

**ESTUDIO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA
RESIDUAL EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE VILLA DEL
VIENTO Y SU POTENCIAL REUSO AGRÍCOLA Y FORESTAL**



**LUCY CRISTINA REBELLÓN MÉNDEZ
PILAR EDITH RODRÍGUEZ MONJE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL GIIA
POPAYÁN
Diciembre de 2006**

**ESTUDIO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA
RESIDUAL EFLUENTE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE VILLA DEL
VIENTO Y SU POTENCIAL REUSO AGRÍCOLA Y FORESTAL**

**LUCY CRISTINA REBELLÓN MÉNDEZ
PILAR EDITH RODRÍGUEZ MONJE**

**Trabajo de Grado
Para optar al título de Ingeniera Ambiental**

**JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, MSc.
Director**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL GIAA
POPAYÁN
Diciembre de 2006**

NOTA DE ACEPTACION

Director **JAVIER ERNESTO FERNANDEZ M.**

Jurado **GUILLERMO CHAUX**

Jurado **ADRIANA MERA**

Fecha de sustentación: Popayán, 4 de Diciembre de 2006

AGRADECIMIENTOS

A Dios autor de nuestra existencia, por permitirnos vivir la experiencia de adquirir valiosos conocimientos.

A nuestros padres por el profundo e incondicional amor, apoyo y dedicación que nos han brindado durante toda la vida, permitiendo nuestra realización personal y profesional.

A nuestro director, Ingeniero Javier Ernesto Fernández por su dedicación, apoyo y orientación en nuestro trabajo.

Al Ingeniero Guillermo Chaux y a la profesora Adriana Mera por sus aportes durante la evaluación del documento final.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y Agroindustrial por brindarnos su valiosa colaboración durante este proceso, en especial a los Ingenieros Napoleón Zambrano, Carlos César Cabezas, Mauricio Espinosa, Carlos Gallardo y Jorge González..

A los Ingenieros Luís Fernando Polanco y Francisco Polanco por permitirnos trabajar en las instalaciones del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento.

Al personal del laboratorio Ricardo González y Reinaldo Mera por su colaboración durante la evaluación de campo y análisis en el laboratorio.

A nuestros amigos por su apoyo y compañía.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2. JUSTIFICACION.....	15
3. OBJETIVOS.....	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
4. REVISION DE LITERATURA.....	19
4.1 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	19
4.2 UTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES SIN TRATAR.....	23
4.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	27
4.4 REUSO DE AGUAS RESIDUALES.....	31
4.5 CALIDAD DEL AGUA PARA REUSO.....	33
4.6 RIESGOS SANITARIOS DERIVADOS DEL REUSO.....	42
4.6.1 Control a la exposición humana.....	44
5. METODOLOGÍA.....	46
5.1 CONCEPCION GENERAL DE LA INVESTIGACION.....	46
5.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	46
5.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	47
5.4 ANALISIS DE LABORATORIO.....	49
5.5 MANEJO DE LA INFORMACION.....	53

6.	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	54
6.1	FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA.....	54
6.1.1	Tanque Imhoff.....	54
6.1.2	Filtro Anaeróbico	55
6.2	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL PARA LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA.....	56
6.2.1	Calidad Microbiológica.....	56
6.2.2	Calidad Fisicoquímica.....	63
6.3	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL PARA LA ACTIVIDAD FORESTAL	74
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	79
	ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Nivel de contaminación de productos irrigados con diferentes calidades de agua (%) (CEPIS, 1990).....	27
Figura N° 5.1. Ubicación de la Urbanización y Sistema de Tratamiento de Villa del Viento.....	47
Figura 5.2. Ubicación de puntos de muestreo.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 4.1. Parámetros de interés en el agua residual municipal.	20
Tabla N° 4.2. Composición usual de agua residual domestica cruda*	21
Tabla N° 4.3 Datos típicos de los constituyentes encontrados en un agua residual doméstica	22
Tabla N° 4.4. Concentraciones de microorganismos presentes en aguas residuales no tratadas con su respectiva dosis infecciosa*	23
Tabla N° 4.5. Rendimientos de la cosecha en India	24
Tabla N° 4.6. Riesgos relativos para la salud por el empleo de excretas y aguas residuales sin tratar en agricultura y acuicultura.	25
Tabla N° 4.7. Eliminación prevista de microorganismos excretados en varios sistemas de empleo de aguas residuales	29
Tabla N° 4.8. Eficiencias típicas de remoción.....	30
Tabla N° 4.9. Directrices microbiológicas provisionales de calidad para la reutilización de aguas residuales tratadas en el riego agrícola.....	34
Tabla N° 4.10. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura ^a	35
Tabla N° 4.11. Valores máximos de elementos químicos para la evaluación de aguas residuales tratadas con fines de reuso.....	38
Tabla N° 4.12. Parámetros de calidad de reuso de aguas residuales. FAO 1985.	39
Tabla N° 4.13. Parámetros para el reuso del agua con interés desde el punto de vista agrícola	41

Tabla N° 5.1. Métodos y Equipos de Análisis de Laboratorio	52
Tabla N° 6.1. Estadísticas descriptivas, Caudal y Tiempo Teórico de Retención Tanque Imhoff	54
Tabla N° 6.2. Estadísticas descriptivas, Caudal y Tiempo teórico de retención Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente	55
Tabla N° 6.3. Estadísticas descriptivas, Huevos de Helminthos	57
Tabla N° 6.4. Estadísticas descriptivas, Coliformes Fecales	59
Tabla N° 6.5. Estadísticas descriptivas, pH.....	63
Tabla N° 6.6. Estadísticas descriptivas, Conductividad Eléctrica.....	64
Tabla N° 6.7. Estadísticas descriptivas, Sólidos Disueltos	65
Tabla N° 6.8. Estadísticas descriptivas, Fosfatos	66
Tabla N° 6.9. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Total	69
Tabla N° 6.10. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Orgánico	70
Tabla N° 6.11. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Amoniacal.....	70

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía N° 5.1. Sistema de Tratamiento de Villa del Viento	48
Fotografía N° 5.2. Punto de muestreo a la entrada, agua cruda.....	50
Fotografía N° 5.3. Punto de muestreo a la salida, agua tratada.	50

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Supervivencia de ciertos patógenos en aguas, suelos y plantas. Fuente: CEPIS 1990	85
Anexo 2. Planos Planta de Villa del Viento. Fuente: Zambrano y Calderón (2000)	87
Anexo 3. Equipos para medición de caudal a la entrada y salida del Sistema del Tratamiento.	89
Anexo 4. Huevos de helmintos.....	90
Anexo 5. Agentes parcialmente infecciosos presentes en agua residual doméstica no tratada.....	91
Anexo 6. Distribución normal. Áreas bajo la curva normal estándar.	92
Anexo 7. Datos para la determinación de la Calidad Microbiológica	93

INTRODUCCION

Colombia, a pesar de ser considerado como uno de los países con mayor riqueza en recursos hídricos no escapa a la problemática mundial que estos enfrentan, debido a las grandes descargas en las fuentes de agua de residuos líquidos y sólidos de actividades tanto productivas como domiciliarias. El inadecuado y en ocasiones inexistente tratamiento de las aguas residuales ha originado problemas de salubridad y disminución de la calidad del agua en varias regiones del país, ya que se recolecta aproximadamente el 60% de las aguas residuales y sólo se tratan el 12% de éstas; además, de las 237 plantas de tratamiento que tiene el país solo 9 registran un adecuado funcionamiento (MAVDT, 2004). Esta situación ha generado la formulación de nuevas alternativas que permitan mitigar los impactos negativos sobre las fuentes de agua, entre ellas se encuentra el reuso de las aguas residuales tratadas como estrategia para el uso eficiente y ahorro del agua.

El reuso del agua es el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en actividades diferentes a las que las originó, con él se busca disminuir la demanda sobre las actuales fuentes de suministro. El reuso de aguas no implica la utilización de aguas de mala calidad, considera por el contrario una adecuación de las aguas residuales a una calidad tal que su uso no afecte la salud humana ni el ambiente.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), están fomentando el reuso de aguas residuales domésticas en agricultura para irrigación y fertilización de suelos, y en acuicultura para la producción de biomasa con valor proteico. Sin embargo, advierten sobre los riesgos que para la salud pública y el ambiente se generarían como consecuencia de una práctica indiscriminada de estas actividades.

En el presente estudio se analiza el potencial reuso agrícola y forestal del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento ubicado en el municipio de Popayán (Cauca), a partir de la evaluación de su calidad microbiológica y fisicoquímica.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es una de las sustancias necesarias para el sostenimiento de la vida, porque se emplea en múltiples actividades como: el consumo humano, usos domésticos, actividades agropecuarias, transporte y navegación, generación de energía, recreación, entre otras.

Con el desarrollo de la vida en comunidad y la transformación de las aldeas agrícolas en centros urbanos, el suministro de agua se convierte en un problema para los habitantes de la ciudad, ya que el aumento en la demanda de agua tiene como consecuencia el incremento del volumen de los residuos líquidos, cuya descarga sin una adecuada recolección, evacuación y tratamiento, deteriora la calidad de las aguas y contribuye a los problemas de disponibilidad del recurso.

En Colombia se han originado en forma sucesiva e incremental, problemas de salubridad y de calidad del agua en varias regiones, debido a la inadecuada o inexistente recolección, tratamiento y disposición de los vertimientos generados por las aguas de origen doméstico y actividades como la agricultura y la industria. El avance en materia de saneamiento presenta atrasos significativos, pues sólo son tratadas el 12% de las aguas residuales generadas, además se estima que la cobertura del servicio de acueducto es del 75% y la de alcantarillado del 60%, y a nivel urbano del 89 y 79% respectivamente (CRA, 2003). Se aclara que las cifras de alcantarillado se refieren sólo al servicio de recolección de las aguas residuales, notándose la gran diferencia entre la cobertura de tratamiento de las aguas residuales (12%) con respecto a la recolección (60%).

Los cuerpos receptores son utilizados como sitio de disposición de los vertimientos de residuos líquidos de actividades tanto productivas como domiciliarias. La materia orgánica generada por las actividades domésticas en 1999 fue de 482.193 ton (1321 ton/día) medidas como DBO, de las cuales se trató apenas el 4%, para un vertimiento neto de 462.759 ton. En este mismo año la generación total de DBO para el sector industrial fue de aproximadamente 162.000 ton. En el país solo hay 237 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuáles solo nueve registran un adecuado funcionamiento (MAVDT, 2004).

El problema de contaminación se evidencia en la medida en que los cuerpos receptores alcanzan su capacidad de asimilación de los contaminantes, lo que origina alteraciones de la calidad del recurso para su uso posterior y agrega un costo adicional para su tratamiento. La calidad del agua es un factor que limita la disponibilidad del recurso hídrico y restringe su uso. En Colombia por ejemplo, según estudio del Ministerio de Salud, el 70% de la población tiene acceso a agua de buena calidad; sin embargo, este nivel de servicio solo cubre el 17.5% y 9.6% de la población en localidades con poblaciones en el rango de 2.500 a 10.000 e inferiores a 2.500 habitantes respectivamente (Evaluación 2000, citada por OPS 2001).

La sobreexplotación del recurso hídrico se refleja en los crecientes índices de escasez y niveles de contaminación de las corrientes naturales y cuerpos de agua, debido a serias deficiencias en el tratamiento de estas y a las descargas realizadas sin tratamiento previo, lo cual ocasiona un gran impacto ambiental sobre los cuerpos receptores que en su mayoría son quebradas de bajo caudal y por ende corrientes muy sensibles a la degradación. En el Cauca, la población afectada con índices de escasez mayores al 20 % es de 4.906 habitantes (IDEAM, 2001).

De mantenerse las tendencias actuales y de no mejorar la capacidad de planificación y administración del recurso hídrico por parte de las autoridades competentes, esta situación se agravará ya que la oferta hídrica disponible se verá restringida por efectos de la contaminación, del aumento de la demanda asociado al crecimiento poblacional y económico, y a la reducción de la capacidad de regulación de las cuencas hidrográficas; en consecuencia se esperaría que para el año 2025, el 69% de la población enfrente riesgos de desabastecimiento de agua (IDEAM, 2000).

