa biológica, cuyo contenido zoogeleal forma un medio para la captura y la proliferación de plancton, diatomeas y otras formas de vida, mejorando así el cernido y la adsorción.

Los microorganismos patógenos incluyendo virus y bacterias, y los quistes de enteroparásitos puede ser removido eficazmente con los filtros lentos de arena. Esto se explica en parte por la tasa de filtración lenta del agua y la arena fina que se usa, pero también se atribuye a los mecanismos biológicos de la capa biológica y dentro de las capas superiores del lecho de arena⁽¹⁷⁾.

5.4 Efecto del pH

Con la disminución de la temperatura a la salida del FLA piloto, el crecimiento de los microorganismos junto con la descomposición de sustancias orgánicas, así como la actividad respiratoria también disminuye, como parte del metabolismo; por lo que en el efluente se reporta un aumento del pH por la reducción del nivel de dióxido de carbono⁽³¹⁾.

En el proceso de tratamiento de aguas residuales de efluentes secundarios la reducción del contenido de los microorganismos se rige por el tiempo de retención en el FLA piloto durante el tratamiento, la composición química de los residuos y su estado de degradación. El efecto de las fuerzas antagónicas, durante el proceso, como la flora biológica, el pH y la temperatura se encuentran entre los factores poco perceptibles y menos entendidos⁽¹⁷⁾.

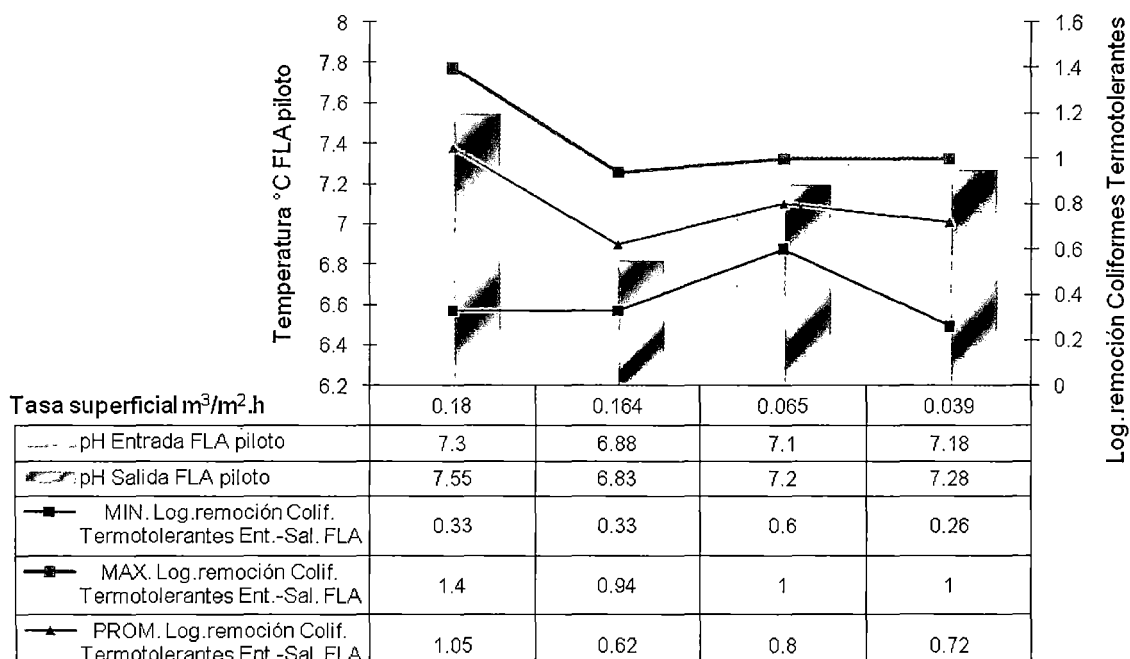


Gráfico 9. Correlación de la variación del pH, entre el ingreso y salida del FLA piloto, frente al Tiempo de retención durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008

Los valores promedios de pH entre la entrada y salida al FLA con tasas superficiales de 0,18 m³/m².h, 0,065 m³/m².h y 0,039 m³/m².h, presentan un incremento de 0,25, 0,10 y 0,10 unidades de pH, respectivamente; a la tasa superficial de 0,039 m³/m².h se reportó un decaimiento de 0,05.

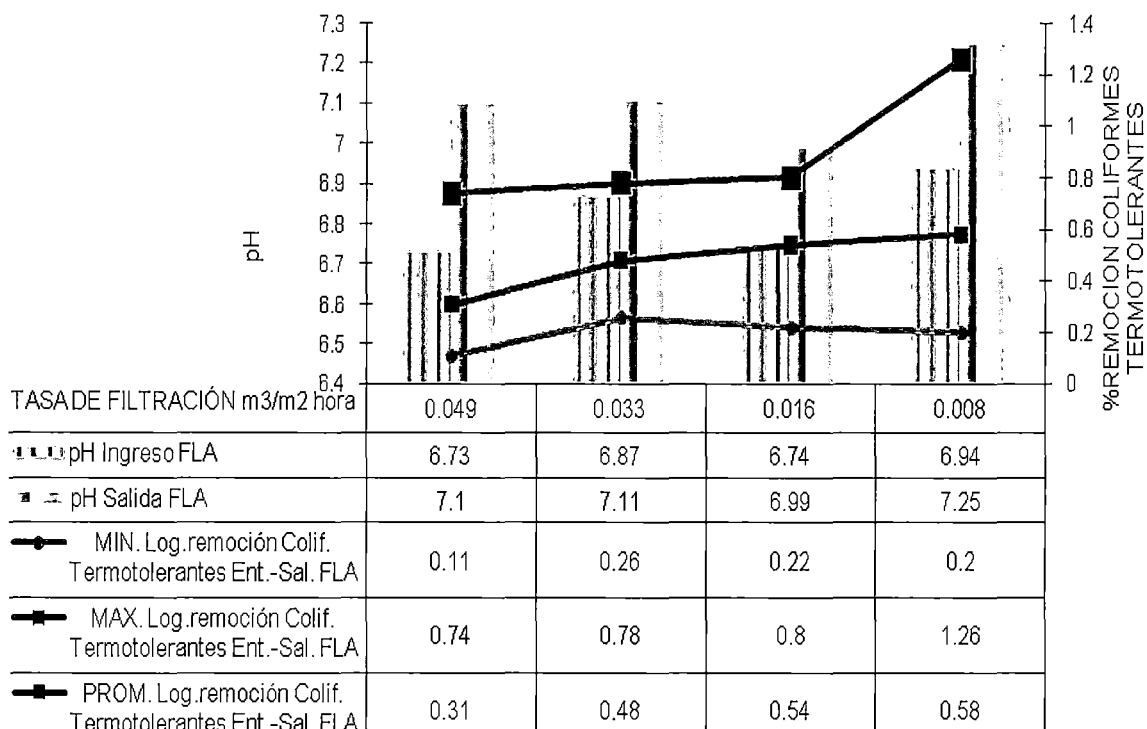


Gráfico 10. Efecto del pH en la remoción de Coliformes termotolerantes en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

Los valores promedios de pH entre la entrada y salida al FLA con tasas superficiales de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, presentan un incremento de 0,37, 0,24, 0,25 y 0,31 unidades de pH, respectivamente.

5.5 Remoción de Carga Orgánica

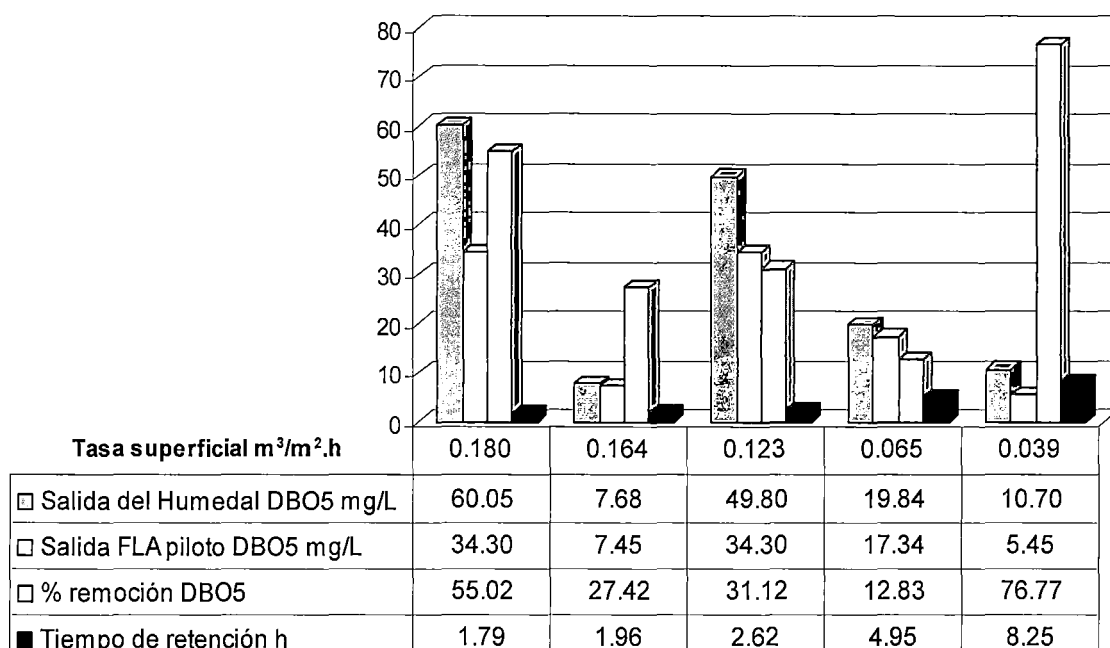


Gráfico 11. Porcentajes de remoción de Coliformes termotolerantes y DBO5 en el FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Febrero 2008 - Noviembre 2008

La máxima carga promedio de DBO₅ reportada al ingreso del FLA piloto fue de 60,05 mg/L, consiguiéndose un porcentaje de remoción de 55,02% con una tasa superficial de 0,18 $m^3/m^2.h$, la mínima carga promedio de DBO₅ al ingreso del FLA piloto fue 7,68 mg/L, consiguiéndose un porcentaje de remoción de 27,42% con una tasa superficial de 0,164 $m^3/m^2.h$; y con la tasa superficial de 0, 039 $m^3/m^2.h$ se consiguió una remoción del 76,77% con una DBO₅ de 10,70mg/L, esta remoción se debió a la oxidación de la materia carbonácea en la película biológica y en la superficie del filtro de arena ⁽¹³⁾.

Estudios iniciales ⁽⁴⁰⁾, demostraron una eficiencia de remoción de DBO₅ de 60% a 65% en efluentes de tratamientos secundarios con el uso de la Filtración Lenta en Arena; otros autores reportaron de 90 al 96% ^(15, 19,31).

Los resultados obtenidos en el presente estudio son comparables al porcentaje de remoción de 79% a 92% obtenido con un filtro de arena que operó con un medio filtrante de 135cm, 105cm y 55 cm de profundidad y tasa superficial de 0,04 a 0,40 m³/m².h; respectivamente ⁽¹⁶⁾, evidenciándose que a tasas superficiales menores se obtienen mayores porcentajes de remoción de DBO₅ ⁽⁴¹⁾. Un porcentaje de remoción de 62% se obtuvo en el efluente de un filtro de arena, que operó con un medio filtrante de 75cm de profundidad y tasa superficial de 6,25 m³/m².h ⁽²⁹⁾.

En estudio realizado en filtro de arena que operó con un medio filtrante de 84 cm de profundidad, se obtuvo en el efluente una remoción del 86% de DBO₅, con una tasa superficial de 0,16m/h ⁽³³⁾.

En Filtros lentos de 20cm y 75 cm de profundidad operando a tasa de filtración de 150m³m⁻²d⁻¹, se obtuvieron porcentajes de remoción de DBO₅ de 42% y 62%, respectivamente ⁽³⁷⁾.