2. JUSTIFICACION

El incremento continuo de la población y del consumo de agua en los centros poblados, además de la disposición de las aguas residuales domésticas e industriales sin o con limitaciones en su tratamiento, hacen que se reduzca la disponibilidad de aguas claras y se presente déficit para los demás usos. Un estimativo del caudal de aguas residuales generado por los centros urbanos identifica que en Colombia se están arrojando a los cuerpos de agua cerca de $67\text{m}^3/\text{s}$, en donde Bogotá representa más del 15.3 %, Antioquia el 13 %, Valle del Cauca el 9.87% y los demás departamentos están por debajo del 5%. Esta proporcionalidad condiciona el grado de impacto sobre las corrientes hídricas, y marca una tendencia de impacto en las regiones (MAVDT, 2002).

Este tipo de problemas que afectan no solo a nuestro país, han originado nuevos planteamientos a través de la introducción de modelos de producción más limpia de manera particular en el manejo de las aguas residuales, entre estos se encuentra el reuso que busca disminuir la demanda sobre las actuales fuentes de suministro.

El reuso de aguas residuales domésticas municipales se realiza en el país en forma pragmática y sin tomar en cuenta los riesgos ambientales, de salubridad y sociales que pueden derivarse. Su aplicación, especialmente en el sector agrícola se extiende a varias miles de hectáreas especialmente en cultivos de arroz, sorgo, pastos y caña de azúcar (MAVDT, 2001).

Las características de las aguas residuales en la mayoría de los casos son tales que su uso directo conlleva riesgos grandes para la salud o para la eficiencia de los procesos productivos industriales. Es por ello, que el tratamiento de las aguas residuales y las prácticas adecuadas de reuso están estrechamente relacionadas.

El reuso de aguas no implica la utilización de aguas de mala calidad, considera por el contrario, una adecuación de las aguas residuales a una calidad tal que su uso no afecte la salud humana ni al ambiente.

Con el reuso se busca en primer término, disponer de un gran volumen de aguas para satisfacer las necesidades actuales en el sector residencial, comercial, industrial y agropecuario, en actividades que no exigen la utilización de aguas limpias liberando éstas para la creciente demanda de uso doméstico. En segundo término, se reduce la magnitud de las descargas de aguas residuales que afectan las fuentes hídricas alterando los ecosistemas.

El reuso logra la reducción de los volúmenes de agua captada de corrientes o cuerpos de aguas naturales y simultáneamente minimiza o elimina cargas contaminantes que antes se vertían a fuentes hídricas y se posibilita una mayor disponibilidad de aguas naturales de mejor calidad para el consumo humano, animal y desarrollo de los recursos hidrobiológicos.

Aunque la oferta hídrica del departamento del Cauca es grande debido a que el 70% del territorio pertenece al Macizo Colombiano, en donde nacen los cuatro ríos más importantes del país: Magdalena, Cauca, Patía y Caquetá, los usos no sostenibles han generado impactos ambientales negativos representados en la disminución de la capacidad productiva de los ecosistemas, destrucción de la biodiversidad, erosión, sedimentación, contaminación de suelos y aguas y alteración del balance hídrico de las cuencas hidrográficas, entre otros. (Plan Departamental de Desarrollo 2004-2007).

Con el fin de mitigar el impacto de las aguas residuales La Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) ha venido implementando sistemas de tratamiento de aguas residuales en las cabeceras municipales, 22 plantas de tratamiento han sido construidas actualmente. La tecnología utilizada en la mayoría de los casos consiste en la combinación de tanques sépticos con filtros anaeróbicos. Según datos preliminares de evaluaciones realizadas en el marco de

trabajos de grado de estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, a dos de estos sistemas ubicados en El Tambo y Cajibío, las eficiencias de remoción se encuentran en el rango del 60 al 80% en materia orgánica (Ramírez y Moreno, 2005; Alvear y López, 2005). Estos resultados muestran un gran potencial de la tecnología en la mitigación del impacto de las descargas de aguas residuales domésticas sobre las fuentes superficiales.

Analizando la situación actual del departamento y las eficiencias de los sistemas implementados, se debe considerar el reuso de las aguas residuales como una estrategia que permite el uso eficiente y el ahorro del agua, además de mejorar la calidad de la salud humana y del ambiente.

En la actualidad no se cuenta con recursos ni documentos referentes al reuso de aguas residuales provenientes de sistemas de tratamiento que utilicen Tanque Imhoff seguido de un Filtro Anaeróbico. Por lo tanto, el presente estudio pretende hacer una aproximación a este tema estudiando la viabilidad de la utilización del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento en la actividad agrícola y forestal.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la viabilidad de utilizar el agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento en la actividad agrícola y forestal.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ▶ Determinar la calidad microbiológica del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento para verificar la viabilidad de su utilización en la actividad agrícola y forestal, y el potencial riesgo sanitario que genere la manipulación del efluente por el ser humano.

- ▶ Determinar la calidad físico química del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento para verificar la viabilidad de su utilización en la actividad agrícola y forestal y su potencial impacto sobre los suelos.

4. REVISION DE LITERATURA

Los seres humanos utilizan intensivamente el recurso hídrico tanto para sus necesidades biológicas y culturales básicas como para las diferentes actividades económicas, generando una gran cantidad de descargas sobre los cuerpos de agua. El aumento en la demanda de agua tiene como consecuencia un incremento en el volumen de los residuos líquidos, cuya descarga, sin una adecuada recolección, evacuación y tratamiento, deteriora la calidad de las aguas y contribuye con los problemas de disponibilidad del recurso. Por lo tanto, la calidad del agua es un factor que limita su disponibilidad y restringe su uso.

4.1 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales domésticas son el producto de viviendas que poseen un sistema de abastecimiento de agua interior con varios grifos y retretes con depósitos de agua conectados a una red de alcantarillado en la que se vierten todas las demás aguas servidas de la vivienda. Están formadas por un 99.9% de agua y un 0.1% de sólidos. Esta composición varía de acuerdo con los diferentes lugares, zonas y regiones del mundo debido a varios factores como: los hábitos, nivel de vida de la población, consumo, calidad del agua, tecnologías de saneamiento utilizadas, costumbres y cultura.

Según Mujeriego (1990) y Metcalf y Eddy (1991), la composición del agua residual se refiere a las propiedades físicas y a los componentes químicos, biológicos y microorganismos patógenos de origen fecal del agua residual; parámetros importantes para el proyecto y explotación de las instalaciones de recogida, tratamiento y vertido, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental.

En el agua residual municipal los parámetros de interés que se observan son los presentados en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1. Parámetros de interés en el agua residual municipal.

Componente	Parámetro de calidad	Razón de interés
Materia en suspensión	Materia en suspensión, incluyendo la porción volátil y la inorgánica	La materia en suspensión puede dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratamiento a un medio acuático. Una cantidad excesiva de materia en suspensión puede obstruir el sistema de riego.
Materia orgánica biodegradable	Demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno	Estas sustancias están compuestas principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Una vez vertidas en el ambiente, su descomposición biológica puede dar lugar al agotamiento del oxígeno disuelto en las aguas receptoras y a la aparición de condiciones anaerobias.
Patógenos	Organismos indicadores, coliformes totales y coliformes fecales.	Los organismos patógenos presentes en un agua residual, tal como bacterias, virus y parásitos, pueden producir numerosas enfermedades transmisibles.
Metales pesados	Elementos Conocidos como Cd, Zn, Ni y Hg	Algunos metales pesados se acumulan en el medio ambiente son tóxicos para los animales y las plantas. Su presencia en el agua residual puede limitar su idoneidad para agua de riego.
Sustancias inorgánicas disueltas	Materia disuelta total, conductividad eléctrica, elementos concretos como Na, Ca, Mg, Cl y B.	Un grado excesivo de salinidad puede perjudicar ciertos cultivos. Determinados iones como los cloruros, el sodio y el boro son tóxicos para ciertas plantas. El sodio puede causar problemas de permeabilidad en los suelos.
Actividad del ion hidronio	pH	Afecta a la solubilidad de los metales así como a la alcalinidad del suelo. El intervalo normal de un agua residual municipal se sitúa entre 6.5 y 8.5, la presencia de agua residual industrial puede modificar el pH.
Elementos nutritivos	Nitrógeno, Fósforo, Potasio	El nitrógeno, el fósforo y el potasio son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de las plantas y su presencia en el agua aumenta el valor para el riego. Cuando se vierte nitrógeno o fósforo en el medio acuático, puede darse el desarrollo de formas de vida acuáticas indeseables. Cuando se vierten cantidades excesivas de estos elementos en el terreno, el nitrógeno puede llegar a contaminar las aguas subterráneas.
Sustancias orgánicas estables o refractarias al proceso de tratamiento.	Compuestos específicos, como fenoles, pesticidas e hidrocarburos clorados.	Estas sustancias orgánicas ofrecen gran resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de agua residual. Algunas son tóxicas en el medio ambiente y su presencia puede limitar la idoneidad de las aguas residuales para riego.
Cloro residual	Cloro libre y cloro combinado	Una concentración excesiva de cloro libre, superior a 0.05 mg/l, puede provocar quemaduras en las puntas de las hojas y estropear algunas especies de plantas sensibles. No obstante, la mayor parte del cloro presente en un agua residual es cloro combinado, que no perjudica a las plantas. Existe cierta preocupación por los efectos tóxicos derivados de los compuestos organoclorados que puedan llegar a contaminar las aguas subterráneas.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1991) (Mujeriego, 1990)

Los valores usuales que estos parámetros toman en el agua residual doméstica cruda son los presentados en la Tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2. Composición usual de agua residual domestica cruda*

Contaminantes	Concentración		
	Unidad	Intervalo	Valor usual
Sólidos Totales	mg /L	350-1200	700
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg /L	280-850	500
Fijos	mg /L	145-525	300
Volátiles	mg /L	105-325	200
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg /L	100-350	210
Fijos	mg /L	20-75	55
Volátiles	mg /L	80-275	160
Sólidos Sedimentables (SS)	mg /L	5-20	10
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días y 20°C (DBO ₅ , 20°C)	mg /L	110-400	210
Carbono orgánico total (COT)	mg /L	80-290	160
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg /L	250-1000	500
Nitrógeno Total (expresado como N)	mg /L	20-85	35
Orgánico	mg /L	8-35	13
Amoníaco Libre	mg /L	12-50	22
Nitritos	mg /L	0-0	0
Nitratos	mg /L	0-0	0
Fósforo Total (expresado como P)	mg /L	4-15	7
Orgánico	mg /L	1-5	2
Inorgánico	mg /L	3-10	5
Cloruros [±]	mg /L	30-100	50
Sulfatos [±]	mg /L	20-50	30
Grasas y aceites	mg /L	50-150	90
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	mg /L	<100 a >400	100-400
Coliformes Totales	no./100 mL	10 ⁶ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸
Coliformes Fecales	no./100 mL	10 ³ - 10 ⁷	10 ⁴ -10 ⁵
Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i>	no./100 mL	10 ⁻¹ - 10 ²	10 ⁻¹ -10 ¹
Quistes de <i>Giardia Lamblia</i>	no./100 mL	10 ⁻¹ - 10 ³	10 ⁻¹ -10 ²

* Adoptado de Tchobanoglous y Burton (1991)

[±] Estos valores no incluyen el aporte del agua para abastecimiento

La Tabla N° 4.3, presenta las diferentes concentraciones de estos constituyentes, en el agua residual, que pueden clasificarse en alta, media o baja. Estos valores permiten realizar una aproximación de la calidad del agua residual cruda estudiada.

Tabla N° 4.3 Datos típicos de los constituyentes encontrados en un agua residual doméstica

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/l	1200	720	350
Disuelta total	850	500	250
Inorgánica	525	300	145
Orgánica	325	200	105
En suspensión	350	220	100
Inorgánica	75	55	20
Orgánica	275	165	80
Sólidos decantables, ml/l	20	10	5
DBO ₅ a 20°C, mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, mg/l	290	160	80
DQO, mg/l	1000	500	250
Nitrógeno, mg/l N, total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/l P, total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad, mg/l CaCO ₃	200	100	50
Grasa, mg/l	150	100	50

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1991) (Mujeriego, 1990)

Además de los parámetros físicos y químicos presentados, un agua residual municipal puede contener microorganismos patógenos de origen fecal, tales como bacterias, parásitos (protozoos y helmintos) y virus. Estos organismos excretados causan por lo general enfermedades del tracto gastrointestinal, como fiebre tifoidea y paratifoidea, disentería, diarrea y cólera. En vista de que estos organismos son altamente infecciosos, se les acusa de ser responsables de un gran número de muertes al año en zonas con escasa cobertura sanitaria, en especial en el trópico (Tchobanoglous, 2000).

En la Tabla N° 4.4, se registran datos sobre la concentración de algunos organismos patógenos presentes en aguas residuales y las correspondientes dosis necesarias para ocasionar una infección.

Tabla N° 4.4. Concentraciones de microorganismos presentes en aguas residuales no tratadas con su respectiva dosis infecciosa*

Organismo	Concentración en efluentes de Tanque Séptico y Agua Residual Cruda MPN/ 100 ml⁺	Dosis infecciosa, expresada como número de organismos
Bacterias		
Coliforme, total	10 ⁷ - 10 ⁹	
Coliforme, fecal	10 ⁶ - 10 ⁸	10 ⁶ - 10 ¹⁰
<i>Clostridium perfringens</i>	10 ³ - 10 ⁵	1 - 10 ¹⁰
Enterococo	10 ⁴ - 10 ⁵	
Estreptococo fecal	10 ⁴ - 10 ⁶	
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10 ³ - 10 ⁴	
<i>Shigella</i>	10 ⁰ - 10 ²	10 - 20
<i>Salmonella</i>	10 ² - 10 ⁴	
Protozoos		
<i>Cryptosporidium parvum</i> , ooquiste	10 ¹ - 10 ³	1-10
<i>Entamoeba histolytica</i> , quiste	10 ⁻¹ - 10 ¹	10-20
<i>Giardia Lambia</i> , quiste	10 ³ - 10 ⁴	<20
Helmintos		
Huevos	10 ¹ - 10 ³	1-10
Ascaris Lumbricoides		
Virus		
Virus Entéricos	10 ³ - 10 ⁴	1-10
Colifagos	10 ³ - 10 ⁴	

* Adoptado en parte de Crook (1998) y Feachem *et al* (1983)

+Número más probable de organismos en 100ml, estimación estadística de concentración

4.2 UTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES SIN TRATAR

La utilización de aguas residuales sin tratar es una consecuencia directa de la escasez del recurso hídrico, lo que constituye un alto riesgo para la salud de las personas que manipulan y consumen productos regados con este tipo de agua. La reutilización indirecta -es decir, el uso de aguas procedentes de ríos que reciben efluentes de aguas residuales- sigue registrándose en el mundo entero y es en la actualidad el método más común de utilizar los efluentes no solo para el riego sino también, previo tratamiento apropiado, para el suministro de agua potable (OMS, 1990).

Es innegable que el uso de aguas residuales sin tratar plantea unos beneficios económicos expresados en los rendimientos de las cosechas, debido al aporte de esta agua en términos de cantidad de nutrientes, esto puede evidenciarse en la Tabla N° 4.5, donde el riego de intensidad media con aguas residuales sin tratar permite obtener una producción mayor que el riego con agua limpia suplementado con dosis de NPK.

Tabla N° 4.5. Rendimientos de la cosecha en India

Agua para regar	Cosecha (toneladas anuales por hectárea)				
	Trigo (8)*	Frijol mungo (Phaseolus aureus) (5)	Arroz (7)	Patatas (4)	Algodón (3)
Aguas residuales sin tratar	3.34	0.90	2.97	23.11	2.56
Aguas residuales reposadas	3.45	0.87	2.94	20.78	2.30
Efluentes de estanques de estabilización	3.45	0.78	2.98	22.31	2.41
Agua limpia + NPK	2.70	0.72	2.03	-17.16	1.70

* La producción media se calcula en cosechas anuales. Fuente Shende (1985)(Citado por OMS 1990)

Al mismo tiempo debe aclararse que el uso de aguas residuales sin tratar constituye un gran riesgo para la salud debido a la presencia de microorganismos patógenos causantes de gran número de enfermedades. Shuval y Col (1986) (citado por OMS, 1990), plantean que los principales riesgos microbiológicos del uso de aguas residuales en la agricultura son los siguientes:

- El riego de cultivos con aguas residuales sin tratar provoca un aumento importante de infecciones por nematodos intestinales tanto en los consumidores como en los trabajadores agrícolas.
- Es posible la transmisión de cólera y fiebre tifoidea, mediante el riego de hortalizas con aguas residuales sin tratar.
- Existen muy pocas pruebas de que la salud de las personas que viven cerca de campos regados con aguas residuales sin tratar pueda verse negativamente afectada tanto directamente, por el contacto con el suelo, como indirectamente por el contacto con los trabajadores agrícolas.

En la Tabla N° 4.6, se presentan los riesgos relativos por el uso de aguas residuales sin tratar en agricultura.

Tabla N° 4.6. Riesgos relativos para la salud por el empleo de excretas y aguas residuales sin tratar en agricultura y acuicultura.

Clases de agentes patógenos	Exceso relativo a la frecuencia de infección o enfermedad
Nematodos intestinales <i>Ascaris</i> <i>Trichuris</i> <i>Ancylostoma</i> <i>Necator</i>	Elevado
Infecciones bacterianas: diarreas bacterianas (ej: cólera, fiebre tifoidea)	Menor
Infecciones víricas: diarreas víricas hepatitis A.	Mínimo
Infecciones por trematodos y cestodos: Esquistosomiosis Clonorquiasis Teniasis	De elevado a inexistente, dependiendo de las prácticas concretas en el empleo de excretas y de circunstancias locales.

Fuente: (OMS 1990)

De estos se deduce con claridad que, cuando se utilizan aguas residuales sin tratar para el riego de cultivos, los riesgos reales son elevados en el caso de nematodos y bacterias intestinales y muy pocos o ninguno en el caso de los virus.

El desbalance entre el recurso hídrico y el crecimiento explosivo de las grandes ciudades, ha obligado a priorizar el uso de aguas superficiales para abastecimiento público y generación de energía eléctrica. Como lógica consecuencia, la actividad agrícola ubicada en la periferia de las ciudades se ha visto seriamente afectada y ha optado por el uso de las aguas residuales como única alternativa de supervivencia. Esto se refleja, por ejemplo en México donde para 1992 se reportaron 350.000 hectáreas agrícolas regadas directamente con aguas residuales y en Perú donde existen más de 4.000 Ha en ciudades de su costa desértica (Suematsu, 1995). En Colombia, se utilizan aguas residuales

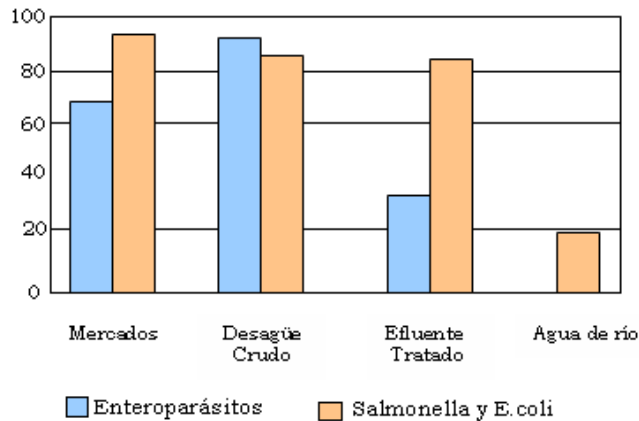
domésticas, aguas residuales de la producción pecuaria (ganado vacuno y porcino) e incluso de origen industrial y agroindustrial para el riego de cultivos sin importar su nivel de tratamiento y mas grave aún, sin tomar ninguna medida de protección para la salud pública de los grupos humanos expuestos. En la Sabana de Bogotá, por ejemplo, en el distrito de riego y drenaje de la Ramada, se riegan actualmente 3.500 Ha de cultivos de hortalizas, flores y pastos; para lo cual se utiliza un caudal promedio de 1.5 m³/s bombeados del río Bogotá (CAR, 1992, Citado por Peña y Valencia, 1998).

Esto es solo una pequeña aproximación, ya que una cantidad superior de tierra agrícola se irriga con aguas superficiales de ríos y canales que superan ampliamente el nivel máximo de 1.000 coliformes fecales por 100 ml que recomienda la OMS para el riego de vegetales de consumo crudo. Con estos niveles de contaminación, los riesgos de consumir alimentos contaminados son altos.

En el estudio “Evaluación de riesgos para la salud por el uso de las aguas residuales en la agricultura” realizado por CEPIS en Lima, Perú (1990), se comparó la calidad sanitaria de los productos alimenticios regados con aguas de ríos no contaminados y con aguas residuales crudas y tratadas. También se evaluó la calidad de productos alimenticios que normalmente se expenden en los mercados de Lima. Los resultados de la evaluación sanitaria de los productos agrícolas se resumen en la Figura 4.1. El 91% de los productos regados con aguas residuales crudas mostraron presencia de enteroparásitos, el riesgo disminuyó en las verduras regadas con aguas residuales tratadas y aguas superficiales no contaminadas. En lo que respecta a la presencia de Salmonella y a concentraciones de *Escherichia coli* por encima de los niveles permisibles según las guías internacionales, el riesgo es alto con el uso de aguas residuales crudas. Se encontraron niveles de riesgo comparables con el uso de aguas residuales tratadas, sin embargo, se debe indicar que el exceso de coliformes fecales encontrado se debió a la sobrecarga del sistema de lagunas de estabilización evaluado. Como era de esperarse, los productos irrigados con aguas superficiales

no contaminadas presentaron un riesgo bajo. En la misma figura se muestra que los niveles de contaminación de los productos que se expenden en los mercados, independientemente de la calidad del agua de riego, son comparables a los irrigados con aguas residuales sin tratar. Estos niveles son resultado del uso de aguas residuales contaminadas, del refrescamiento de los productos con aguas superficiales contaminadas antes de su destino final en los grandes centros de abastecimiento, y a la falta de higiene en la manipulación de los alimentos a través de toda la ruta de comercialización, desde que el producto sale de los terrenos de cultivo hasta llegar a los hogares.

Figura 4.1. Nivel de contaminación de productos irrigados con diferentes calidades de agua (%) (CEPIS, 1990)



4.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales poseen una gran variedad de microorganismos patógenos como parásitos, bacterias y virus, además de la posible presencia de compuestos tóxicos que pueden poner en peligro la salud de las personas cuando éstas se exponen a las aguas residuales no tratadas, ya sea por contacto, inhalación o ingestión. Por lo tanto, el agua residual tratada debe tener unas características sanitarias que permitan prevenir la degradación ambiental y a la vez proteger la salud pública, especialmente si existe la intención de reutilizar, tanto si este aprovechamiento compromete un contacto directo o indirecto con las personas.

El proceso de tratamiento comprende diferentes alternativas, compuestas por una combinación de operaciones físicas, procesos químicos y procesos biológicos unitarios (Metcalf & Eddy, 1981). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se clasifican en sistemas preliminares o de pretratamiento, primarios, secundarios y terciarios.

➤ **Pretratamiento**

El pretratamiento implica las operaciones que se realizan de forma previa al inicio del tratamiento propiamente dicho. Debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción de material extraño presente en las aguas residuales y que puede interferir en los procesos de tratamiento (RAS 2000).

➤ **Tratamiento primario**

El tratamiento primario consiste en separar del agua por efecto de la gravedad la materia orgánica fácilmente sedimentable, algunos sólidos suspendidos y flotantes a través de procesos físicos y en algunos casos químicos. Pueden remover desde 40 a 55% de los sólidos en suspensión y del 25 al 35% de la DBO. Entre las estructuras se encuentran los sedimentadores, tanques de flotación, tanques Imhoff y tanques de precipitación química (MAVDT, 2002). Este proceso tiene un efecto limitado de eliminación de la mayoría de especies biológicas presentes en el agua residual, sin llegar a reducir de forma eficaz la concentración de bacterias o virus contenidos en ella.

➤ **Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario permite remover la materia orgánica soluble y suspendida fundamentalmente mediante procesos biológicos (acción de microorganismos). Pueden remover hasta 85% de la DBO y de los sólidos suspendidos, además de cantidades variables de nitrógenos, fósforo, metales pesados y bacterias patógenas.

Las estructuras más comunes son: lodos activados, filtros percoladores y anaeróbicos, lagunas de estabilización, reactores anaeróbicos de flujo pistón, UASB, biodiscos entre otros (MAVDT, 2002).

Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, por lo general, no son eficaces para eliminar los huevos de helmintos y tienen muy poco efecto en los contaminantes químicos de las aguas residuales. En la Tabla N° 4.7, se presenta el grado de eficiencia previsto de la eliminación.

Tabla N° 4.7. Eliminación prevista de microorganismos excretados en varios sistemas de empleo de aguas residuales

Proceso de Tratamiento	Eliminación (unidades logarítmicas ₁₀) de			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Sedimentación primaria				
• Sencilla	0-1	0-2	0-1	0-1
• Con ayuda química ^a	1-2	1-3 ^g	0-1	0-1
Lodo activado ^b	0-2	0-2	0-1	0-1
Biofiltración ^c	0-2	0-2	0-1	0-1
Laguna ventilada ^d	1-2	1-3 ^g	1-2	0-1
Zanja de oxidación ^b	1-2	0-2	1-2	0-1
Desinfección ^d	2-6 ^g	0-1	0-4	0-3
Estanques de estabilización de desechos ^e	1-6 ^g	1-3 ^g	1-4	1-4
Depósitos de efluentes ^f	1-6 ^g	1-3 ^g	1-4	1-4

Fuente: Teichmann 1986 (citado por OMS, 1989)

^a Se necesitan investigaciones más detalladas para confirmar los resultados.

^b Incluida la sedimentación secundaria.

^c Incluidos los estanques de sedimentación.

^d Cloración u ozonación.

^e Los resultados dependen del número de estanques en serie y de otros factores ambientales.

^f Los resultados dependen del tiempo de retención, que varía con la demanda.

^g Con un buen diseño y con manejo apropiado es posible cumplir con las directrices recomendadas.

En general, los sistemas ordinarios de tratamiento de aguas residuales no son eficaces para eliminar huevos de helmintos, por lo tanto se emplean los estanques de estabilización de aguas residuales que suelen ser el mejor método de tratamiento de estas aguas en climas cálidos. Se puede diseñar una serie de lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración con un tiempo global de retención hidráulica de 10-50 días, según la temperatura prevista y la calidad exigida al efluente, para lograr que se elimine una cantidad suficiente de helmintos.

Los efluentes de las lagunas de estabilización, por su calidad bacteriológica, pueden usarse en cualquier actividad agropecuaria, desde la horticultura, los cultivos agroindustriales y acuicultura hasta la forestación. El dimensionamiento de estos sistemas estará ligado a la calidad de los efluentes requerida para cada tipo de uso.

➤ **Tratamiento terciario**

El tratamiento terciario de un proceso de depuración permite el refinamiento de los efluentes del tratamiento secundario por medio de procesos más complejos de carácter fisicoquímico y biológico. Se busca por lo general remover los remanentes de nitrógeno, fósforo, orgánicos e inorgánicos disueltos y acondicionar los lodos procedentes de los tratamientos para su aprovechamiento o disposición final (MAVDT, 2002).

La Tabla N° 4.8 resume los rendimientos alcanzables en las diferentes unidades de tratamiento según el RAS 2000.

Tabla N° 4.8. Eficiencias típicas de remoción.

Eficiencia de remoción de constituyentes, porcentaje							
Unidades de tratamiento	DBO	DQO	SS	P	N Org	NH₃-N	Patógenos
Rejillas	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	Desp.
Lodos activados (convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	Desp.
Filtros percoladores							
Alta tasa, roca	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15	Desp.
Super tasa, plástico	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	
Cloración	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100
Reactor UASB	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp.
Reactor RAP	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp.
Filtros anaeróbicos	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp.
Lagunas de oxidación							
Lagunas anaeróbicas	50-70	-	20-60	-	-	-	90-99.99
Lagunas aireadas	80-95	-	85-95	-	-	-	90-99.99
Lagunas facultativas	80-90	-	63-75	30	-	-	90-99.99
Lagunas de maduración	60-80	-	85-95	-	-	-	90-99.99
Ultravioleta	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	Desp.	100

Desp. Despreciables

4.4 REUSO DE AGUAS RESIDUALES

La necesidad de utilizar el recurso agua de una manera más racional, plantea entonces la idea de que siempre que sea posible el agua no debe ser utilizada sólo una vez, sino que debe ser reutilizada de forma planificada para poder satisfacer la demanda global, por lo tanto la reutilización planificada de este recurso está cobrando cada vez más importancia. El reuso del agua es el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en actividades diferentes a las que las originó (MAVDT, 2001).

Muchas necesidades actuales en el sector residencial, comercial e industrial pueden ser satisfechas con aguas de menor calidad. El riego de parques y jardines, el lavado de pisos, la construcción de obras civiles y el lavado de vehículos son actividades que no requieren agua potable. En el sector industrial, los sistemas de aire acondicionado y de enfriamiento industrial, el tratamiento de gases por burbujeo tampoco necesitan agua potable para su funcionamiento y sin embargo su utilización es práctica común.

Algunas de las ventajas que presenta el reuso son las siguientes:

- Se disminuye o elimina el pago por concepto de tasa retributiva.
- Se mejora la productividad agrícola, industrial y minera al utilizar aguas residuales domésticas como materia prima.
- Se minimiza el uso de materias primas en la industria y el agro.
- Se incrementa la rentabilidad de los procesos o cultivos.
- Se evita la contaminación de fuentes superficiales y se cuenta con suministro constante de aguas residuales.
- Se emplea racionalmente el agua dulce especialmente en zonas áridas y semiáridas.
- Se reduce la necesidad de fertilizantes y se evita la eutrofización de lagos.
- Se enriquece el suelo con humus y se controla la erosión.
- Se lucha contra la desertificación mediante riego y fertilización de bosques.
- Se mejora el paisaje y espacios verdes en la periferia de ciudades.

Los principales tipos y aplicaciones del reuso se clasifican de acuerdo al sector o infraestructura que recibe el beneficio en (Mujeriego, 2005):

- ✓ Los usos urbanos (jardinería, incendios, lavado de calles y automóviles).
- ✓ Los usos industriales (refrigeración, lavado de vagones de ferrocarril).
- ✓ El riego agrícola y forestal.
- ✓ Los usos ornamentales y recreativos.
- ✓ La mejora y preservación del medio natural.
- ✓ La recarga de acuíferos.

La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua regenerada, tanto para cultivo hortícola (consumo crudo) como de cultivos con procesamiento posterior, cereales, cítricos, y viñedos, y tanto mediante riego por aspersión, micro-aspersión y goteo, como por riego por inundación (Díaz, 2003).

En los dos últimos decenios se ha presentado un gran incremento en la utilización de aguas residuales para regadío; este hecho se debe a varios factores a saber (OMS, 1990):

- La escasez de aguas de otra procedencia para riego.
- El costo elevado de los abonos artificiales.
- La demostración de que los riesgos para la salud y los daños para el suelo son mínimos si se adoptan las precauciones necesarias.
- El costo elevado de las instalaciones modernas de tratamiento de aguas residuales.
- La aceptación sociocultural de esta práctica.
- El reconocimiento de su utilidad por los encargados de planificar los recursos hídricos.

4.5 CALIDAD DEL AGUA PARA REUSO

Acorde con las directrices de la OMS (1989) uno de los criterios más importantes para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas es el nivel de riesgo microbiológico que presente el agua después del tratamiento. El tratamiento, si se considera su reuso para propósitos agrícolas, se debe centrar en la eliminación de los agentes patógenos.

Dado que el origen fecal de las aguas residuales no tiene duda, se propuso inicialmente, los coliformes fecales como indicadores de la contaminación fecal y se plantearon directrices para su uso en el sector agrícola, sin embargo, los coliformes fecales son indicadores menos satisfactorios de los virus excretados y tienen uso muy limitado cuando se trata de protozoarios y helmintos, para los cuales no existen indicadores seguros (Suematsu, 1995). En este sentido el uso de indicadores como huevos de helmintos parece ser un buen indicador, al menos para la presencia de parásitos, como lo muestran las guías de OMS (1989).

Dadas estas consideraciones en una reunión de expertos celebrada en Engelberg, Suiza en 1985 se recomiendan las directrices recogidas en las Tablas N° 4.9 y 4.10, éstas se basan en el hecho de que en muchos países en desarrollo los principales riesgos reales para la salud, guardan relación con las helmintiasis y que, por tanto, el uso inocuo de aguas residuales en agricultura o acuicultura exigiría la eliminación casi completa de los helmintos. En estas directrices se recomienda que las aguas residuales tratadas contengan:

- ✿ Menos de 1 huevo viable de nematodo intestinal por litro, lo cual implica un grado muy elevado de eliminación de huevos (> al 99%) para el riego restringido y no restringido. El riego restringido hace referencia al riego de árboles, forrajes y cultivos industriales, árboles frutales y pastos. Esta consideración tiene por objeto proteger la salud de los trabajadores agrícolas, muy expuestos a la infección por nematodos intestinales. Las aguas residuales que cumplan con este parámetro contendrán muy pocos quistes de protozoos o ninguno, de manera que los trabajadores agrícolas y los

consumidores estarán protegidos contra las infecciones por protozoos. De manera similar, las aguas residuales no contendrán huevos de *Taenia* (o en casos excepcionales contendrá muy pocos), de manera que el ganado apacentado estará protegido contra la *Cysticercus bovis* y, por consiguiente, también lo estarán los consumidores por la solitaria bovina. Cabe anotar que los estudios prácticos indican que las concentraciones de helmintos raras veces son superiores a 1000 huevos/L, aun en las zonas endémicas (OMS, 1989).

- ✿ Menos de una media geométrica de 1000 coliformes fecales por cada 100 ml para riego no restringido, el cual comprende plantas comestibles, incluidas las que se consumen crudas, así como terrenos deportivos y parques públicos. Esta recomendación tiene por objetivo proteger la salud de los consumidores, especialmente de hortalizas y verduras para ensalada. Esta concentración implica una supresión muy elevada de estas bacterias (4-6 unidades log₁₀ o >99,99%).

Tabla N° 4.9. Directrices microbiológicas provisionales de calidad para la reutilización de aguas residuales tratadas en el riego agrícola

Proceso de reutilización	Nemátodos intestinales^a (media aritmética del número de huevos viables por litro)	Coliformes fecales (media geométrica por 100ml)
<i>Riego restringido^b</i> Riego de árboles, cultivos industriales, árboles frutales ^c y pastos ^d	≤1	Sin aplicación
<i>Riego no restringido</i> Riego de plantas comestibles, terrenos deportivos y parques públicos ^e	≤1	≤ 1000 ^f

^a *Ascaris*, *Trichuris* y anquilostomas

^b En todos los casos se necesita un grado mínimo de tratamiento equivalente al menos a un estanque anaerobio de 1 día de duración seguido de un estanque facultativo de 5 días o su equivalente.

^c El riego debe cesar dos semanas antes de recolectar la fruta, y no puede recogerse ningún fruto caído al suelo.

^d El riego debe cesar dos semanas antes de que se permita apacentar al ganado.

^e Los factores epidemiológicos locales pueden exigir normas más restrictivas para terrenos públicos de césped, especialmente en hoteles de zonas turísticas.

^f Cuando las plantas comestibles se consumen siempre bien cocinadas, esta recomendación puede ser menos estricta.

Fuente: Centro Internacional de Referencia para la Evacuación de Desechos (1985) (Citado por OMS, 1990)

La Tabla N° 4.10 presenta las directrices propuestas por la OMS sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, donde se especifica tanto las pautas explícitas (por ejemplo, la concentración máxima de coliformes) como el tratamiento mínimo requerido (primario, secundario o terciario) de acuerdo con la clase de cultivo que se va a regar (consumible, no consumible).

Tabla N° 4.10. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura ^a

Categoría	Condiciones de Aprovechamiento	Grupo Expuesto	Nematodos Intestinales ^b (Media Aritmética N° de Huevos por litro ^c)	Coliformes Fecales (Media Geométrica N° por 100 ml ^c)	Tratamiento de Aguas Residuales necesario para lograr la Calidad Microbiológica Exigida
A	Riesgo de Cultivos que comúnmente se consumen crudos	Trabajadores, consumidores y público	<1	<1000 ^d	Serie de estanques de estabilización que permiten lograr la calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente.
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, pradera y árboles ^e	Trabajadores	<1	No se recomienda ninguna norma	Retención en estanques de estabilización por 8 a 10 días o eliminación equivalente de helmintos
C	Riego localizado de cultivos en la categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos.	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable	Tratamiento previo según lo exija la tecnología de riego por lo menos que sedimentación primaria

^a En casos específicos se debería tener en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar y modificar las directrices de acuerdo a ello.