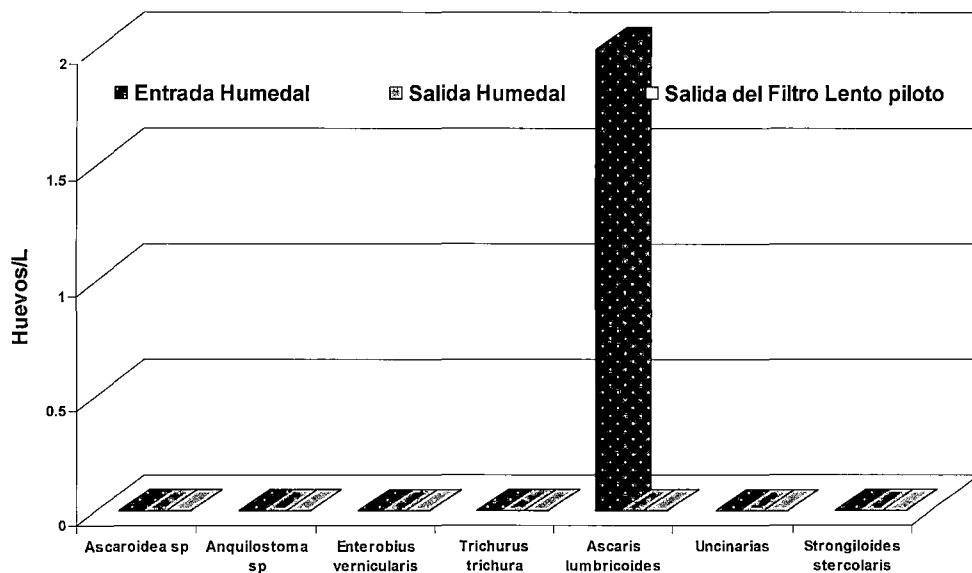
Los filtros lentos de arena pueden ser aplicados eficazmente como tratamiento terciario para efluentes secundarios, con una remoción de DBO₅ de 70 a 76%^(4,12) y 89%⁽³⁸⁾; estos valores reportados son muy similares al obtenido en el presente estudio cuando se aplicó una tasa superficial de 0,039 m³/m².h.: 76,77%.

5.6 Remoción de Parásitos

La medición de este parámetro no fue objeto de estudio del presente trabajo, dado que el Humedal artificial logra remover eficazmente estos organismos ⁽¹⁷⁾; sin embargo a modo de complementar el estudio se tomaron muestras para realizar los análisis respectivos, durante la aplicación de dos tasas superficiales.

5.6.1 Aplicando una tasa superficial de 0,049 m³/m². h

Se realizaron 02 análisis de parásitos a la entrada y salida del Humedal artificial y Salida del FLA piloto.

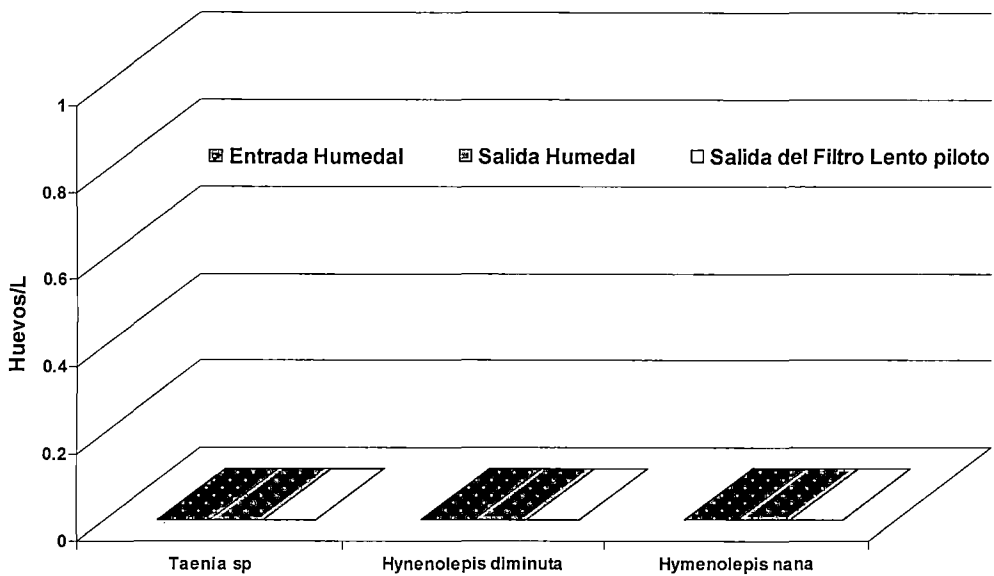


Gráfica 12. Remoción de Nemátodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,049 m³/m².h

Al ingreso del Humedal se reportó 0 huevos/L de *Anquilostoma sp*, *Enterobius vermicularis*, *Trichuris trichura*, *Ascaris lumbricoides*, *Uncinarias*, *Strongiloides stercoralis* y 2 huevos/L de *Ascaris lumbricoides*.

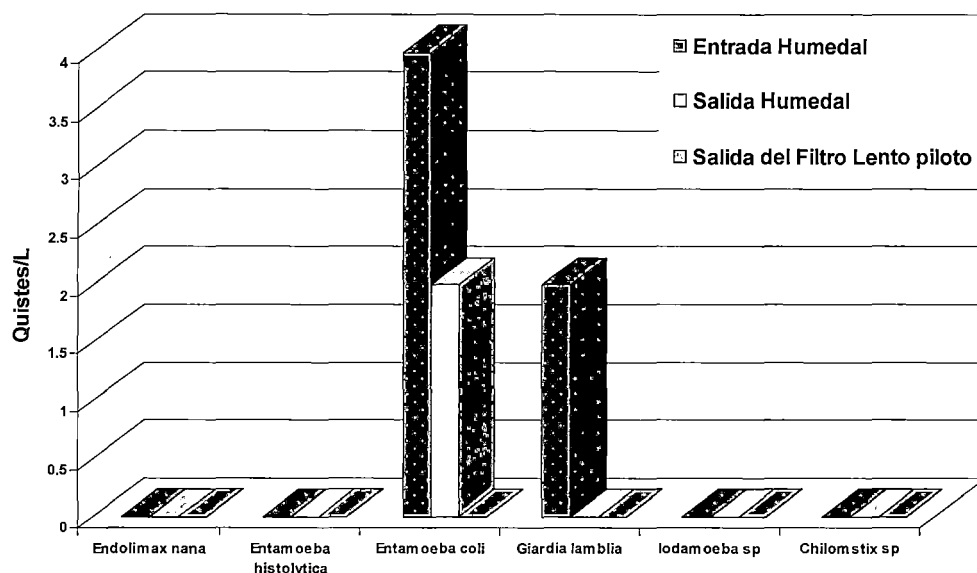
A la salida del Humedal se reportó 0 huevos/L de *Ascaris lumbricoides*, *Anquilostoma sp*, *Enterobius vermicularis*, *Trichuris trichura*, *Ascaris lumbricoides*, *Uncinarias* y *Strongiloides stercolaris*.

A la salida del Filtro Lento Piloto operando con una tasa de filtración de 0,049 m³/m².h se reportó 0 huevos/L de *Ascaris lumbricoides*, *Anquilostoma sp*, *Enterobius vermicularis*, *Trichuris trichura*, *Ascaris lumbricoides*, *Uncinarias* y *Strongiloides stercolaris*.



Gráfica 13. Remoción de Céstodos en el FLA piloto a una tasa de superficial de 0,049 m³/m².h

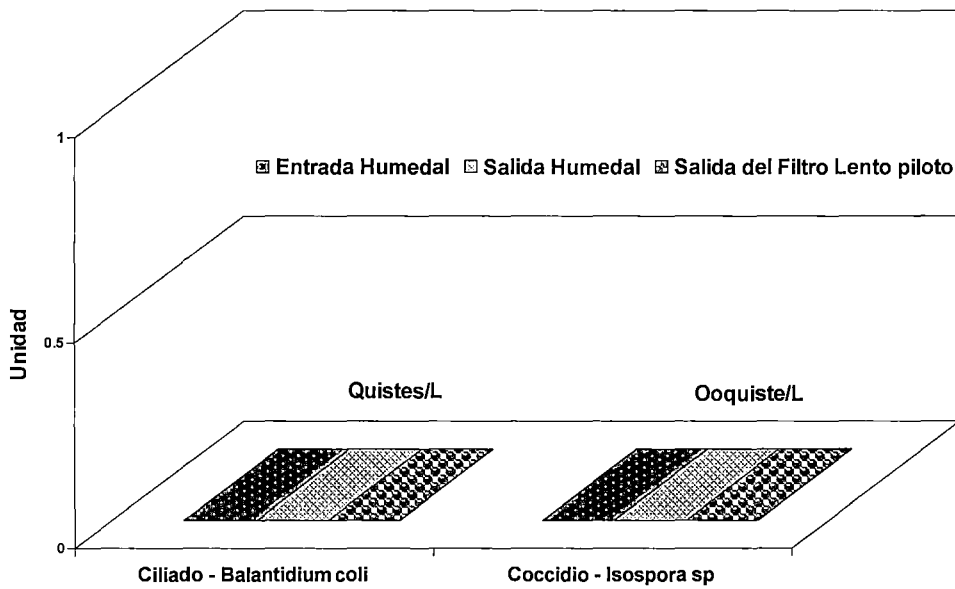
Al ingreso del Humedal, salida del Humedal y salida del Filtro Lento pilotos operando con una tasa de filtración de 0,049 m³/m².h se reportó 0 huevos/L de *Taenia sp*, *Hymenolepis diminuta*, *Hymenolepis nana*.



Gráfica 14. Remoción de Protozoarios en el FLA piloto a una tasa superficial de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Al ingreso del Humedal, salida del Humedal y salida del Filtro Lento piloto operando con una tasa de filtración de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ se reportó 0 Quistes/L de *Endolimax nana*, *Entamoeba histolytica*, *Iodamoeba sp* y *Chilomastix sp*.

En cuanto a *Entamoeba coli* se reportó 4 Quistes/L a la entrada del Humedal, 2 Quistes/L a la salida del Humedal y 0 Quistes/L a la salida del Filtro Lento piloto operando con una tasa de filtración de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$; en cuanto a *Giardia lamblia*, éste estuvo presente a la entrada del Humedal con 2 Quistes/L y a la salida del Humedal y salida del Filtro Lento piloto operando con una tasa de filtración de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ se reportó 0 Quistes/L.



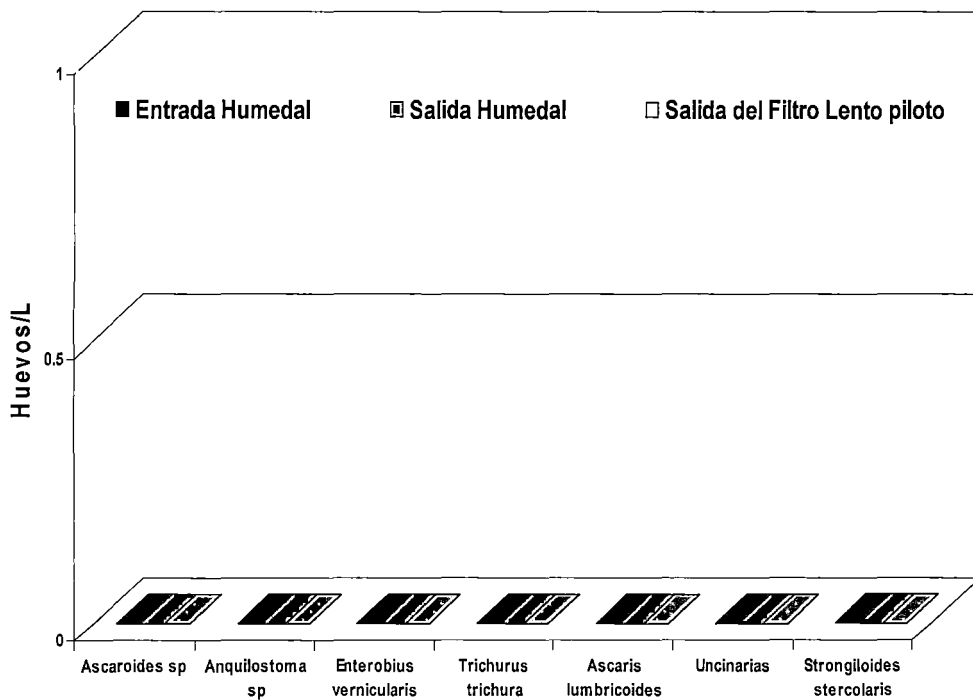
Gráfica 15. Remoción de ciliados y Coccidios en el FLA piloto a una tasa superficial de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

A la entrada del Humedal, Salida del Humedal y salida del Filtro Lento piloto operando con una tasa de filtración de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ no se reportó presencia de *Balantidium coli* e *Isospora sp*.