^b Especies *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostomas.

^c Durante el período de riego.

^d Conviene establecer una directriz más estricta (< 200) coliformes fecales por 100 ml) para prados públicos, como los de los hoteles, con los que el público puede entrar en contacto directo.

^e En el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de cosechar la fruta y ésta no se debe recoger del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Fuente: (OMS 1989)

Los cultivos se pueden clasificar según el grupo expuesto y las medidas de protección de la salud que exigen en: (Ver Tabla N° 4.10)

Categoría A: Se necesita protección para los consumidores, los trabajadores agrícolas y el público en general. Aquí se incluyen cultivos que se consumen crudos, frutas regadas por aspersión y lugares sembrados de pasto (campos de deporte, parques públicos y prados).

Categoría B: Se necesita protección sólo para trabajadores agrícolas. Esto incluye cultivos de cereales, cultivos industriales (como el algodón y el sisal), cultivos alimentarios empleados para fabricación de enlatados, cultivos forrajeros, praderas y árboles. En ciertas circunstancias, se podría considerar que algunos cultivos pertenecen a la Categoría B si no se consumen crudos (por ejemplo, la papa) o si crecen a una distancia considerable del suelo (por ejemplo, el chili). En esos casos hay que evitar la contaminación del cultivo mediante riego por aspersión o caída al suelo y asegurarse de que la contaminación de la cocina con esos productos antes de su preparación no represente un peligro para la salud.

Categoría C: hace referencia al riego localizado de cultivos en la categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos.

El grupo de expertos llegó a la conclusión de que no se necesita recomendar directrices sobre la calidad bacteriológica en casos en que los agricultores son el único grupo expuesto, ya que son pocas o nulas las pruebas de que estén expuestos al riesgo de infección por bacterias; sin embargo, conviene reducir hasta cierto punto la concentración bacteriana en las aguas residuales empleadas para cualquier fin.

La extinción paulatina natural de los agentes patógenos sobre el terreno constituye un valioso factor de seguridad para reducir los riesgos potenciales para la salud. La inactivación de agentes patógenos por medio de irradiación con rayos ultravioleta, desecación y depredadores biológicos naturales cuando se emplean efluentes para riego de cultivos y del suelo, puede llevar a una reducción suplementaria del 90 al 99 % de los agentes patógenos a los pocos días del empleo. Además de este importante factor, al formular las directrices se tuvo en cuenta los estudios efectuados sobre el terreno y en el laboratorio que indicaban que era poco o nulo el número de agentes patógenos detectables en los efluentes de aguas residuales con 1000 coliformes fecales por 100 ml.

Los valores de las directrices dadas en las Tablas N° 4.9 y 4.10, se deben interpretar con cuidado y, de ser necesario, modificar según los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar. Se puede justificar mayor precaución donde hay grupos muy expuestos que son más susceptibles a la infección que la población en general, por ejemplo, las personas carentes de inmunidad a las infecciones endémicas locales. Por otra parte, algunas veces se puede justificar un cierto grado de flexibilidad, por ejemplo, donde los helmintos intestinales no son endémicos, no es necesario eliminar un 99,9 % de los huevos. Los cultivos comestibles como el tomate para enlatados y el maní para tostar podrían considerarse como cultivos industriales y los campos de deporte que no se pretenden usar por muchas semanas después del riego se podrían incluir en la categoría B.

El valor indicado en la directriz sobre huevos de helmintos en las Tablas N° 4.9 y 4.10 es una meta para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales y no una norma que exige exámenes regulares de la calidad de los efluentes.

Además de la importancia que tiene la evaluación de la contaminación microbiológica del agua residual, debe considerarse la presencia de sustancias químicas que pueden ser peligrosas, ya que constituyen un factor de riesgo tanto para la salud humana como para el deterioro del suelo o de los cultivos que se estén regando. Los problemas en la salud humana se podrían presentar debido a la manipulación de estas aguas o por el consumo de los productos generados con el uso de aguas residuales si en los efluentes existe una concentración elevada de estos compuestos. La EPA (2004) presenta una serie de valores guía sobre algunos de los elementos químicos que deben ser tenidos en cuenta cuando el agua va a ser utilizada para reuso agrícola, los cuáles se encuentran en la Tabla N° 4.11.

Tabla N° 4.11. Valores máximos de elementos químicos para la evaluación de aguas residuales tratadas con fines de reuso

Elemento	Para uso por largo tiempo (mg/l)	Para uso por corto tiempo (mg/l)	Observaciones
Al (Aluminio)	5,0	20.0	Puede anular la productividad en suelos ácidos (pH < 5,5), pero los suelos más alcalinos con un pH > 7,0 precipitan el ión y eliminan la toxicidad.
As(Arsénico)	0,10	2.0	La toxicidad a las plantas puede variar considerablemente, desde 12 mg/l para el césped de Sudán hasta menos de 0,05 mg/l para el arroz
Be(Berilio)	0,10	0.5	La toxicidad a las plantas puede variar considerablemente, desde 5 mg/l para la col rizada hasta 0,5 mg/l para el frijol bush.
Bo (Boro)	0.75	2.0	Esencial para el crecimiento de las plantas, óptimos valores se obtiene con bajos concentraciones. Es toxico para plantas muy sensitivas a 1 mg/L. La mayoría de pastos son relativamente tolerantes entre 2.0 y 10 mg/L
Cd (Cadmio)	0,01	0,05	Es tóxico para los frijoles, remolacha y nabos en concentraciones tan bajas como 0,1 mg/l en soluciones de nutrientes. Se recomiendan límites conservadores por su acumulación en plantas y suelos en concentraciones dañinas al ser humano
Co (Cobalto)	0,05	5.0	Tóxico para las plantas del tomate en soluciones de nutrientes a 0,1 mg/l. Tiende a inactivarse en suelos alcalinos o neutros.
Cr (Cromo)	0,10	1.0	Generalmente no se le reconoce como un elemento esencial para el crecimiento Se recomiendan límites conservadores debido a la falta de conocimiento sobre su toxicidad a las plantas
Cu (Cobre)	0,20	5.0	Tóxico a diversas plantas de 0,1 a 1,0 mg/l en soluciones de nutrientes
F(Flúor)	1,0	15.0	Se inactiva en suelos neutros o alcalinos
Fe(Hierro)	5,0	20.0	No es tóxico a las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación y pérdida de disponibilidad de fósforo y molibdeno esenciales. El riego por aspersión puede formar depósitos desapercibidos en las plantas, equipo y edificaciones aledañas
Li (Litio)	2,5	2.5	Es tolerado por la mayoría de los cultivos hasta 5 mg/l, es móvil en el suelo y tóxico para los cítricos en concentraciones bajas (<0,075 mg/l). Actúa de manera similar al boro.
Mn (Manganeso)	0,20	10.0	Es tóxico para diversos cultivos en pocas décimas o en pocos mg/l, pero generalmente solo en suelos ácidos
Mo (Molibdeno)	0,01	0.05	No es tóxico para las plantas en concentraciones normales en el suelo y agua. Puede ser tóxico para el ganado si el forraje crece en suelos con altas concentraciones de molibdeno disponible.
Ni (Níquel)	0,20	2.0	Tóxico para diversas plantas desde 0,5 mg/l hasta 1,0 mg/l; la toxicidad se reduce en suelos neutros o alcalinos
Pb(Plomo)	5,0	10.0	En altas concentraciones puede inhibir el crecimiento de las células de las plantas
Se(Selenio)	0,02	0.02	Es tóxico a las plantas en concentraciones tan bajas como 0,025 mg/l y tóxico al ganado si el forraje crece en suelos con niveles relativamente altos de selenio añadido. Es un elemento esencial para los animales pero en concentraciones muy bajas.
Sn (Estaño) Ti (titanio) W(Tungsteno)	-	-	Las plantas lo excluyen efectivamente; se desconoce la tolerancia específica
V (Vanadio)	0,10	1.0	Tóxico para diversas plantas en concentraciones relativamente bajas
Zn(Zinc)	2,0	10.0	Tóxico para muchas plantas en variadas concentraciones; la toxicidad se reduce a pH > 6,0 y en suelos orgánicos de fina textura.

Fuente: EPA 2004

Las aguas residuales de origen doméstico y de las redes municipales normalmente suelen tener una calidad fisicoquímica adecuada para el riego de cultivos y solamente requiere especial atención la sensibilidad al boro de las plantas regadas. Usualmente el agua residual empleada para reuso posee cantidades suficientes de este elemento para corregir deficiencias en el suelo y en las aguas residuales domésticas alcanza concentraciones entre 0.86 - 1.76 mg/L (Lucho-Constantino et al, 2005), por lo tanto no ocasionaría inconvenientes si se utilizan para el riego en plantas sensitivas como son: manzano, limonero, naranjo, peral, melocotonero, aguacate, uva, guisantes, cebolla, ajo, patata dulce, trigo, cebada, girasol y fresa.

Otros parámetros de calidad química del agua residual tratada que deben ser evaluados y considerados para evitar los posibles daños a las plantas y/o contribuir al deterioro del suelo son la salinidad y los nutrientes.

La salinidad es el parámetro más importante para determinar la posibilidad de usar el agua para irrigación (EPA, 2004), esta se determina por la medición de la conductividad eléctrica y/o los sólidos disueltos totales en el agua. Se estima que el 23% de los cultivos se dañan por la sal (Postel, 1999; Citado por EPA 2004). La salinidad del suelo está relacionada con la del agua de riego; por lo tanto, el crecimiento de la planta, el rendimiento de la cosecha y la calidad de los productos están afectados por las sales disueltas totales en el agua de irrigación.

En la Tabla N° 4.12, se presentan los valores de conductividad eléctrica y sólidos disueltos entre otros, que deben considerarse para el reuso de aguas residuales, dada la importancia de definir la concentración de estos compuestos en el agua residual, que puedan tener efecto en el suelo y las plantas; además presenta también el grado de restricción sobre su uso.

Tabla N° 4.12. Parámetros de calidad de reuso de aguas residuales. FAO 1985

Problema potencial de irrigación	Unidades	Grado de restricción sobre su uso		
		Ninguno	Ligero a Moderado	Severo
SALINIDAD				
CE _w	dS/m	<0.7	0.7 - 3	> 3
STD	mg/L	<450	4.50 - 2000	> 2000
INFILTRACION				
RAS = 0-3		>0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
3-6		>1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
6-12		>1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
12-20		>2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
20-40		>5	5 - 2.9	< 2.9
TOXICIDAD ESPECIFICA POR IONES				
Sodio (Na ⁺) Irrigación superficial	me/L	<3	3 - 9	> 9
Irrigación aspersion	me/L	<3	>3	-
Cloro (Cl ⁻) Irrigación superficial	me/L	<4	4 - 10	> 10
Irrigación aspersion	me/L	<3	>3	-
Boro (B)	mg/L	>0.7	0.7 - 3	> 3
EFFECTOS MISCELANEOS				
Nitrógeno (NO ³ -N)				
Bicarbonato	mg/L	<5	5-30	> 30
Aspersion muy alta	me/L	<1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
pH		Rango normal 6.5 - 8.4		

CE_w: Conductividad eléctrica
dS/m: deciSiemen por metro (en SI)
STD: Sólidos totales disueltos
RAS: relación de adsorción de sodio
me/L: miliequivalente por litro

El contenido de nutrientes en las aguas residuales domésticas se ha considerado como elemento importante para el reuso en la agricultura. Usualmente estos elementos se presentan en cantidad suficiente en las aguas residuales domésticas para el reuso agrícola (EPA, 2004). El nitrógeno, el fósforo y el potasio son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de las plantas y su presencia en el agua aumenta el valor para el riego.

Cuando se vierte nitrógeno o fósforo en el medio acuático, puede darse el desarrollo de formas de vida acuáticas indeseables. Cuando se vierten cantidades excesivas de estos elementos en el terreno, el nitrógeno puede llegar a contaminar las aguas subterráneas. Además excesos pueden disminuir la producción y/o la calidad en cultivos como el algodón, el tomate para conserva, la remolacha, la patata, el melocotonero, el albaricoquero, el manzano y la vid (Bouwer y Idelovitch, 1987, Citados por Ramos, 1996).