5.6.2 Aplicando una tasa superficial de 0,008 m³/m². h

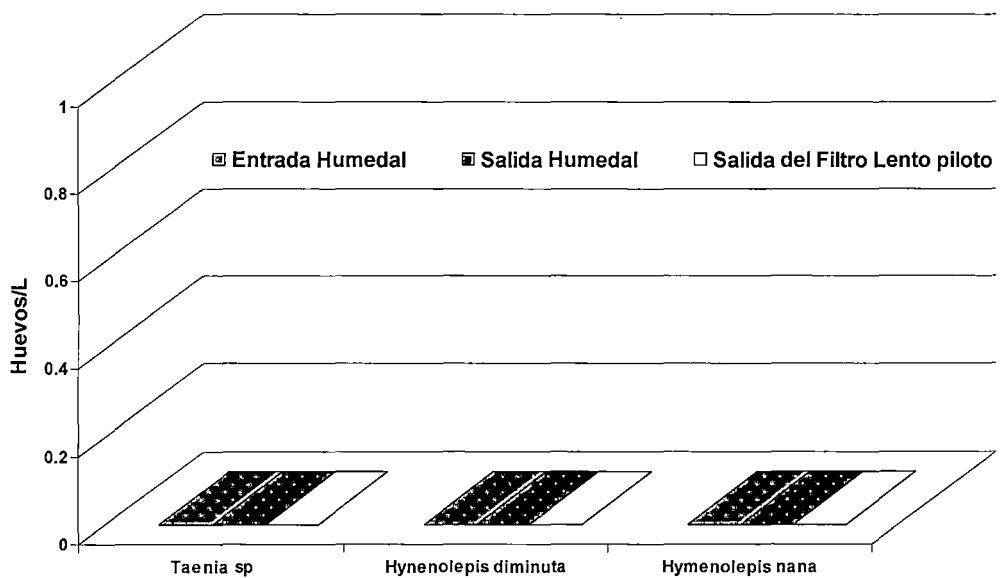
Se realizó 01 análisis de parásitos a la entrada y salida del Humedal artificial y Salida del FLA piloto.

Al ingreso del Humedal, salida del Humedal y salida del Filtro Lento piloto se reportó 0 huevos/L de *Ascaris lumbricoides*, *Anquilostoma sp*, *Enterobius vermicularis*, *Trichuris trichura*, *Ascaris lumbricoides*, *Uncinarias* y *Strongiloides stercoralis*.



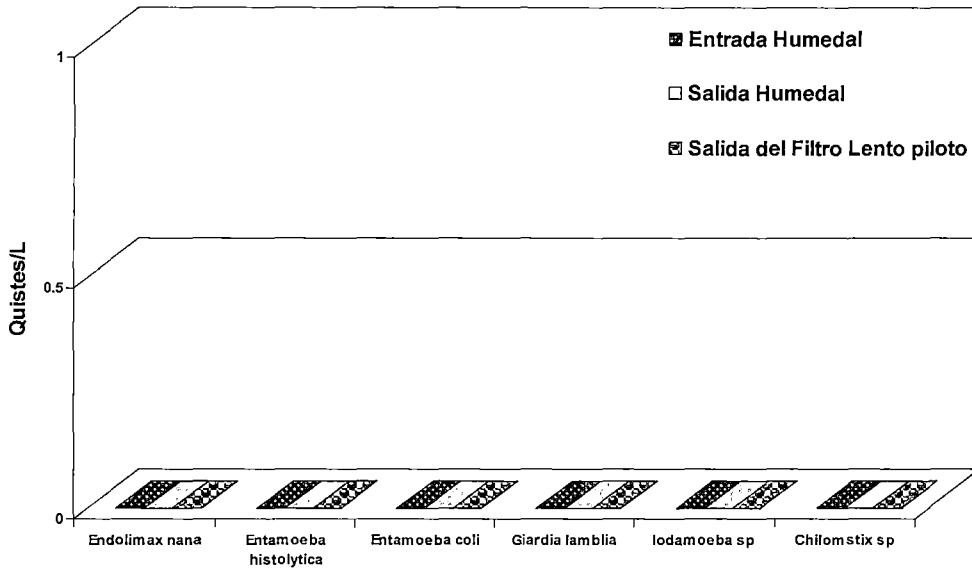
Gráfica 16. Remoción de Nemátodos en el FLA piloto a una tasa superficial de 0,008 m³/m².h

Al ingreso del Humedal, salida del Humedal y salida del Filtro Lento pilotos operando con una tasa de filtración de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ se reportó 0 huevos/L de *Taenia sp*, *Hymenolepis diminuta*, *Hymenolepis nana*.



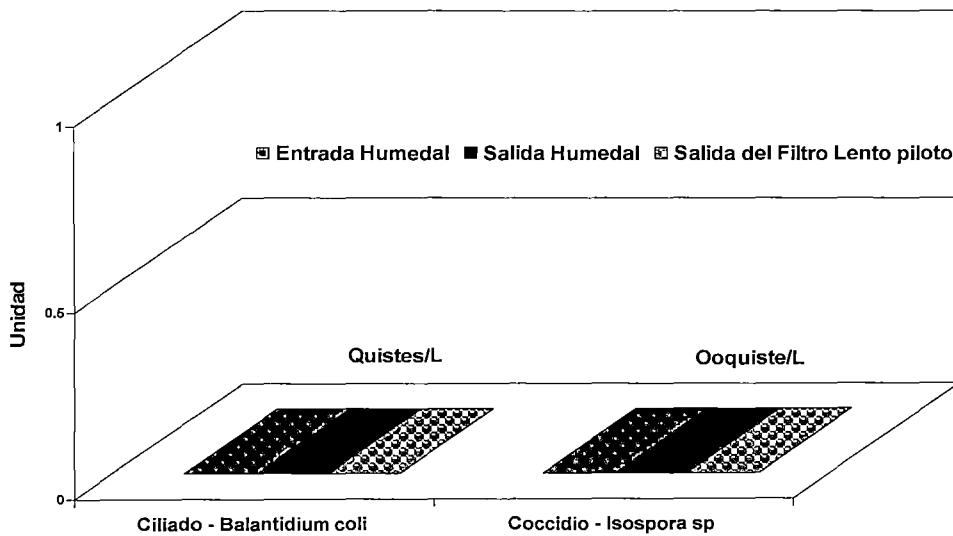
Gráfica 17. Remoción de Céstodos en el FLA piloto a una tasa superficial de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Al ingreso del Humedal, salida del Humedal y salida del Filtro Lento pilotos operando con una tasa de filtración de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ se reportó 0 Quistes/L de *Endolimax nana*, *Entamoeba histolytica*, *Entamoeba coli*, *Giardia lamblia*, *Iodamoeba sp* y *Chilomastix sp*.



Gráfica 18. Remoción de Protozoarios en el FLA piloto a una tasa superficial de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

A la entrada del Humedal, Salida del Humedal y salida del Filtro Lento piloto operando con una tasa de filtración de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ no se reportó presencia de *Balantidium coli* e *Isospora sp.*



Gráfica 19. Remoción de Ciliados y Coccidios en el FLA piloto a una tasa superficial de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

5.7 Remoción de Coliformes Termotolerantes

Las tasas superficiales de $0,065\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,039\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ reportaron los mayores logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes a densidades máximas.

Si bien es cierto que las tasas superficiales de $0,065\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,039\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ reportaron 1 logaritmo de remoción de Coliformes termotolerantes en ambos casos; los valores de los porcentajes de remoción obtenidos fueron de 40,09% y 18,86%, respectivamente; fueron muy diferentes, esto debido a que la densidad microbiológica al ingreso del FLA piloto es menor a tasas superficiales mayores dado el efecto dilución.

Las densidades máximas de Coliformes termotolerantes obtenidos en el efluente del FLA piloto fueron: $2 \times 10^5 \pm 9 \times 10^4$ NMP/100 ml, $7 \times 10^4 \pm 3 \times 10^4$ NMP/100 ml, 2×10^6 NMP/100 ml, $5 \times 10^4 \pm 2 \times 10^4$ NMP/100 ml y $9 \times 10^3 \pm 3 \times 10^3$ NMP/100 ml con tasas superficiales aplicadas de $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,164 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,123 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,065 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, respectivamente.

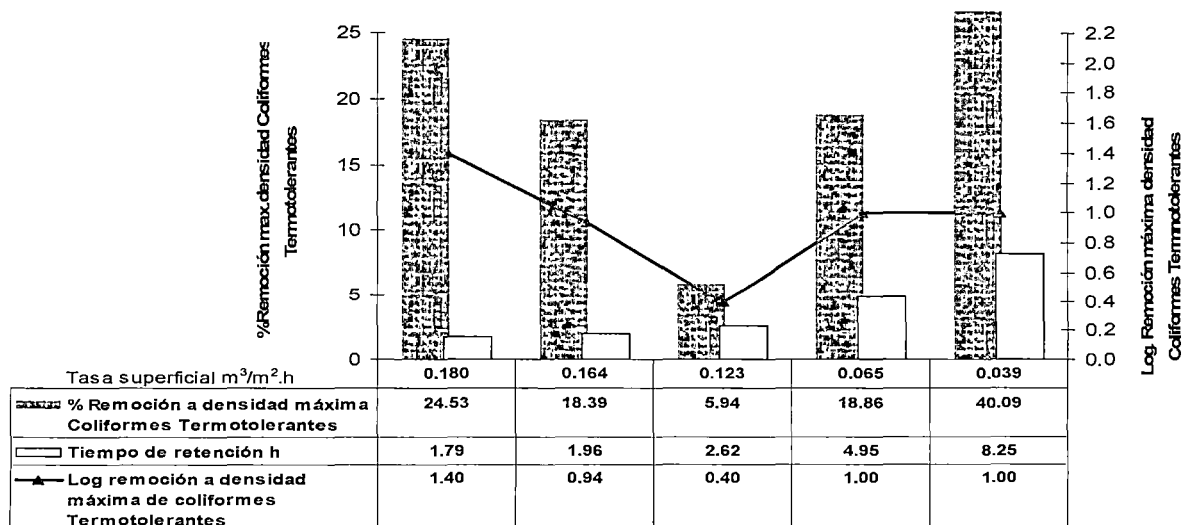


Gráfico 20. Remoción de Coliformes termotolerantes a densidad máxima de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008

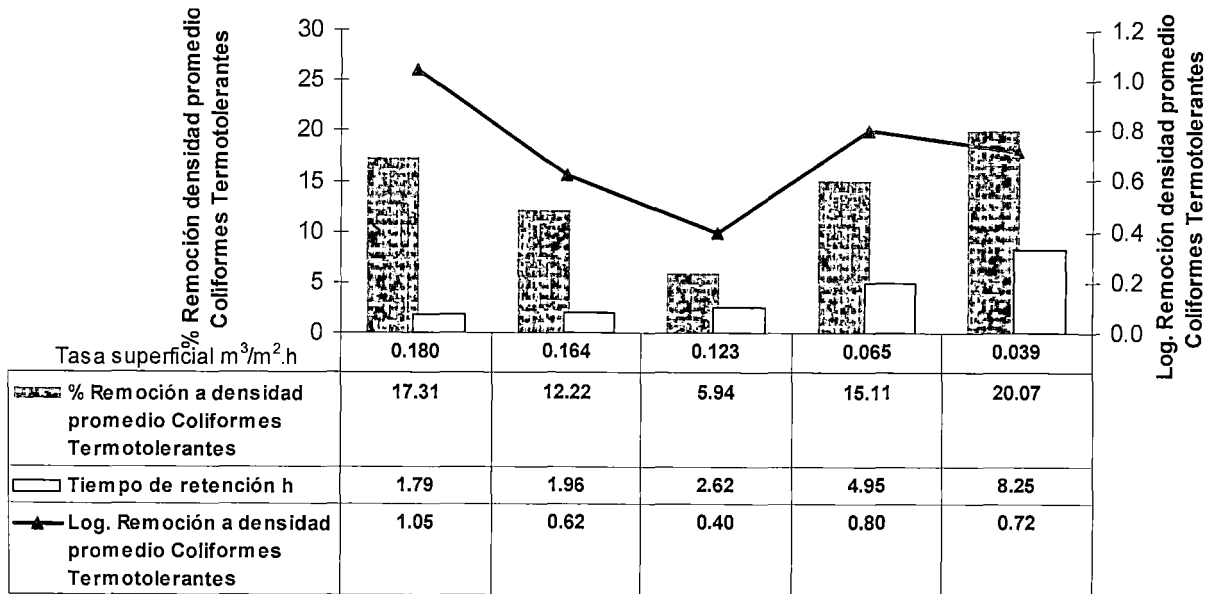


Gráfico 21. Remoción de Coliformes termotolerantes a densidad promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008

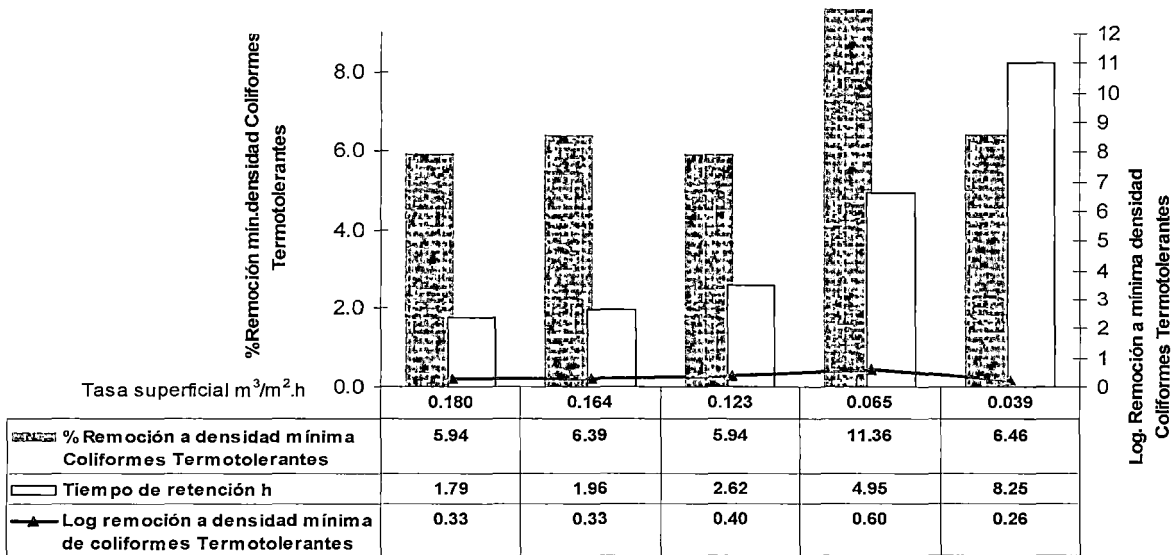


Gráfico 22. Remoción de Coliformes termotolerantes a densidad mínima de ingreso al FLA piloto, durante la Fase I del estudio, Enero a Noviembre 2008

Los mayores valores reportados de remoción de Coliformes termotolerantes a densidades promedio fueron las obtenidas con tasa superficial aplicada de $0,065\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,039\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$: 15,11% y 20,07%; y 0,80log y 0,72log; respectivamente, lo cual demuestra la influencia de la tasa de filtración en la remoción de bacterias⁽⁵⁾, lo cual corrobora los estudios realizados donde demuestran que al disminuirse la tasa superficial aplicada se incrementan la eficiencia del Filtro Lento en la remoción de Coliformes termotolerantes ^(13,26).