Un problema adicional del aporte de nitrógeno por el agua residual es que la demanda de nitrógeno y de agua puede no coincidir en el tiempo: en la mayoría de los cultivos la demanda de nitrógeno es baja durante la fase inicial del cultivo, aumenta durante la fase de crecimiento y vuelve a ser baja en la fase final del cultivo, mientras que la demanda de agua aún puede ser alta en la fase en que la planta ha completado su desarrollo. El exceso de nitrógeno, además de ser perjudicial para las plantas, aumenta la lixiviación de nitrato y la contaminación de las aguas subterráneas (Ramos, 1996).

El aporte de fósforo por las aguas residuales es bastante inferior al de nitrógeno (aproximadamente una cuarta parte) pero conviene tenerlo en cuenta y disminuir el aporte de fósforo en el abonado (Ramos, 1996).

Los posibles problemas que pueden presentarse debido a excesos de fósforo están relacionados con la generación de una baja productividad, eutrofización, salinización del suelo y del agua subterránea.

En la Tabla N° 4.13 se presentan las diferentes concentraciones de los diversos parámetros considerados para el reuso agrícola tanto de los efluentes procedentes del tratamiento secundario y terciario, como los necesarios cuando el objetivo tras el tratamiento es agrícola; además de la importancia que tienen cada uno de ellos para el riego.

Tabla N° 4.13. Parámetros para el reuso del agua con interés desde el punto de vista agrícola

Parámetro	Importancia para el regadío	Rango en efluentes procedente del tratamiento secundario y terciario	Objetivo tras el tratamiento para el reuso del agua con fines agrícolas
Sólidos totales en suspensión	La medida de partículas se pueden relacionar con la contaminación microbiana; pueden interferir con la desinfección; obstrucción de los sistemas de regadío; deposición.	5-50 mg/L	<5-35TSS/L
Turbidez		1-30 NTU	<0.2-35NTU
DBO5	Substrato orgánico para el crecimiento microbiano; puede generar crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución y deposición microbial (bio-fouling).	10-30mg/L	<5-45mg BOD/L
DQO		50-150mg/L	<20-200mgCOD/L
Coliformes totales	Medida del riesgo de infección debido a la presencia potencial de patógenos; puede dar lugar a bio-fouling.	<10-10 ⁷ cfu/100mL	<1-200cfu/10mL
Metales pesados	Algunas sales disueltas son nutrientes beneficiosos para el crecimiento de la planta, mientras otros pueden ser fitotóxicos o convertirse en fitotóxicos a ciertas concentraciones. Elementos específicos (Cd, Ni, Hg, Zn, etc.) son tóxicos para plantas, y por lo tanto existen límites máximos de concentración de estos elementos para el agua utilizada para irrigación.		< 0.001mgHg/L <0.01mgCd/L <0.02-0.1mgNi/L
Inorgánicos	Alta salinidad y boro son dañinos para el agua de regadío de cultivos vulnerables.		<450-4000mgTDS/L <1mgB/L
Cloro residual	Recomendado para prevenir el crecimiento bacteriano; la concentración excesiva de cloro libre (>0.05mg/L) puede dañar algunos cultivos vulnerables		0.5-5mg Cl/L
Nitrógeno	Fertilizantes para regadío; puede contribuir a crecimiento bacteriano y eutrofización de depósitos de almacenamiento, corrosión(N-NH ₄) o incrustación (P)	10-30mgN/L	<10-15mgN/L
Fósforo		0.1-30mgP/L	<0.1-2mgP/L

Fuente: Akiçca 2005

Todos los parámetros anteriormente mencionados permiten definir el tipo de reuso de las aguas residuales tratadas generadas por los esquemas tecnológicos. En la Tabla N° 4.14, se presentan el tipo de reuso del agua residual en función del nivel de tratamiento requerido.

Tabla N° 4.14. Tipo de reuso del agua residual en función del nivel de tratamiento requerido

Calidad	Nivel de tratamiento requerido del agua residual	Tipo de reuso
Tipo I	Tratamiento terciario (serie de lagunas de estabilización ó laguna de maduración como unidad de tratamiento final de un esquema tecnológico) con remoción >99%, que alcance la calidad microbiológica requerida.	Riego en cultivos para consumo crudo (hortalizas), riego en áreas de acceso al público (campos de diversión, parques públicos) y actividades que requieran contacto directo de trabajadores, consumidores y público.
Tipo II	Tratamiento terciario con remoción del 60-99% (que se alcance la remoción de helmintos o coliformes).	Riego de cultivos de cereal, industriales, forrajes, pastos árboles, productos que se consumen y procesan comercialmente, reuso industrial.
Tipo III	Tratamiento secundario o al menos se de la sedimentación (que se alcance la remoción > 60% de DBO y SST).	Recuperación de suelo, riego de bosques y forrajes, sin presencia de personal.
Tipo IV	Tratamiento terciario (serie de lagunas de estabilización ó laguna de maduración como unidad de tratamiento final una laguna de maduración) con remoción >99%, que alcance la calidad microbiológica requerida.	Cultivo de peces (cría de peces)
Tipo V	Tratamiento secundario y terciario con remoción >60% de DBO y SST.	Recarga de acuíferos y descarga a cuerpos sensibles.

Fuente: IDEAM-UTP-CINARA 2005

4.6 RIESGOS SANITARIOS DERIVADOS DEL REUSO

Es evidente que la reutilización de agua residual representa un riesgo sanitario, tanto para el consumidor como para los trabajadores del sistema, ya que la exposición a microorganismos patógenos y a sustancias tóxicas es más elevada en estos casos que en aquéllos en los que se utilizan aguas no contaminadas con agua residual. Por este motivo, el objetivo último es reducir al mínimo la exposición a estos agentes, manteniendo así los posibles peligros sanitarios dentro de un nivel aceptable. En general, la preocupación sanitaria que estas actividades suscitan está relacionada con el grado de contacto del agua residual depurada con las personas, el tipo y la calidad del agua residual depurada y la fiabilidad de los procesos de tratamiento.

El peligro principal del uso del agua residual recuperada es, a corto plazo, el aumento de exposición de la población a los patógenos. A largo plazo, el peligro puede centrarse en la acumulación de determinados elementos o compuestos en plantas y productos de consumo que pueden afectar al hombre o a los animales.

La presencia de patógenos en el agua residual depurada puede afectar al sistema tierra/planta. El método de riego condiciona, en cierta manera, la contaminación microbiológica del cultivo; por ejemplo:

- El riego por ciclos periódicos (inundación/secado) supone una ventaja respecto al riego por aspersión (que acostumbra a ser un método de riego frecuente) porque el período entre el último riego y la cosecha puede ser más grande y, por lo tanto, favorece la acción de las condiciones ambientales.
- El riego gota a gota permite el aprovechamiento máximo del agua sin contaminar el cultivo por el contacto con el agua; se consigue con:
 - Tuberías en superficie.
 - Tuberías cubiertas con láminas de polietileno.
 - Tuberías subterráneas con el suelo cubierto con láminas de polietileno.

Determinados elementos, aunque no sean micronutrientes, pueden entrar en la planta e incorporarse en sus tejidos, quedando acumulados en ellos. Algunos autores describen también la posibilidad de que determinados virus sean capaces de penetrar al interior de las plantas, ya sea por los mecanismos normales de absorción o a través de las heridas, y permanecer en el interior de los tejidos vegetales (Steadman 1979, Citado por Departamento de Salud de Cataluña, 2004).

Además de los patógenos, hay la posibilidad de que los metales pesados y los microcontaminantes orgánicos lleguen a la tierra a partir de las aguas residuales tratadas. En relación con los patógenos, su movimiento puede ser en superficie (por escurrimiento) o en profundidad. También se debe evitar la formación de charcos superficiales más o menos estables, ya que éstos pueden facilitar la aparición de problemas de vectores.

En el Anexo 1 se presenta la supervivencia de ciertos patógenos en aguas, suelos y plantas.

4.6.1 Control a la exposición humana

Cuatro grupos de personas pueden estar expuestos al riesgo que acarrea el empleo de aguas residuales y excretas en agricultura, a saber:

- 1) Los agricultores y sus familias.
- 2) Las personas que manejan y los productos cultivados.
- 3) Los consumidores de productos cultivados.
- 4) Las personas que viven cerca de los campos respectivos.

El usuario principal del agua recuperada es el trabajador agrícola, que debe utilizar el agua para los diferentes usos previstos. Se deben tomar medidas adecuadas para garantizar la protección de los trabajadores en las zonas de reutilización. Es muy importante que estos trabajadores conozcan en profundidad los peligros sanitarios y no olviden las normas de seguridad.

Es recomendable que los trabajadores, antes de que se les permita trabajar en la reutilización de agua residual, tengan conocimiento de la posibilidad de transmisión de enfermedades del agua residual recuperada y de las precauciones que deben tomar al respecto. Esto implica que los responsables de las zonas de uso también deben conocer los aspectos sanitarios de la reutilización. Todo el que esté relacionado con la reutilización debe mantener un nivel elevado de cuidado y precaución, ya que siempre hay un cierto grado de posibilidad de fallos del equipo o de errores humanos. Deben existir botiquines de primeros auxilios en las zonas de uso, de manera que cualquier pequeña herida pueda ser tratada rápidamente para evitar infecciones.

Se recomienda que todos los trabajadores que entren en contacto con el agua residual recuperada durante su jornada de trabajo se cambien de ropa y se laven perfectamente una vez acabado el trabajo y antes de dejar la zona de uso.

Se debe tener cuidado para que la comida que se lleve a la zona de uso no se contamine; además, no se debe llevar comida a las zonas que todavía estén húmedas después del uso. Hay que pensar también que los trabajadores deben tener acceso fácil a agua segura para beber. Esta agua debe llevarse en contenedores seguros y protegidos del contacto con el agua recuperada o el polvo. No se deben dejar directamente sobre el suelo ni los recipientes de agua ni los de comida.

Con respecto a los peatones y los vecinos de las viviendas próximas a la zona de aplicación, se deben prever medios adecuados de información. Esta información debe incluir señales bien visibles en la zona de riego, que deben decir claramente que el agua que se está usando en la zona es agua recuperada a partir de agua residual. Las señales deben estar situadas en lugares necesariamente visibles; las letras deben ser lo suficientemente grandes como para que se puedan leer a distancia. Con respecto a los campos de golf, se sugiere que se haga constar en las tarjetas de juego que se usa agua residual recuperada para el riego.

Todas las válvulas, salidas y/o cabezales de aspersores deben estar convenientemente señalizados para avisar a la gente que el agua no es potable ni segura para beber o bañarse; además, el material sólo debe ser utilizado por personal autorizado.

Se deben tomar las precauciones necesarias para asegurar que el agua recuperada no entre en contacto con las personas y que no alcance las vías de paso, caminos, fuentes de agua potable, embalses o depósitos o zonas que no estén bajo el control del usuario.

Se debe asegurar que existe un número adecuado de fuentes de agua potable, de manera que la gente no necesite beber agua recuperada. Las fuentes de agua potable deben estar protegidas de la aspersion directa.