A densidades mínimas de Coliformes termotolerantes se obtuvieron porcentajes de remoción de 5,94%, 6,39%, 5,94%, 11,36% y 6,46% a tasas superficiales aplicadas de $0,18\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,164\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,123\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,65\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,039\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, respectivamente; los cuales en términos de logaritmos de remoción son 0,33log, 0,33log, 0,40log, 0,60 log y 0,26log.

Dado los resultados obtenidos en la Fase I se procedió a ejecutar la Fase II con la aplicación de cuatro diferentes tasas superficiales: $0,049\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,033\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,016\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,008\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$; a fin de evaluar si la aplicación de tasas superficiales menores favorecen una mayor remoción de Coliformes termotolerantes.

Las tasas superficiales de $0,049\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,033\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,016\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,008\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ tuvieron un tiempo de retención de 6,56 h, 9,75 h, 20,10 h y 40,21 h, respectivamente.

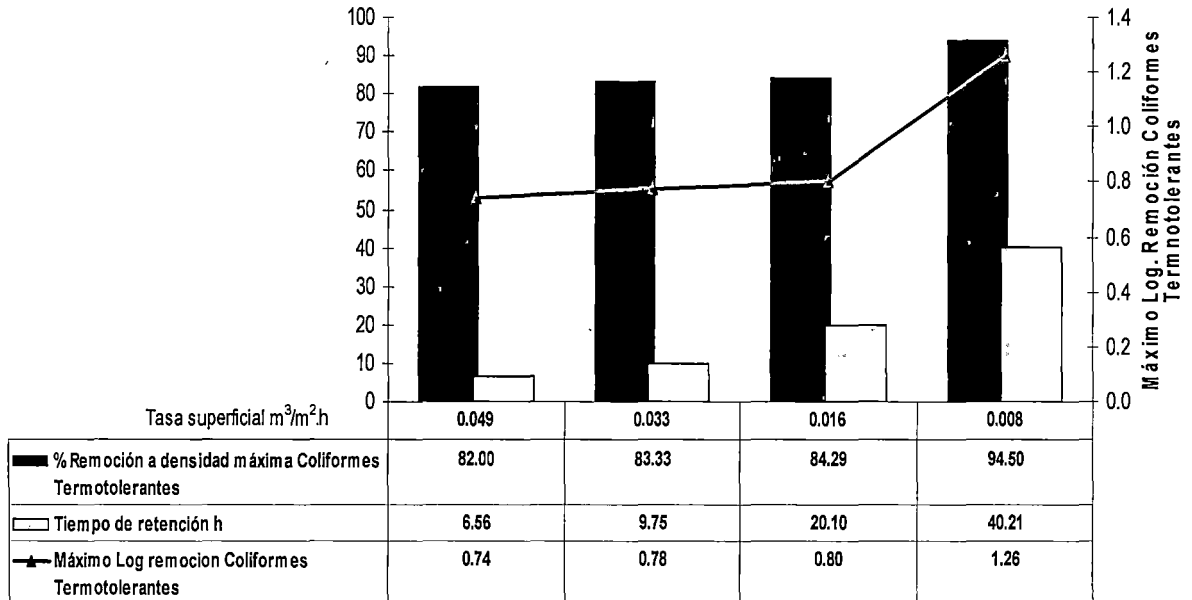


Gráfico 23. Efecto de la tasa superficial en la remoción de Coliformes termotolerantes a densidades máximas de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

Los porcentajes de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos fueron 82%, 83,33%, 84,29% y 94,50% con la aplicación de tasas superficiales de $0,049m^3/m^2 \cdot h$, $0,033m^3/m^2 \cdot h$, $0,016m^3/m^2 \cdot h$ y $0,008m^3/m^2 \cdot h$, respectivamente.

Los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos fueron 0,74log, 0,78log, 0,80log y 1,26log con la aplicación de tasas superficiales de $0,049m^3/m^2 \cdot h$, $0,033m^3/m^2 \cdot h$, $0,016m^3/m^2 \cdot h$ y $0,008m^3/m^2 \cdot h$, respectivamente.

Con los resultados obtenidos evidencia la influencia de la tasa de filtración en la remoción de bacterias ⁽⁴⁾, lo cual es concordante con los resultados de estudios similares donde se demuestra que al disminuirse la tasa superficial aplicada se incrementan la eficiencia del Filtro Lento en la remoción de Coliformes termotolerantes ^(12,31).

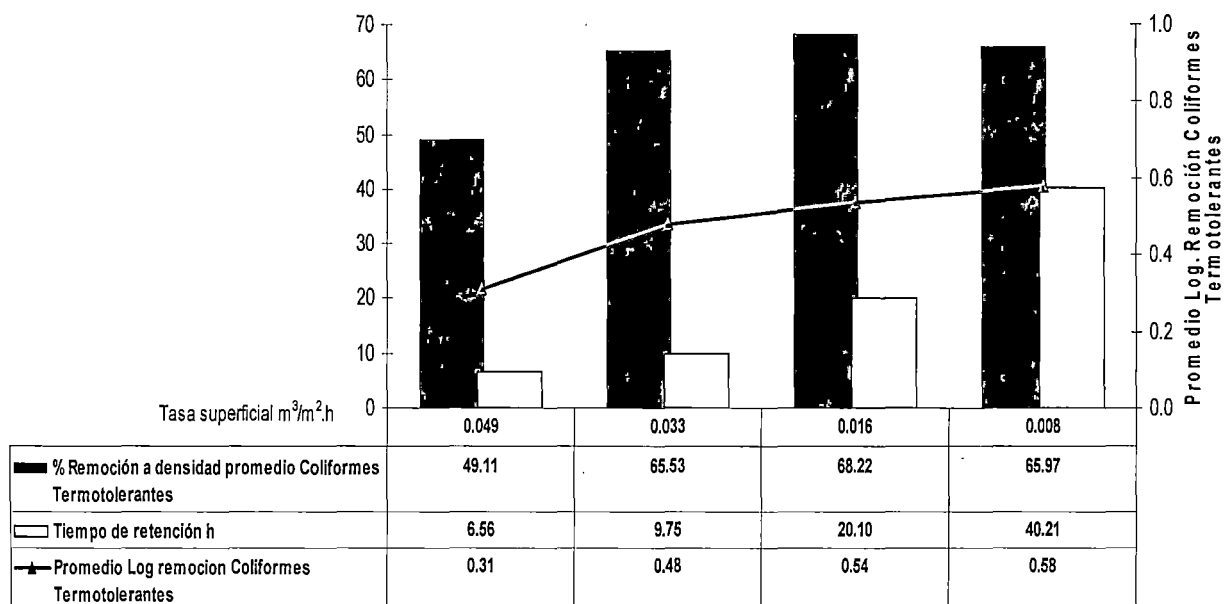


Gráfico 24. Efecto de la tasa superficial en la remoción de Coliformes termotolerantes a densidad promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

El efecto de las diferentes tasas superficiales aplicadas al FLA piloto respecto a la remoción de Coliformes termotolerantes a densidad promedio reportó una remoción de Coliformes termotolerantes de 68,22% a la tasa superficial de 0,016 $m^3/m^2 \cdot h$, valor ligeramente mayor a la obtenida con la tasa superficial de 0,008 $m^3/m^2 \cdot h$; 65,97%, seguida por la tasa superficial de 0,033 $m^3/m^2 \cdot h$ con 65,53% de remoción de Coliformes termotolerantes.

En términos de logaritmos de remoción se obtuvo 0,31log, 0,48log, 0,54log y 0,58log con tasas superficiales aplicadas de 0,049 $m^3/m^2 \cdot h$ y 0,033 $m^3/m^2 \cdot h$, 0,016 $m^3/m^2 \cdot h$ y 0,008 $m^3/m^2 \cdot h$, respectivamente.

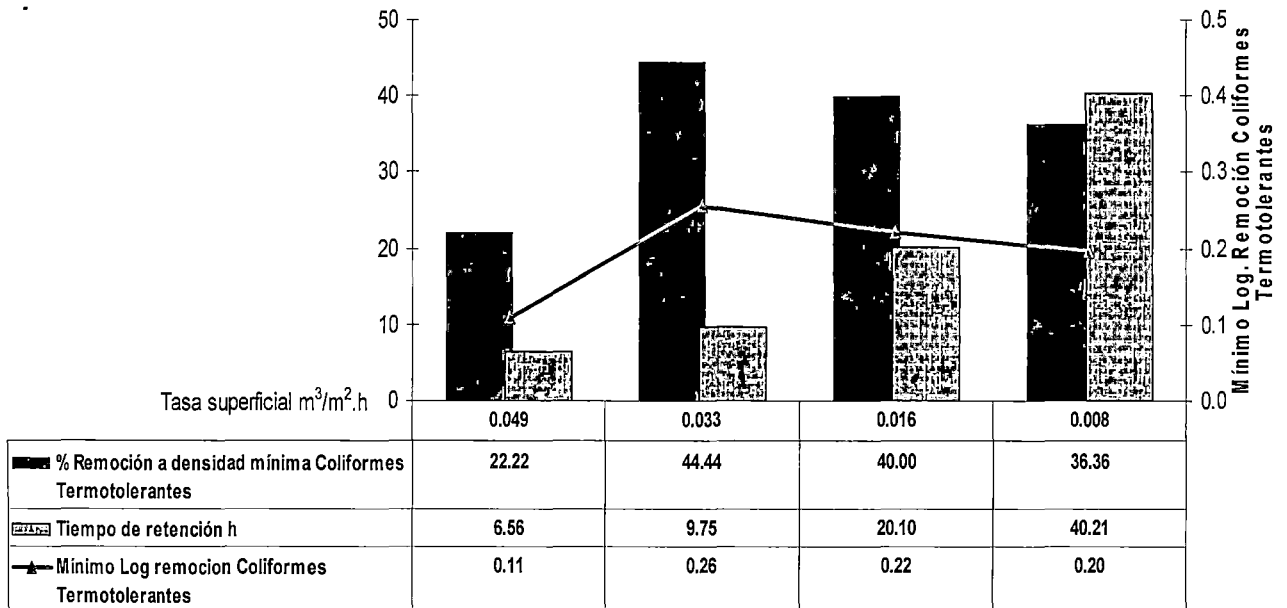


Gráfico 25. Efecto de la tasa superficial en la remoción de Coliformes termotolerantes a densidades mínimas de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

A densidades mínimas de Coliformes termotolerantes se obtuvieron porcentajes de remoción de 22,22%, 44,44%, 40% y 36,36% a tasas superficiales aplicadas de $0,049m^3/m^2 \cdot h$ y $0,033m^3/m^2 \cdot h$ $0,016m^3/m^2 \cdot h$ y $0,008m^3/m^2 \cdot h$.

En términos de logaritmos de remoción se obtuvo 0,11log, 0,26log, 0,22log y 0,21log con tasas superficiales aplicadas de $0,049m^3/m^2 \cdot h$, $0,033m^3/m^2 \cdot h$, $0,016m^3/m^2 \cdot h$ y $0,008m^3/m^2 \cdot h$, respectivamente.