5. METODOLOGÍA

5.1 CONCEPCION GENERAL DE LA INVESTIGACION

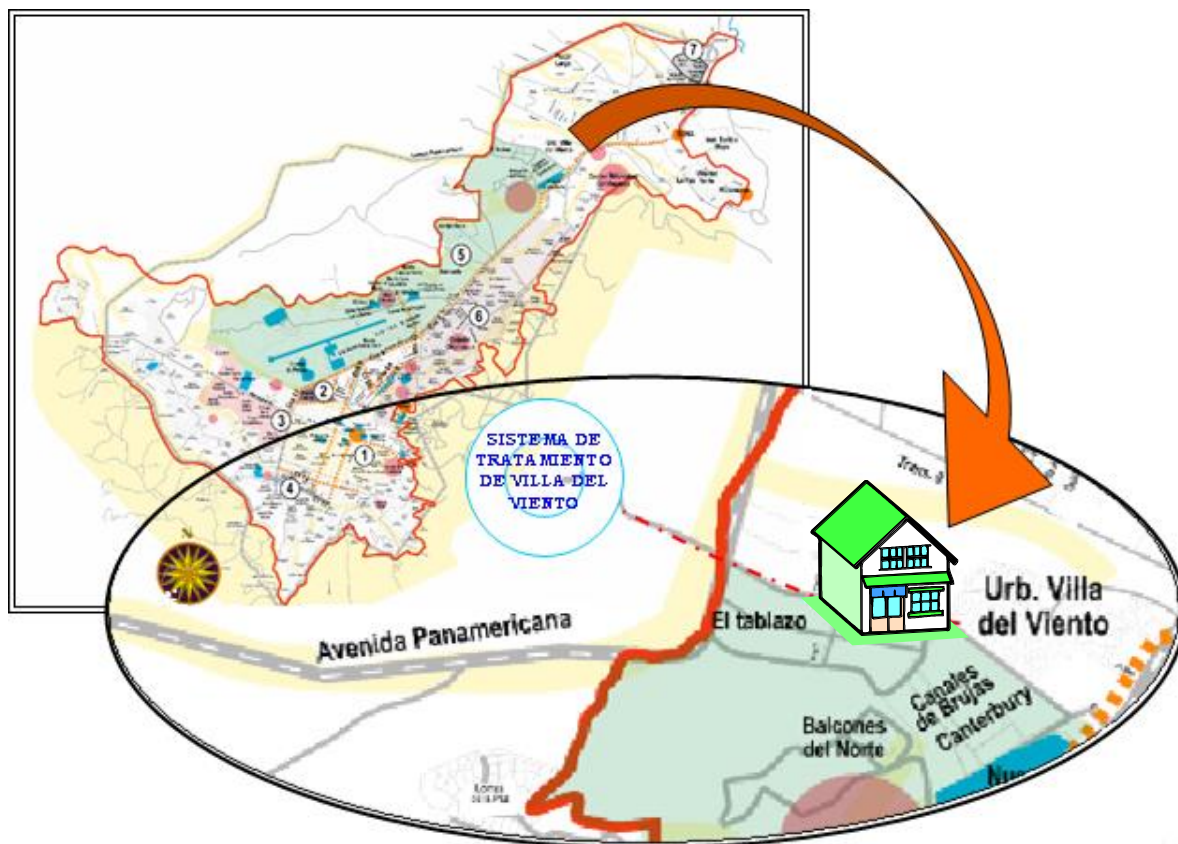
La investigación tiene como objetivo principal estudiar el potencial reuso en la actividad agrícola y forestal del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, compuesto por dos Tanques Imhoff y dos Filtros Anaeróbicos de flujo ascendente que trabajan en paralelo.

5.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se realizó en el Sistema de Tratamiento que recibe las aguas residuales procedentes de la Urbanización Villa del Viento, situada al norte de la ciudad de Popayán en un sector aledaño al “Tablazo”, con una superficie aproximada de 10 Ha, en la cual se levantan 750 casas de tipo unifamiliar (aproximadamente 4000 habitantes). La Urbanización cuenta con un sistema de alcantarillado separado, compuesto por la red de evacuación de aguas residuales domésticas y la de captación y disposición de aguas lluvias (Zambrano y Calderón, 2000).

En la figura 5.1 se presenta la ubicación de La Urbanización Villa del Viento y el Sistema de Tratamiento en el municipio de Popayán.

Figura N° 5.1. Ubicación de la Urbanización y Sistema de Tratamiento de Villa del Viento

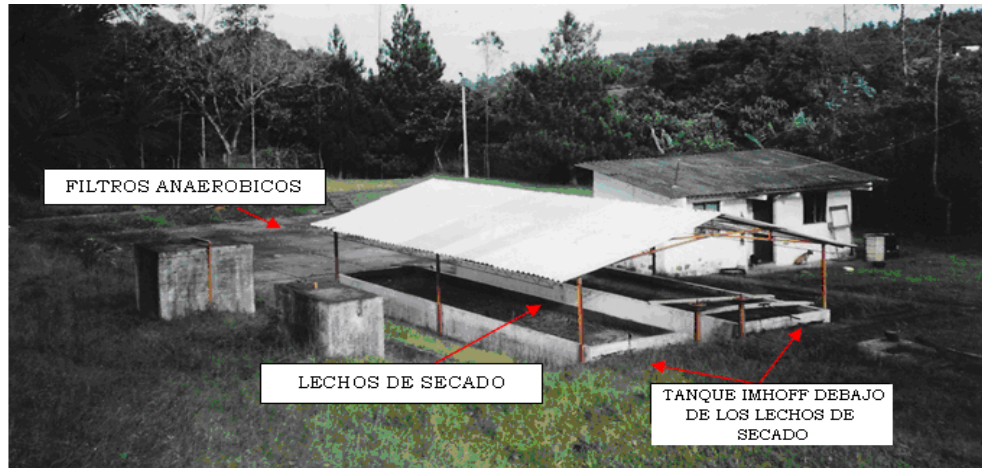


Fuente: POT Popayán (2002-2011)

5.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El Sistema de Tratamiento de Villa del Viento consta de un tratamiento preliminar, primario y secundario, además dispone de una cámara de cloración, lechos de secado y un dispositivo para el control de olores. Los dispositivos considerados en el presente estudio pueden observarse en la Fotografía N° 5.1:

Fotografía N° 5.1. Sistema de Tratamiento de Villa del Viento



Tratamiento Preliminar compuesto básicamente por una caja de concreto que contiene dos rejillas formadas por barras con diferentes separaciones: gruesas con separación de 5 cm, y medianas con separación de 2 cm. El ángulo formado con la horizontal es de 30°, la limpieza se realiza manualmente con un rastrillo.

Tratamiento Primario constituido por dos Tanques Imhoff trabajando en paralelo, los cuales tratan cada uno la mitad del caudal total de agua residual doméstica producida. Para el diseño se consideró un consumo de agua potable de 220 L/hab/día y un aporte al alcantarillado sanitario de 180 L/hab/día. Los Tanques Imhoff son de forma rectangular con unas dimensiones de 11.40 m de largo por 3.70 m de ancho y una profundidad total de 5.45 m, la zona de sedimentación posee las siguientes dimensiones: 2.30 m de ancho por 11.40 m de largo, profundidad de 1.90 m, proyección de las ranuras de 0.30m y profundidad del canal de 0.30m.

Tratamiento Secundario emplea dos filtros anaeróbicos de flujo ascendente trabajando en paralelo pero eventualmente podrán hacerlo en serie, pudiendo independizarse uno del otro para labores de mantenimiento y reparación. El tiempo teórico de retención de diseño fue de 24 horas. Posee las siguientes dimensiones: 16 m de largo, 12.20 m de ancho, 2.16 m de profundidad del agua y 1.8 m de profundidad de lecho en grava con una granulometría para el material filtrante para cada unidad de:

Unidad 1:

- 1 capa de 1.5 m con material de tamaños comprendidos entre 3 y 5 cm.
- 1 capa de 1.5 m con material de tamaños comprendidos entre 2 y 3 cm.

Unidad 2:

- 1 capa de 1.0 m de espesor constituida con grava de tamaños entre 2 y 3 cm.
- 1 capa de 1.0 m con material de tamaños entre 1.2 y 2 cm.
- 1 capa de 1.0m de espesor constituida con grava de tamaños entre 0.5 y 1.2cm.

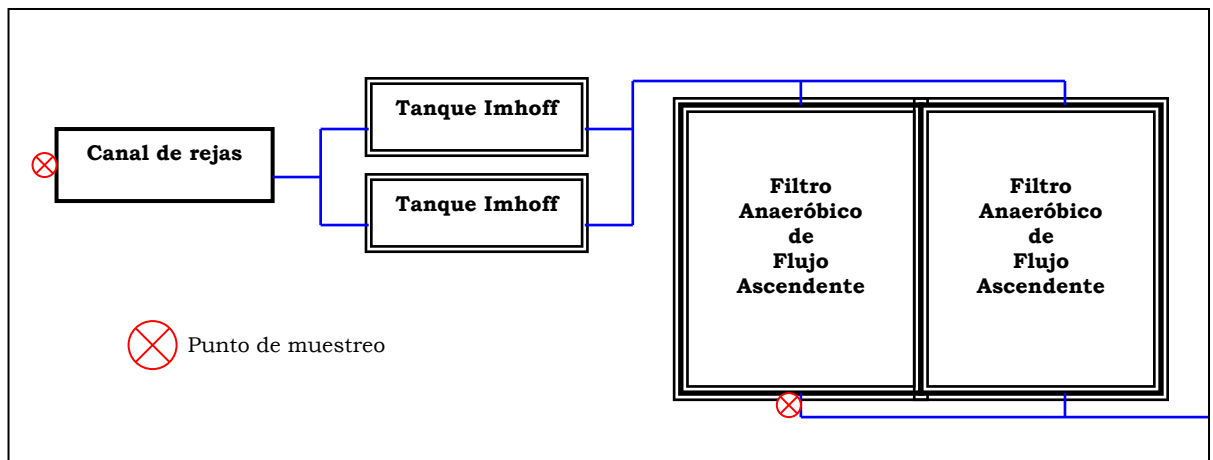
Para un mayor detalle de las estructuras Ver Anexo 2.

5.4 ANALISIS DE LABORATORIO

• **Puntos y frecuencias de muestreo.**

Los puntos de muestreo se seleccionaron buscando identificar tanto el grado de calidad del agua en el efluente como la eficiencia de remoción de los diferentes parámetros considerados en el presente estudio (ver figura 5.2). En este sentido se identificaron dos puntos de muestreo: agua cruda y el efluente final del tratamiento. En las fotografías N° 5.2 y 5.3, pueden observarse los puntos de muestreo seleccionados.

Figura 5.2. Ubicación de puntos de muestreo



Fotografía N° 5.2. Punto de muestreo a la entrada, agua cruda.



Fotografía N° 5.3. Punto de muestreo a la salida, agua tratada.



La frecuencia de muestreo considerada busco contar con un número de muestras mínimo que permitiera un adecuado manejo estadístico. Se consideró un periodo de evaluación de 2 meses constituido por 2 muestreos semanales en los puntos definidos.

- **Parámetros de medición**

Para el desarrollo del objetivo 1, es decir, la determinación de la calidad microbiológica del agua se consideraron los siguientes parámetros: Coliformes Fecales y Huevos de Helmintos. Estos dos parámetros han sido considerados ya que la mayoría de normas y guías sugeridas en la literatura los incluyen como medida de caracterización.

Dado que el Sistema de Tratamiento de Villa del Viento maneja únicamente aguas residuales domésticas, en las cuáles las concentraciones de sustancias químicas son casi siempre (excepto vertidos industriales específicos) inferiores a los niveles para los que se han descrito respuestas adversas, se esperaría que el agua residual motivo de estudio no posea concentraciones considerables de estos elementos; por lo tanto el objetivo 2, se desarrolló únicamente considerando los parámetros que requieren las plantas para su desarrollo y aquellos que evitan o minimizan el uso de agroquímicos, o puedan afectar el suelo. Estos son: pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y nutrientes (fosfatos, nitrógeno total, orgánico y amoniacal).

Para la evaluación del funcionamiento general de la planta se consideró la medición del caudal en cada uno de los puntos de muestreo seleccionados, el cual permite determinar los tiempos teóricos de retención hidráulicos promedio tanto del Tanque Imhoff como del Filtro Anaeróbico de flujo ascendente. El caudal a la entrada del Sistema de Tratamiento se midió utilizando un molinete marca A.OTT KEMPTEN, a la salida del filtro anaeróbico se realizaron mediciones utilizando una probeta plástica graduada de 1000 ml marca BRAND y un cronómetro. Los equipos utilizados pueden observarse en el Anexo 3.

Una vez obtenidas las muestras (simples) de agua cruda y efluente final, se procedió a realizar los análisis el mismo día de recolección en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Todos los análisis fueron realizados siguiendo las técnicas, procedimientos y recomendaciones del Standard Methods. En la Tabla N° 5.1, se presentan los equipos y métodos utilizados para realizar los análisis de los diferentes parámetros evaluados en el laboratorio.