Tabla 10 Densidad de Coliformes termotolerantes en el efluente del FLA piloto

	Tasa superficial $m^3/m^2 \cdot h$			
	0,049	0,033	0,016	0,008
Media geométrica NMP/100ml	5 295,09	5 852,68	7 846,97	4 584,15
Desviación estándar	±1 270,37	±2867,16	±1 666,67	±3 125,17

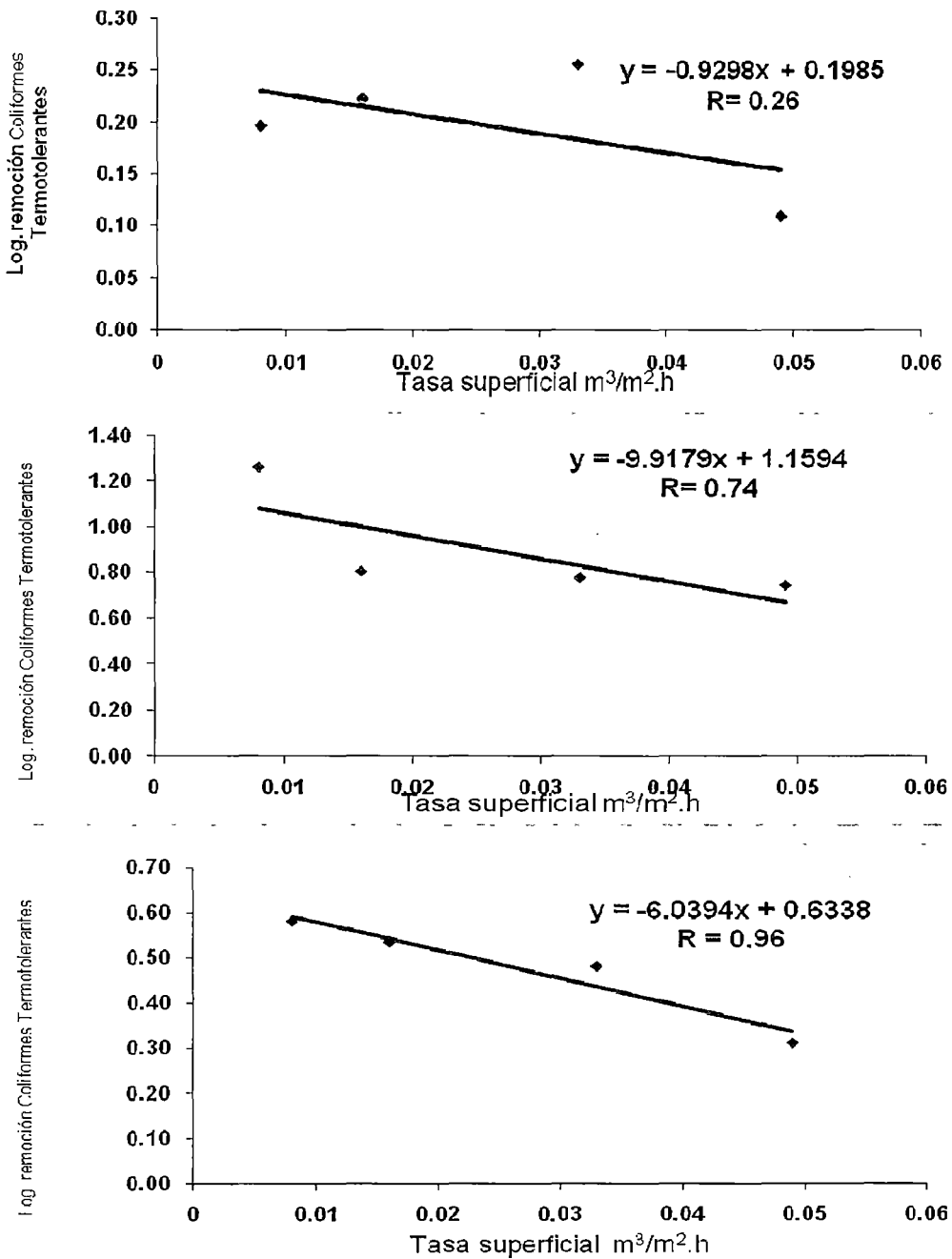


Gráfico 26. Grado de asociación entre la tasas superficiales y la remoción de Coliformes termotolerantes a densidad mínima, máxima y promedio de ingreso al FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero a Marzo 2009

Del análisis de correlación entre la tasa superficial aplicada y los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes se obtiene índices de correlación de 0,26, 0,76 y 0.96 a densidades mínima, máxima y promedio de Coliformes termotolerantes al ingreso del FLA piloto.

De los índices de correlación se interpreta que el grado de asociación entre los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes y la tasa superficial aplicada son positivas a densidades mínima, máxima y promedio de Coliformes termotolerantes al ingreso del FLA piloto; es decir a medida que la tasa superficial disminuye los logaritmos de remoción aumentan. El grado de asociación entre los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes y las tasas superficiales aplicadas al FLA piloto es débil por presentar un valor de 0,26, lo cual se sustenta en la dispersión ocasionada por uno de los datos a la tasa superficial de 0,033 m³/m².h.

En resumen, el rendimiento del FLA piloto respecto a la remoción de Coliformes termotolerantes se incrementa con la disminución de la tasa superficial aplicada, lo cual es consistente con lo reportado en el estudio realizado sobre el efecto de la tasa superficial en la eficiencia de remoción de Coliformes termotolerantes, encontrándose que al disminuir tasa superficial aplicada de 0,6 m³/m².h a 1,2 m³/m².h para distintas profundidades de arena: de 73,91% a 61,96% a 50cm, de 88,04% a 41,30% a 75cm y de 91,40% a 73,91% a 100cm ⁽²⁷⁾, esta eficiencia además se sustenta porque en aguas residuales domésticas a altos caudales existe una baja concentración de microorganismos y cuando el caudal decrece la concentración de microorganismos se incrementa significativamente ^(23,37,41).

El incremento de la tasa superficial da lugar a un incremento del logaritmo de remoción de Coliformes termotolerantes, lo cual era lo esperado y que además es consistente con la literatura ⁽¹⁴⁾.

De los resultados obtenidos en el presente estudio se evidencia que de las tasas superficiales aplicadas de 0,049 m³/m².h 0,033 m³/m².h 0,016 m³/m².h y 0,008

$\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, en esta última se obtuvo los mayores porcentajes de remoción, los cuales oscilaron entre 36,36% y 94,50%, valores comparables a los obtenidos en el estudio realizado utilizando Filtros Lentos de arena de 30,48cm, 45,72cm y 61,96cm de profundidad, donde se reportó porcentajes de remoción de bacterias coliformes de 6,2%, 29,5% y 33,3%, respectivamente⁽³¹⁾.

Los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con las tasas superficiales aplicadas de 0,049 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 0,033 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 0,016 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y 0,008 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ fueron de 0,74log, 0,78log, 0,80log y 1,26log, respectivamente; sobre lo cual algunos autores reportan un rendimiento del orden de 2 log de remoción de Coliformes termotolerantes^(6,11).

El resultado de experimentos realizados, con rangos de carga hidráulica de 0,08 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ a 0,24 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, demostró que la filtración lenta es de hecho unidad de tratamiento terciario muy efectiva lográndose una remoción de coliformes totales de 99%⁽³⁸⁾.

Como se reportó en la literatura la mayor parte de la purificación observado ocurre en la capa superior del lecho de arena; dado que cuando las muestras fueron tomadas a 84cm de profundidad no fueron significativamente de mejor calidad que las muestras tomadas a una profundidad de 35cm de arena. Se cree que es posible disminuir más la profundidad mínima de arena sugerida en la literatura que es de 48cm^(6,12,19), sin embargo otros autores manifiestan que uno de los factores al que puede atribuirse los bajos niveles de remoción microbiológica por el FLA es la extensa profundidad del medio filtrante^(17,26,33).

Los resultados concluyentes del presente estudio es que los porcentajes de remoción de Coliformes termotolerantes se incrementan al disminuir la tasa superficial aplicada al FLA piloto, aumentado el tiempo de retención el cual ofrece una mayor oportunidad para la adherencia de las partículas a los granos de arena y ser metabolizados en la capa biológica, sumando a ello la profundidad de 50 cm del

lecho filtrante. Esta conclusión es concordante con lo reportado en otras investigaciones, donde determinan que la eficiencia del FLA es independiente del caudal, habiéndose demostrado que la reducción del contenido de los microorganismos se rige por el tiempo de retención en el FLA piloto durante el tratamiento, la composición química de los residuos y su estado de degradación, y las altas tasas de filtración pueden bajar el periodo de contacto entre el agua y la purificación de los microorganismos. Estos microorganismos normalmente solo están presentes en la parte superior del lecho, 30 - 40cm. El efecto de las fuerzas antagónicas, durante el proceso, como la flora biológica, el pH y la temperatura se encuentran entre los factores poco perceptibles y menos entendidos⁽¹⁷⁾.

La calidad microbiológica, en términos de Coliformes termotolerantes, del efluente del FLA piloto de flujo continuo califica en la categoría B de las Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura, con las condiciones de reutilización en Irrigación de cereales, cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles.

5.8 Análisis estadístico del rendimiento del FLA piloto para la remoción de Coliformes Termotolerantes

A fin de determinar en forma estadística si existen o no diferencias significativas en cuanto al rendimiento del FLA piloto respecto a la remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con cada las tasas superficiales de 0,049 m³/m².h, 0,039 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h; los datos obtenidos fueron sometidas a análisis estadísticos con un nivel de confianza del 95%.

5.8.1 Determinación del tamaño de la muestra

Cuando el muestreo se hace en una población que tiene una distribución de probabilidad desconocida, la distribución de muestreo de la media muestral seguirá siendo aproximadamente normal con media μ y varianza σ^2 / η , si el tamaño de la muestra η es grande. Este es uno de los teoremas más útiles de la estadística, llamado el teorema del límite central, el enunciado del mismo es el siguiente:

Si X_1, X_2, \dots, X_n es una muestra aleatoria de tamaño n tomada de una población (sea finita o infinita) con media μ y varianza σ^2 , y si X es la media muestral, entonces la forma del límite de la distribución de

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{\eta}}$$

Cuando $\eta \rightarrow \infty$, es la distribución normal estándar.

La aproximación normal de X depende del tamaño de la muestra η . En muchos casos de interés práctico, si $\eta \geq 30$, la aproximación normal será satisfactoria independiente de la forma de la población. Si $\eta \leq 30$, el teorema del límite central funcionará si la distribución de la población no se aparta significativamente de la distribución normal ⁽³⁰⁾.

En la Figura 10 se ilustra la aplicación del teorema del límite central a diferentes poblaciones, estas muestras fueron seleccionadas con diversos tamaños ($n = 2, 4, 6, 8, 16, 32$) de tres distribuciones continuas (normal, uniforme y exponencial).

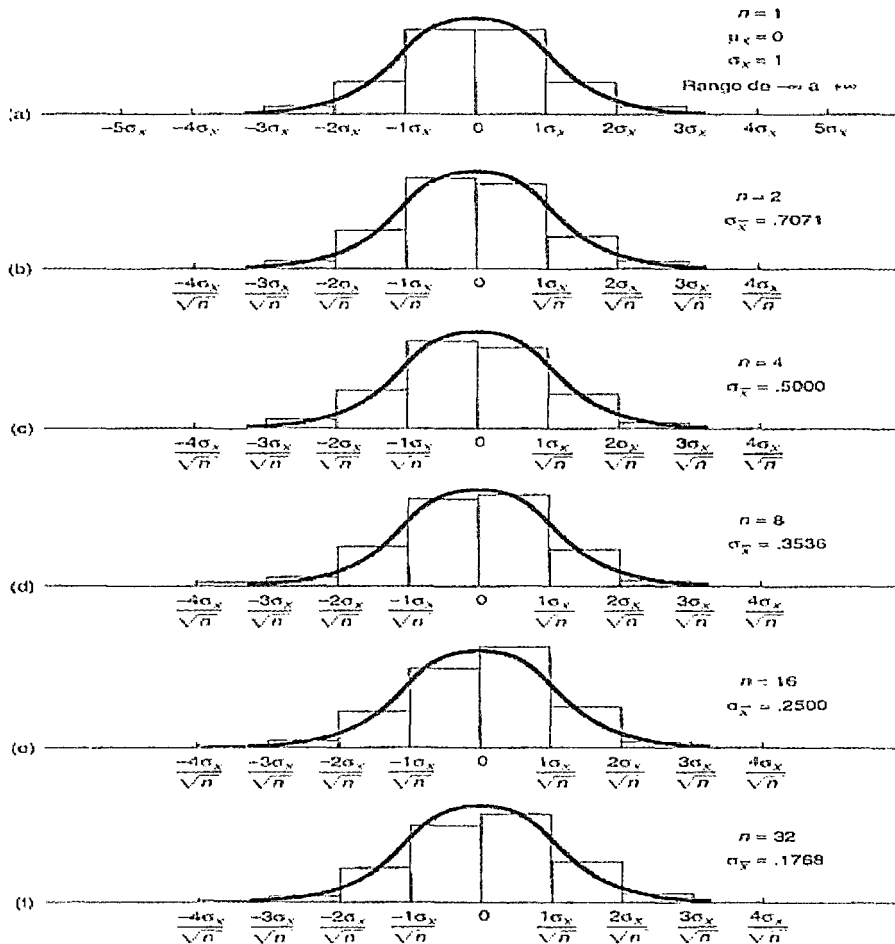


Figura 10. Distribución normal y la distribución de muestreo de la media de 500 muestras de tamaño $n = 2, 4, 6, 8, 16, 32$ ⁽⁵⁾.

De la Figura 10. se resume las siguientes conclusiones:

- Para la mayoría de las distribuciones de la población, sin importar la forma, la distribución de muestreo, de la media tendrá una distribución aproximadamente normal si se seleccionan muestras de al menos 30 observaciones.

- Si la distribución de la población es lo bastante simétrica, la distribución de muestreo de la media será aproximadamente normal si se seleccionan muestras de al menos 15 observaciones.
- Si la población se distribuye normalmente, la distribución de muestreo de la media se distribuirá normalmente sin importar el tamaño de la muestra.

Por lo tanto, antes de aplicar las técnicas estadísticas de comparación múltiple para muestras independientes a fin de evaluar el rendimiento del FLA piloto respecto a la remoción de Coliformes termotolerantes, utilizando diferentes tasas superficiales, se determinará si los datos de las muestras provienen de una población normal.

Tabla 11. Remoción Log. Coliformes termotolerantes obtenidos a diferentes tasas superficiales aplicadas al FLA piloto

N° observaciones	Tasas superficiales m ³ /m ² .h			
	0,033 (T1)	0,016 (T2)	0,008 (T3)	0,049 (T4)
1	0,66	0,56	0,44	0,34
2	0,46	0,26	0,52	0,74
3	0,26	0,46	0,57	0,11
4	0,66	0,74	1,10	0,48
5	0,48	0,48	0,34	0,57
6	0,46	0,37	0,26	0,34
7	0,57	0,76	0,33	0,24
8	0,60	0,13	0,85	0,26
9	0,48	0,41	0,57	0,26
10	0,48	0,52	0,24	0,44
11	0,35	0,57	0,26	0,34
12	0,78	0,66	0,20	0,35
13	0,48	0,76	0,26	0,15
14	0,35	0,62	1,00	0,33
15	0,35	0,24	1,26	0,26
16	0,46	0,66	1,11	0,26
Media	0,49	0,51	0,58	0,34

5.8.2 Pruebas de Normalidad ^(5,24,27)

En base a los datos las 64 observaciones de la Tabla 11, se procede a determinar si los datos siguen una distribución normal aplicando tres técnicas:

5.8.2.1 Histograma

Si los datos son aproximadamente normales, la forma de la gráfica será similar a la de la curva normal superpuesta (esto es, con forma de joroba y simétrica alrededor de la media).

La distribución de los datos en el gráfico muestra que se asemeja a la curva normal teórica; es decir provienen de una población normal.

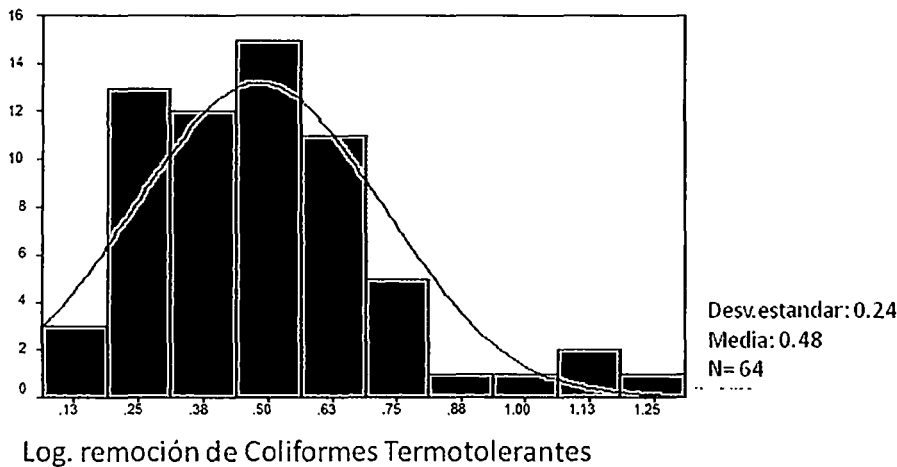


Grafico 27. Histograma de los Logaritmos de remoción obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

5.8.2.2 Intervalo Intercuartil IQR/S

Si los datos son aproximadamente normales, $IQR/S \approx 1.3$. Esta propiedad se cumple para las distribuciones normales si se observa que los valores z que corresponden a los percentiles 75o. y 25o. son 0.67 y -0.67, respectivamente. Puesto que $\approx \sigma = 1$ para una distribución normal estándar (z),

$$IQR/\sigma = [0.67 - (-0.67)]/1 = 1.34.$$

Haciendo el cálculo, en base a los datos de la Tabla IQR obtenemos que $IQR/S = (0,5925-0,2775) / 0,2410 = 1.307$; puesto que este valor es prácticamente igual a 1.3, tenemos la confirmación adicional de que los datos siguen una distribución normal.

Tabla 12. Cálculo Intercuartil IQR/S de Logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

N	válidos	64
	perdidos	16
Desviación estándar	110	0,2410
	25	0,2775
Percentiles	50	0,4600
	75	0,5925

5.8.2.3 Gráfico de probabilidad normal

En una gráfica de probabilidad normal, las observaciones de un conjunto de datos se ordenan y luego se grafican contra los valores esperados estandarizados de las observaciones bajo el supuesto de que los datos están distribuidos normalmente. Si los datos en verdad tienen una distribución normal, una observación será aproximadamente igual a su valor esperado. Por tanto, una tendencia lineal (de línea recta) en la gráfica de probabilidad normal sugiere que los datos provienen de una distribución aproximadamente normal, en tanto que una tendencia no lineal indica que los datos no son normales.

El Gráfico 20 Curva de Probabilidad Normal, muestra que los datos son aproximadamente iguales a sus valores esperados; por tanto, la tendencia de línea recta en la gráfica sugiere que los datos provienen de una distribución aproximadamente normal.

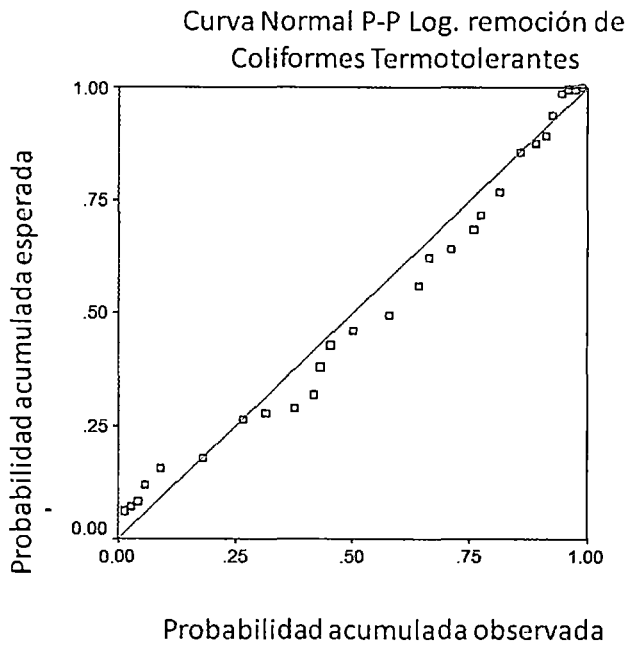


Gráfico 28. Curva de Probabilidad Normal de los Logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

5.8.3 Prueba F ANOVA de una dirección para diferencias en c medias

El objetivo es analizar diferencias entre las medias de los grupos. En ANOVA se subdivide la variación total de las mediciones resultantes en lo que se puede atribuir a diferencias entre los c grupos y lo que se debe al azar o que se puede atribuir a una variación inherente dentro de los c grupos. La variación dentro de grupos se considera error experimental, mientras que la variación "entre grupos" se atribuye a efectos de tratamiento.

Bajo la premisa que las cuatro tasas superficiales aplicadas al FLA piloto representan poblaciones cuyas mediciones resultantes son tomadas de manera aleatoria e independiente, que siguen una distribución normal y tienen varianzas iguales, la hipótesis nula establece que no existen diferencias entre los 04 grupos respecto a los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos en el FLA piloto.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

La hipótesis alternativa establece que existe un efecto de tratamiento; es decir, que al menos una de las tasas superficiales aplicadas difiere respecto a los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos en el FLA piloto.

H_1 : No todas las medias son iguales

Tabla 13 Análisis de varianza de los Logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas 0,008 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,049m³/m².h

	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio (varianzas)	F	Sig.
Entre grupos	0,490	3	0,163	3,094	0,34
Dentro de grupos	3,170	60	0,05283		
Total	3,660	63			

H_0 : no existen diferencias entre los grupos

H_1 : no todos los grupos son iguales

Para el presente estudio, dado que existen tres grados de libertad en el numerador y 60 grados de libertad en el denominador, el valor crítico de F al nivel de significancia de 0,05 es 2,76; el cual se obtiene del ANEXO A.

$F_{U(c-1,n-c)} : 2,76$; para $c=4$ y $n=64$

Rechazar H_0 si $F > F_{U(c-1,n-c)}$, acepto H_1

Rechazar H_1 si $F < F_{U(c-1,n-c)}$, acepto H_0

$3,094 > 2,76$, se rechaza H_0

Debido a que nuestra estadística de prueba calculada $F=3,094$, es mayor que este valor crítico, la hipótesis nula puede ser rechazada. Se puede llegar a la conclusión de que existe una diferencia significativa en los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos en el FLA piloto al aplicar diferentes tasas superficiales.

5.8.4 Comparaciones Múltiples – Tukey Kramer

Habiéndose encontrado las diferencias en las medias de los grupos, es importante determinar qué grupos en particular son diferentes.

El procedimiento de Tukey Kramer nos permite examinar simultáneamente comparaciones entre todos los pares de grupos. El primer paso implicado consiste en calcular las diferencias $X_j - X_{j'}$, (con $j \neq j'$) entre los $c(c-1)/2$ pares de medias. El alcance crítico para el procedimiento Tukey Kramer se obtiene entonces de la cantidad dada en la ecuación:

$$\text{Alcance crítico} = Q_{U(c,n-c)} \sqrt{\frac{\text{CMDG}}{2} \left(\frac{1}{n_j} + \frac{1}{n_{j'}} \right)}$$

Donde:

CMDG es cuadrado medio entre los grupos y n_j es el número de observaciones dentro del grupo

Con el procedimiento de ANOVA se llegó a la conclusión de que hay una diferencia significativa en los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos en el FLA piloto al aplicar diferentes tasas superficiales.

Puesto que existen cuatro grupos, hay $(4)(4-1)/2=6$ posibles comparaciones de pareja que se tienen que tomar en cuenta.

Tabla 14 Comparación Múltiple de Logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con la aplicación de las tasas 0,008 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,049m³/m².h

Grupos de comparación	Diferencia de medias	n	Error estándar	Significancia
X _{T1} -X _{T4}	0,1506	16	0,0812	0,259
X _{T2} -X _{T1}	0,020	16	0,0812	0,099
X _{T2} -X _{T4}	0,1706	16	0,0812	0,165
X _{T3} -X _{T1}	0,089	16	0,0812	0,691
X _{T3} -X _{T2}	0,069	16	0,0812	0,828
X _{T3} -X _{T4}	0,240	16	0,0812	0,023

Solo se necesita obtener un alcance crítico porque los cuatro grupos tienen muestras del mismo tamaño. Para determinar el alcance crítico de la Tabla 13 tenemos que el CMDG= 0,0528 y n_j= 16. Del ANEXO B. se determina que para α=0,05, c=4 y n-c=60, el valor crítico de extremo superior de Q_{U(4,60)} es 3,40. De la ecuación tenemos:

$$\text{Alcance crítico} = 3,4 \sqrt{\frac{0,0528}{2} \left(\frac{1}{16} + \frac{1}{16} \right)} = 0,1953$$

Puesto que:

0,1506 < 0,1953, 0,02 < 0,1953, 0,1706 < 0,1953, 0,089 < 0,1953, 0,069 < 0,1953 y 0,24 > 0,1953, podemos concluir que la aplicación de la tasa 0,008m³/m².h tiene un rendimiento de remoción de Coliformes termotolerantes significativamente mejor que la tasa 0,049m³/m².h pero no existe evidencia de una diferencia significativa entre las comparaciones de las demás tasas superficiales.

6. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como propósito evaluar el rendimiento en la remoción de Coliformes termotolerantes, a escala piloto, de la Filtración Lenta de Arena (FLA) como tratamiento terciario de los efluentes de aguas residuales del tratamiento secundario del sistema de humedales subsuperficial de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNITRAR), la cual trata las aguas residuales domésticas que provienen de los Asentamientos Humanos de El Milagro y El Carmen pertenecientes al distrito de Independencia. La Planta UNITRAR está localizada en el Distrito de el Rímac, Provincia de Lima, Departamento de Lima – Perú.

El Filtro Lento de Arena piloto operó en su primera fase año 2008 por espacio de 08 meses y en una segunda fase año 2009 por espacio de 04 meses. Se investigó el efecto de la tasa superficial sobre la remoción de Coliformes termotolerantes. En la Fase experimental I se utilizó la tasa superficial de 0,18 m³/m².h, 0,164 m³/m².h, 0,123 m³/m².h, 0,065 m³/m².h y 0,039 m³/m².h y en la Fase experimental II se utilizó la tasa superficial de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h.

Los datos obtenidos fueron sometidos al análisis estadístico usando la prueba F de ANOVA y de Comparaciones Múltiples de Tukey Kramer; a fin de averiguar si existían diferencias estadísticas significativas entre los rendimientos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos a diferentes tasas superficiales aplicadas al FLA piloto; previo a estos análisis estadísticos, los datos obtenidos fueron sometidos a Pruebas de Normalidad (Histograma, Intervalo Intercuartil IQR/S y Gráfico de Probabilidad Normal) a fin de determinar si proceden de una distribución aproximadamente normal.

Las principales conclusiones del presente estudio son las siguientes:

6.1 El FLA piloto de flujo continuo fue diseñado utilizando un cilindro en material PVC, con las siguientes características:

Tabla 15 Características de diseño del FLA piloto

FLA piloto	Características
Caja del FLA piloto	Altura 80 cm, ϕ 50 cm, en material PVC
Dispositivo de regulación y control del Filtro	Tubería de PVC, de 1" de diámetro, válvulas de regulación
Sistema de drenaje	Tubería principal (01) y tubería lateral (02), en material PV C
Lecho filtrante	Capa de lecho se soporte (10 cm), malla mosquitera, Capa de arena gruesa (40 cm). El diámetro y coeficiente de uniformidad de la arena fue 0,897 y 1,802, respectivamente

6.2 Los valores promedios de pH entre la entrada y salida al FLA con tasas superficiales de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, presentan un ligero incremento de 0,37, 0,24, 0,25 y 0,31 unidades de pH, respectivamente.; en cuanto a la Temperatura los valores encontrados a la entrada y salida del FLA muestran una disminución mínima de 0,03°C, 0,09°C, 0,02°C y 0,20°C con tasas superficiales de 0,049 m³/m².h, 0,033 m³/m².h, 0,016 m³/m².h y 0,008 m³/m².h, respectivamente.

- 6.3 La disminución de temperatura se interpreta como resultado de las condiciones de aclimatación que sufre a su paso por el lecho filtrante dado el tiempo de retención; donde se llevan a cabo los procesos biológicos, dando lugar a que disminuya las reacciones metabólicas, liberándose dióxido de carbono en el efluente lo cual origina la disminución del pH. Si bien es cierto que la temperatura influye en la formación de la capa biológica del lecho filtrante, no es un factor determinante en el rendimiento del FLA piloto, al igual que el pH.
- 6.4 El rendimiento del FLA piloto en el proceso de tratamiento de las aguas residuales de efluentes secundarios con respecto a la reducción del contenido de los Coliformes termotolerantes y otros microorganismos se rige por el tiempo de retención en el FLA piloto, la composición química de los residuos y su estado de degradación. El efecto de las fuerzas antagónicas, durante el proceso, como la flora biológica, el pH y la temperatura se encuentran entre los factores poco perceptibles y menos entendidos.
- 6.5 La aplicación de la tasa superficial juega un rol importante y definitivo en la eficiencia de la remoción del FLA piloto, lo cual se sustenta con los resultados obtenidos entre Fase I y Fase II del presente estudio, donde los porcentajes de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos a tasas superficiales de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, son mucho mayores a las obtenidas con las tasas superficiales de $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,164 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,123 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,065 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$.
- 6.6 Los porcentajes de remoción de Coliformes termotolerantes, obtenidos en la Fase II se incrementaron de 82%, 83,33%, 84,29% y 94% al disminuirse las tasas superficiales aplicadas de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, respectivamente.

- 6.7 De los resultados obtenidos se observa que la densidad microbiológica presente en el agua residual a tratar juega también un papel importante; aplicando menores tasas superficiales de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ los porcentajes de remoción obtenidos estuvieron entre 22 % y 44% cuando las densidades de Coliformes termotolerantes fueron menores de $\leq 9\ 000 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$; esto se explicaría por el bajo nivel de contaminación y de cantidad de nutrientes presentes en el agua residual, que darían lugar a que el proceso no sea tan eficiente como para densidades de Coliformes termotolerantes mayores a $12\ 000 \text{ NMP}/100\text{mL}$.
- 6.8 Durante la Fase experimental I, la máxima carga promedio de DBO_5 reportada al ingreso del FLA piloto fue de $60,05 \text{ mg/L}$, consiguiéndose un porcentaje de remoción de 55,02% con una tasa superficial de $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, la mínima carga promedio de DBO_5 al ingreso del FLA piloto fue $7,68 \text{ mg/L}$, consiguiéndose un porcentaje de remoción de 27,42% con una tasa superficial de $0,164 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$; y con la tasa superficial de $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ se consiguió una remoción del 76,77% con una DBO_5 de $10,70\text{mg/L}$.
- 6.9 El efecto de la tasa superficial aplicada al FLA piloto es significativo en los porcentajes de remoción de DBO_5 , dado que éste se reduce al incrementarse las tasas superficiales.
- 6.10 Durante la Fase experimental II, se reportó 4 Quistes de *Entamoeba coli*/L al ingreso del FLA piloto y 0 Quistes de *Entamoeba coli*/L a la salida del FLA piloto, lográndose una remoción del 100%; cuando operaba con tasa superficial de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$.
- 6.11 Este efecto del nivel de contaminación del agua residual sobre el rendimiento del FLA piloto, se visualiza también por el débil índice de correlación de 0,42 que existe entre los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes a densidades mínimas con el tiempo de retención en el FLA piloto.

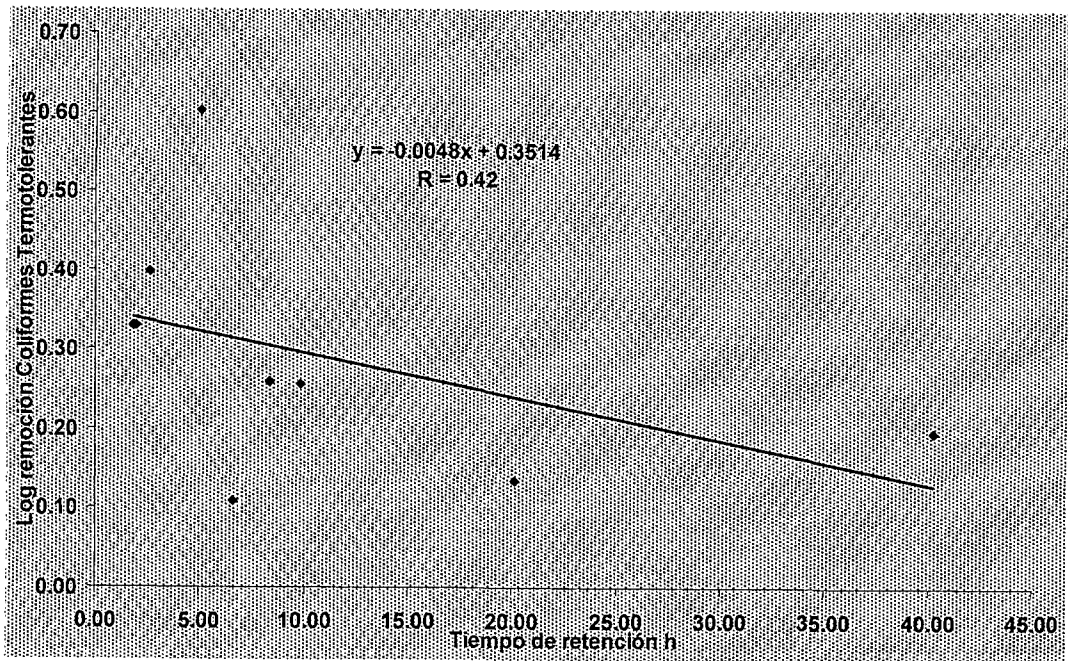


Gráfico 29. Relación de los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes a densidad mínima con el tiempo de retención en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero – Marzo 2009

6.12 El grado de asociación entre los máximos logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos con sus respectivas tasas superficiales aplicadas al FLA piloto, presenta un índice de correlación positivo de 0,96, lo cual significa que al disminuirse las tasas superficiales se incrementarán los logaritmos de remoción de los Coliformes termotolerantes.

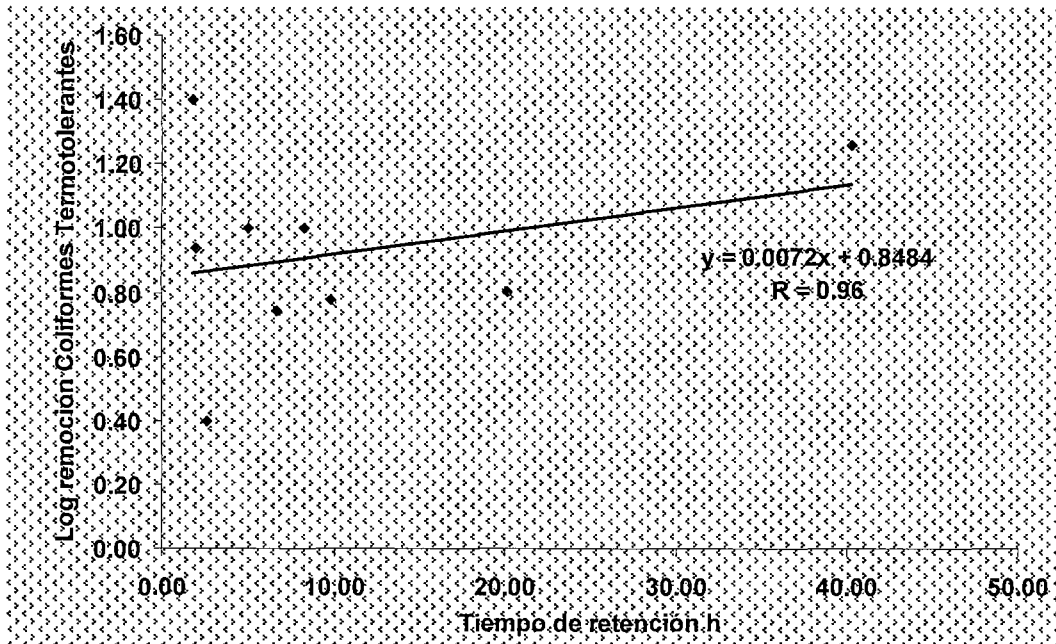


Gráfico 30. Relación de los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes a densidad máxima con el tiempo de retención en el FLA piloto, durante la Fase II del estudio, Enero – Marzo 2009

- 6.13 Todos los datos de log. de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos provienen de una distribución normal, lo cual se demostró a través de Histograma, Cálculo intercuartil y Gráfico de probabilidad normal.
- 6.14 Con el análisis estadístico Prueba F de ANOVA, se determinó que el valor crítico de F al nivel de significancia de 0,05 es 2,76. La estadística de prueba calculada de F es 3,094, el cual es mayor que el valor crítico; por lo tanto se concluye que existe una diferencia significativa en los logaritmos de remoción de Coliformes termotolerantes obtenidos en el FLA piloto al aplicar diferentes tasas superficiales.
- 6.15 Con el estadístico Comparaciones Múltiples de Tukey Kramer; se determinó que para $\alpha = 0,05$, $c=4$ y $n-c=60$, el valor crítico de extremo superior de $Q_{U(4,60)}$ es 3,40 y el alcance crítico 0,1953. De la comparación de los valores

obtenidos como diferencias absolutas de las medias con el valor del alcance crítico: $0,1506_{T1-T4} < 0,1953$; $0,02_{T2-T1} < 0,1953$; $0,1706_{T2-T4} < 0,1953$; $0,089_{T3-T1} < 0,1953$; $0,069_{T3-T2} < 0,1953$ y $0,24_{T3-T4} > 0,1953$; se concluye que la aplicación de la tasa $0,008\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ tiene un rendimiento de remoción de Coliformes termotolerantes, significativamente mejor que la tasa $0,049\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ pero no existe evidencia de una diferencia significativa entre las comparaciones de las demás tasas superficiales.

6.16 Los resultados obtenidos del análisis estadístico se sustentan en lo reportado por otros investigadores respecto a que el rendimiento del FLA piloto depende principalmente de la tasa superficial aplicada; incrementándose su rendimiento cuando se disminuye la tasa aplicada, lo cual se traduce en mayor tiempo de retención en el lecho filtrante, favoreciendo el desarrollo de los mecanismos de transporte y de adherencia para la remoción de los contaminantes presentes en el efluente secundario de aguas residuales provenientes del Humedal artificial subsuperficial.

6.17 Finalmente, se concluye que el FLA piloto mejora la calidad microbiológica del efluente del humedal subsuperficial, en términos de Coliformes termotolerantes con una densidad mínima y máxima de Coliformes termotolerantes de 4 000 NMP/100mL y 7 000 NMP/100mL, respectivamente, operando a una tasa superficial de $0,008\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$; lo que califica a dicho efluente dentro de la categoría B de las Directrices de la OMS (1989) sobre calidad parasitológica y microbiológica de aguas residuales para uso en agricultura, con las condiciones de reutilización en Irrigación de cereales, cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles.

7. RECOMENDACIONES

De lo acontecido durante el desarrollo del presente estudio, se recomienda lo siguiente:

- 7.1 Mantener un caudal constante de ingreso al sistema de humedales a fin de no interrumpir el proceso de Filtración lenta.
- 7.2 Extender el período de prueba del Filtro lento piloto de forma tal que se evalúe durante época de invierno a fin de conocer su eficiencia de remoción de Coliformes termotolerantes.
- 7.3 Considerando los resultados obtenidos en el presente estudio, y lo reportado por otros autores, se recomienda se evalúe el rendimiento del uso del Filtro Lento de Arena utilizando dos unidades con tasas superficiales aplicadas de $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ y $0,033 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, tamaño de arena de 1,5mm y 2mm. y profundidad de la arena de 80 cm y 100cm.
- 7.4 Se sugiere considerar 10 días como tiempo mínimo de maduración del FLA piloto y proceder al lavado una vez por mes, lo cual queda sujeto a las condiciones de operación y resultados obtenidos durante el desarrollo del estudio respectivo.

8. LITERATURA CITADA

1. Adin, A. Slow granular filtration for water reuse. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2003, 3 (4), 123-130.
2. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. In *On-Site Wastewater Treatment: Proceedings of the Seventh International Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*. 1994
3. Angelakis, A.N, Bontoux, L., Wastewater reclamation and reuse in European countries. *Water Policy*. 2001, 3, 47-59
4. Asano, T. and Levine, A.D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future *Water Science Technology*, 33(10-11), 1-13
5. Berenson, M., Levine, D. *Estadística Básica en Administración*. 6ta edición 1996. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana.
6. Bellamy, W.D, Hendricks, D.W, Longdon, G.S. Slow sand filtration: influences of selected process variables. *J.A. Water Well Assoc.* 1985; 12: 62-66.
7. Blumenthal, U.J, Peasey, A, Ruiz-Palacios, G, Duncan, D.M. Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence. 2000a; Task N° 68 Part 1:1-67.
8. Blumenthal, U.J, Mara, D, Peasey, A, Ruiz-Palacios, G, Stott, R. Guidelines for the microbiological quality of treated waste used in agriculture: Recommendations for revising W.H.O. guidelines. *Bulletin of the World Health Organization*. 2000b; 78(9):1104-1116.
9. Cintra, C.L. Modelling and simulation of the biological and physical processes of slow sand filtration. A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy and for the Diploma of the Imperial College of Science technology and medicine. Mayo 2002.
10. Darby, J., Tchobanoglous, M. Asri Nor, and D. Maciolek. 1996. *Small Flows Journal* 2(31): 3-15.
11. Ellis, K.V. Slow Sand Filtration as a Technique for the Tertiary Treatment of Municipal Sewages. *Water Research* 1987; 21(4), 403-410.

12. Emerick, R.W., R.M. Test, G. Tchobanoglous, J. Darby. 1997. Shallow Intermittent Sand Filtration: Microorganism Removal. *Small Flows Journal*. 1997; 3(1):12-22.
13. Environmental Protection Agency. Management of Small Waste Flows. Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati., Ohio. EPA 600/2-78/173. 1978.
14. Farooq, Sh. and Yousef, A.K., (1993a). Slow Sand Filtration of Secondary Effluent. *J. Env. Eng.*, **19**(4), 615-630.
15. Farooq, Sh., Yousef, A.K., Al-Layla, R.I. and Ishaq, A.M. (1993). Tertiary treatment of sewage effluent via pilot scale slow sand filtration. *Env. Tech. Letters*, **15**(1), 15-28
16. Farooq, Al-Yousef. Effectiveness of slow sand filters in removal of microorganisms from secondary effluent. King Fahd University Saudi Engineering of Petroleum & Minerals Dhahran, Saudi Arabia. The fourth Saudi Engineering conference, 1995; volume II.
17. Huisman, L. Slow Sand Filters. World Health Organization. Geneva 1974, 1-119.
18. Idelovitch, E.; Ringskog, K. Wastewater treatment in Latin America — Old and new options. World Bank, Washington, DC, USA. 1997, 1-10.
19. Loomis, G. Dow, D.B., Stolt M.H., Sykes A.D., Gold, A.J. On-Site Wastewater Treatment, Proc. Ninth Natl. Symp. On Individual and Small Community Sewage Systems. ed. K. Mancl., St. Joseph, Mich. ASAE 701P0009. 2001, 52-61.
20. Maldonado, Y. A. Uso de Wetlands para el Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales Domésticas. Tesis para optar el Grado de Maestro en Tratamiento de Aguas y Reuso de Desechos. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, 2005.
21. Manual de Técnicas Parasitológicas y Bacteriológicas de Laboratorio. Organización Mundial de la Salud. 1997.
22. Manual de Métodos Estandarizados para agua y desagües. American Water Work Association. 19ava Edición.

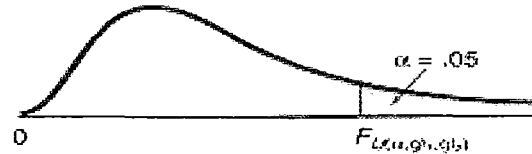
23. Metcalf y Eddy, INC. Ingeniería de Aguas Residuales. 3era edición 1991. EditoriAL McGraw Hill/Interamericana de España.
24. Milton, J., Tsokos, J. Estadística para Biología y Ciencias de la Salud. 1era edición 1987. Editorial McGraw Hill/Interamericana de España.
25. Ministerio del Ambiente, Decreto Supremo N°002-2008 MINAM Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas, 30 de julio del 2008.
26. Mohammand, K. Removal of coliphage and bacteria through slow sand filtration. Thesis. Faculty of the College of graduate Studies. King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahram; Saudi, Arabia.
27. Montgomery, D. Runger, G. Probabilidad y Estadística. 2da edición 2004. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores.
28. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola. Comité de Agricultura, 20° periodo de sesiones. Tema 7 del programa provisional. COAG/2007/7. 2007
29. Platzer et al, Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centro America, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería y Sanitaria Ambiental, México, 2002.
30. Poynter, S.F.B, Slade, J.S. The Removal of Viruses by slow Sand Filtration. Program Water Technol. 1997; vol. 9, 75.
31. Prasad, G; Rajeev Rajput, Chopra, A.K. J. Sand Intermittent Filtration Technology for safer Domestic Sewage Treatment. Appl. Sci. Environ. 2006, 10 (1), 73-77.
32. Quipuzco Lawrence, Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú, Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2004; 7 (13), 64-72.
33. Sadiq, R., Al-Zahrani, M., Sheikh, A., Husain, Ta., Farooq S. Tratamiento de Efluente Secundario por Filtro Lento de Arena: Rendimiento y Análisis de Riesgo. Water, Air, and Soil Pollution. 2003, vol. 143, 41-63

34. Sadiq, R., Al-Zahrani, M., Sheikh, A., Husain, Ta., Farooq S. Evaluación del rendimiento del Filtro Lento de Arena para la remoción de Coliformes utilizando el modelo Fuzzy, *Environmental Modelling & Software*. 2004, vol. 19, 507-515.
35. Said, S. Tertiary Treatment Municipal sewage vía slow sand filtration. Thesis. Faculty of the College of graduate Studies. King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran; Saudi, Arabia Jun 1989
36. Silva J., Torres. P, Madera, C. Reuso de Aguas Residuales en Agricultura. Una revisión. *Revista Agronomía Colombiana*. 2008, 26(2), 347-359.
37. Tabatabaei, Z., Hossein, A., Saeedi, R., Rakhsh, A., Sohrabi, A. Filtración de arena de Efluente Secundario en dos etapas para reutilización agrícola. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2007, 9(6), 889 - 892
38. Tonetti, A., Coraucci, B., Stefanutti, R., Fejó De Figueiredo, R. Okano, C. Remocion de matéria orgânica, coliformes totales, nitrificación por Tratamiento de Deságües Domésticos por Filtros de Arena. *Ingenieria Sanitária Ambiental*. 2005, 10(3), 209-218
39. Truesdale, G.A, Birkbeck, A.E, Shaw, D. A critical Examination of Some Methods for Further Treatment of Effluentes from Percolating Filters. *Journal of Institution of Sewage Purification*. 1964, vol. 63, 81-101.
40. Valencia, Z., Sánchez,T., Aponte, A., Evaluación de la Filtración Lenta en Arena como tratamiento terciario de agua residual doméstica con fines de reuso agropecuario y piscicola. *Revista Ingenieria de los Recursos Naturales y del Ambiente*, núm. 8, enero-diciembre, 2009, pp.39-49 Universidad del Valle Cali, Colombia.
41. Vargas, L.C. Filtración lenta, Manual I Teoría y Evaluación.1992; CEPIS/OPS Lima- Peru.
42. Visscher, J.T. (1990). Slow sand filtration: Design, operation and maintenance. *J. Am. Wat. Works Assoc.* 82(6), 67-71.

ANEXOS

ANEXO A. Valor Crítico de F

Para una combinación particular de grados de libertad en el numerador y en el denominador, las entradas representan los valores críticos de F correspondientes a un área de extremo superior especificada (α).



Denominador df ₂	Numerador df ₁																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.5	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.36	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.86	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.56	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.25	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.38
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.69	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.95	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.78	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.39	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.28	3.05	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.23	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.06	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.75
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.99	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.26	2.17	2.10	2.04	1.99	1.91	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.36	1.28
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

ANEXO B. Valores críticos^a del alcance Q estudentizadoPuntos 5% superiores ($\alpha = 0.05$)

ν	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	18.0	27.0	32.8	37.1	40.4	41.1	45.4	47.4	49.1	50.6	52.0	53.2	54.3	55.4	56.3	57.2	58.0	58.8	59.6
2	6.09	8.3	9.8	10.9	11.7	12.4	13.0	13.5	14.0	14.4	14.7	15.1	15.4	15.7	15.9	16.1	16.4	16.6	16.8
3	4.50	5.91	6.82	7.50	8.04	8.48	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.15	10.35	10.52	10.69	10.84	10.98	11.11	11.24
4	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.05	7.35	7.60	7.81	8.03	8.20	8.37	8.52	8.66	8.79	8.91	9.03	9.13	9.23
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72	7.85	7.93	8.03	8.12	8.21
6	3.46	4.34	4.93	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.03	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30	6.43	6.55	6.66	6.76	6.85	6.94	7.02	7.09	7.17
8	3.26	4.04	4.51	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
9	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.64
10	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.11	6.20	6.27	6.34	6.40	6.47
11	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.99	6.06	6.14	6.20	6.26	6.33
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.62	5.71	5.80	5.88	5.95	6.03	6.09	6.15	6.21
13	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.05	6.11
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.55	5.64	5.72	5.79	5.85	5.92	5.97	6.03
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.60	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.58	5.65	5.72	5.79	5.85	5.90	5.96
16	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.72	5.79	5.84	5.90
17	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.71	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.95	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
19	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
20	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.49	5.55	5.61	5.66	5.71
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.54	5.59
30	2.89	3.49	3.84	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.91	4.98	5.05	5.11	5.16	5.22	5.27	5.31	5.36
60	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.16	5.20	5.24
120	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.46	4.56	4.64	4.72	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.05	5.09	5.13
∞	2.77	3.31	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.85	4.89	4.93	4.97	5.01

^a Alcance/Sy ~ (símbolo "parecido a") $Q_{1-\alpha; \nu, n}^*$ es el tamaño de la muestra de la cual se obtiene el alcance, y ν es el número de grados de libertad Sy.

Fuente: Reimpreso de E. S. Pearson y H. O. Hartley, editores. *Biometrika Tables for Statisticians*, vol. 1, 3a ed., 1996.