Tabla N° 5.1. Métodos y Equipos de Análisis de Laboratorio

Parámetros	Equipo Utilizado	Método Número*
Microbiológico		
Coliformes Fecales	Micropipeta BRAND 100-1000 µl made in Germany, propipeta, material de vidriería PYREX, mechero Bunsen, Cajas de petri 5 cm de diámetro, tubos de ensayo, bomba de vacío GAST, autoclave NAPCO E series model 9000-D, almohadillas GELMAN, equipo de filtración FISHERBRAND made in USA, filtros 47 mm ADVANTEC, MFS, inc, estufa MEMMERT.	9222
Huevos del Helminto	Vaso de plástico 1L, manguera de latex, centrifugadora BECTON D'CKINSON & CO, tubos de ensayo, microscopio ZEISS ICSKF2, macmster egg slide de dos recámaras.	OMS 1996 – Método Bailenger
Físico químicos		
pH	pH-metro handylab1 SCHOTT L7137A	4500B
Conductividad Eléctrica	Conductidimetro HANNA instruments HI8733	2510
Sólidos Disueltos	Cápsulas de porcelana, filtros Whatman 40, estufa eléctrica, estufa MEMMERT, campana desecadora glaswerk wertheim, balanza analítica.	2540C
Nitrógeno Total, orgánico y Amoniacal	Material de vidriería marca BOECO (Germany), balanza analítica modelo METTLER AE240, equipo de destilación Kjeldhal PYREX, material de vidriería SCHOTT Duran West Germany, estufa eléctrica HACEB, plancha agitadora CERAMAG midi Kika Works USA, Propipeta BEL-ART products USA	4500-N 4500-NH ₃ 4500-N _{org}
Fosfatos	Espectofotómetro HACH modelo DR/2010, propipeta	4500-P

Fuente: Standard Methods for the Examination of Water an Wastewater, 20th Edition. Washington. Tomado de APHA, AWWA, WEF (1998)

5.5 MANEJO DE LA INFORMACION

Los datos de campo y de laboratorio obtenidos en la fase experimental fueron almacenados en tablas de datos para después ser manejados y organizados en hojas electrónicas de Microsoft Excel 2003, con los cuales se elaboraron estadísticas descriptivas tales como:

- Promedio: media aritmética, resulta del cociente de dividir la suma de los datos entre el número total de estos.
- Número Máximo: es el valor máximo de una lista de valores.
- Número Mínimo: es el valor mínimo de una lista de valores.
- Desviación Estándar: es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media y se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza.
- Número de Datos: es el número total de datos de la muestra.
- Intervalo de Confianza: proporciona un valor que se puede utilizar para construir un intervalo de confianza para una media de una población. El intervalo de confianza es el intervalo dentro del cual cabría esperar que estaría incluido el valor del parámetro o los parámetros en cuestión. Para definir un intervalo de confianza, se supone un θ que es un parámetro desconocido. Para obtener una estimación del intervalo de θ , es necesario encontrar dos estadísticos L y U tales que la declaración de probabilidad $P(L \leq \theta \leq U) = 1-\alpha$ sea verdadera. Al intervalo $L \leq \theta \leq U$ se le llama intervalo de confianza de $100(1-\alpha)$ por ciento para el parámetro θ .
- Media Geométrica: La media geométrica de una cantidad finita de números (por ejemplo n números) es la raíz n -ésima del producto de todos los números.

6. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA

Para evaluar el funcionamiento general del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, se consideran tanto el caudal como el tiempo teórico de retención del Tanque Imhoff y del Filtro Anaeróbico; siendo el caudal de este último, el que se plantea reutilizar en la actividad agrícola y forestal.

6.1.1 Tanque Imhoff

En la Tabla N° 6.1, se presentan los resultados de las estadísticas descriptivas para el caudal total a la entrada del sistema y el tiempo teórico de retención del tanque Imhoff, donde se observa un caudal de entrada promedio de 7.81 L/s con un intervalo de confianza entre 7.21 y 8.41 L/s, siendo este valor cercano al caudal considerado para el diseño de la planta, 8.2 L/s (Zambrano y Calderón, 2000).

Para determinar el tiempo teórico de retención hidráulico se consideran el volumen útil del compartimiento de sedimentación del Tanque Imhoff y el caudal promedio estimado como la mitad del caudal total a la entrada.

Tabla N° 6.1. Estadísticas descriptivas, Caudal y Tiempo Teórico de Retención Tanque Imhoff

Estadísticas descriptivas	Caudal (L/s)	Tiempo teórico de retención (h)
Promedio	7,81	2,38
Máximo	9,55	3,17
Mínimo	5,75	1,91
Desviación Estándar	1,18	0,38
Número de Datos	15	15
Intervalo de Confianza	[7.21 – 8.41]	[2,19 – 2.57]

Como se observa en la Tabla N° 6.1, el tiempo teórico promedio de retención obtenido para el Tanque Imhoff es 2.38 horas, el cual se encuentra dentro de los valores recomendados en el RAS 2000, donde el tiempo de retención hidráulico debe estar entre 2 y 4 horas, siendo 3 horas el valor típico. Se espera que las eficiencias de remoción se encuentren dentro de los valores típicos para la sedimentación primaria, tales como: DBO 30 – 40%, DQO 30-40%, SS 50 – 65%, según lo planteado por el RAS 2000.

6.1.2 Filtro Anaeróbico

En la Tabla N° 6.2, se presentan los resultados de las estadísticas descriptivas para el caudal y tiempo teórico de retención del filtro anaeróbico de flujo ascendente.

El tiempo teórico de retención hidráulico se establece considerando tanto el volumen útil del filtro anaeróbico como el caudal promedio obtenido de aguas residuales. Para determinar el volumen útil se considera una porosidad de la grava del 50% (Zambrano y Calderón, 2000).

Tabla N° 6.2. Estadísticas descriptivas, Caudal y Tiempo teórico de retención Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

Estadísticas descriptivas	Caudal (L/s)	Tiempo teórico de retención (h)
Promedio	3,20	22,34
Máximo	4,82	30,81
Mínimo	2,22	14,17
Desviación Estándar	0,74	4,71
Número de Datos	15	15
Intervalo de Confianza	[2,83 – 3,57]	[19.69 – 24.72]

De acuerdo a la Tabla 6.2, el caudal promedio de aguas residuales que ingresa a cada uno de los filtros anaeróbicos es de 3.20 L/s con un intervalo de confianza entre 2.83 y 3.57 L/s, el cual es aproximadamente la mitad del caudal promedio obtenido en las mediciones realizadas a la entrada de la planta.

El caudal máximo obtenido durante la etapa de muestreo fue 4.82 L/s, mientras el caudal mínimo fue de 2.22 L/s.

Según Campos (1990), cuando se utiliza un medio de soporte en piedra el tiempo de retención hidráulico debe ser superior a 18 horas, además con tiempos de retención hidráulicos superiores a 24 horas se alcanzan eficiencias de remoción de DBO del 80%; por lo tanto, acorde con los resultados obtenidos y reportados en la Tabla 6.2, el tiempo teórico promedio de retención de 22.34 horas le permitiría alcanzar al Sistema de Tratamiento de Villa del Viento una buena eficiencia de remoción, particularmente en lo relacionado con la materia orgánica y por tal razón se esperaría un buen funcionamiento.

Además, Oliveira (2005) plantea que utilizando un filtro anaeróbico con un tiempo de retención de 19 horas como tratamiento posterior de un tanque séptico, se alcanzan eficiencias de aproximadamente 73 % \pm 10 % de remoción de DQO, 67 % \pm 13 % de remoción de DBO, 93 % \pm 4 % de remoción de SST, 94 % \pm 7 % de remoción de SSF y 90 % \pm 8 % de remoción de SSV para una temperatura promedio de 26°C.

Teniendo en cuenta que el caudal y el tiempo teórico de retención hidráulico, se encuentran dentro de los límites tanto de diseño como de las expectativas reportadas por otros estudios se puede esperar un buen funcionamiento general del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento.

6.2 CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL PARA LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA

6.2.1 Calidad Microbiológica

Los parámetros considerados para la evaluación de la calidad microbiológica del agua residual motivo de estudio, fueron Coliformes Fecales y Huevos de Helmintos, los primeros son importantes dada su utilidad para la valoración de la

contaminación fecal y los segundos ya que proporcionan el mayor riesgo real para la salud. Por lo tanto, la eliminación de agentes patógenos es el principal objetivo del tratamiento de aguas residuales para aprovechamiento.

En la Tabla N° 6.3 se presentan los resultados de las estadísticas descriptivas para los datos de Huevos de Helmintos.

Tabla N° 6.3. Estadísticas descriptivas, Huevos de Helmintos

Huevos de Helmintos/L	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	37	2
Máximo	73	10
Mínimo	10	0
Desviación Estándar	19,48	3,35
Número de Datos	15	15
Intervalo de Confianza	[27 - 47]	[0 - 4]
Eficiencia de remoción promedio	94.6 %	
Reducción logarítmica	1.26 unidades	

La concentración de Huevos de Helmintos en el agua residual doméstica cruda oscila entre 10^1 - 10^3 huevos de helmintos/L (Crook (1998) y Feachem *et al* (1983), citados por Tchobanoglous, 2000). Como se observa en la Tabla N° 6.3 el número promedio presente a la entrada del sistema es de 37 huevos de helmintos/L, con un máximo de 73 y un mínimo de 10 huevos de helmintos/L. Al comparar estos valores con los encontrados a la salida, que indican en promedio 2 huevos de helmintos/L, con un máximo de 10 y un mínimo de 0, se puede decir que la remoción del sistema de tratamiento pareciera ser alta, al presentar un valor del 94.6 % de eficiencia, particularmente considerando el hecho que el esquema Tanque Imhoff – Filtro Anaeróbico tiene como principal objetivo la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos y que la eficiencia de remoción de patógenos en los filtros anaeróbicos es despreciable según la Tabla N° 4.8.

Además, aunque la reducción en términos logarítmicos del sistema de tratamiento es de 1.26 unidades, la cual se encuentra dentro del rango estimado para sistemas con biofiltración según lo presentado en la Tabla N° 4.7, donde estos sistemas pueden alcanzar entre 0 y 2 unidades logarítmicas de remoción de helmintos, la cantidad de Huevos de Helmintos presentes en el efluente del sistema de tratamiento sobrepasa los criterios establecidos por la OMS (1989) para las categorías de aprovechamiento A y B. La categoría A involucra el riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos (Riego no restringido) donde el grupo expuesto son los trabajadores y consumidores; la categoría B comprende el riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles (Riego restringido), donde los trabajadores son el grupo expuesto.

Por el contrario, el efluente motivo de estudio puede emplearse en la categoría de aprovechamiento C, la cual considera el riego localizado de cultivos de la categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos, ya que la cantidad de huevos de helmintos no es aplicable.

Al realizar las observaciones en el laboratorio para el respectivo conteo de huevos de helmintos, se pudo hacer una pequeña identificación de los diferentes tipos de parásitos helmínticos observados en el agua residual estudiada, tales como: *Ascaris lumbricoides*, *Taenia sp*, *Trichuris trichiura*, *Enterobius vermicularis*, *Hymenolepis diminuta*, *Hymenolepis nana*, *Schistosoma mansoni* (Ver Anexo 4).

La presencia de estos organismos en las aguas residuales ocasiona enfermedades como: Ascariasis, Trichuriasis, Teniasis, Enterobiasis, entre otras (Ver Anexo 5), lo cual hace necesario el mejoramiento de la calidad microbiológica del efluente, para disminuir el riesgo potencial debido a la manipulación del mismo por los agricultores y al consumo de los productos por las personas.

En el caso de los agricultores la manipulación del efluente puede constituir un riesgo ocupacional serio, ya que pueden ser infectados o parasitados fácilmente por la penetración de los microorganismos y larvas a través de la piel (Urcinarias y Strongyloides). Los consumidores pueden ser infectados por huevos o quistes de

diversos parásitos, entre ellos los huevos de *Taenia solium* que pueden contaminar aguas y verduras, su ingestión puede producir en el hombre la cisticercosis y, consecuentemente, un problema de salud aún más grave que la misma teniasis (CEPIS, 1990). En este sentido, si se considera el riesgo de cultivos pertenecientes a la Categoría A, la cual no involucra la restricción de cultivos y si no se adoptan las medidas protectoras, existe un gran riesgo tanto para los trabajadores como para los consumidores.

Podría considerarse que la concentración de huevos de helmintos del agua residual efluente del esquema Tanque Imhoff – Filtro anaeróbico se encuentra muy cerca de cumplir con la calidad para su uso para riego restringido (Categoría B), como se observa en la Tabla N° 6.3, pues aunque el nivel promedio de huevos de helmintos es ligeramente superior al recomendado por OMS (1989), ésta categoría supone, en el caso de cultivos industriales un proceso de producción que garantizaría la reducción del riesgo para los consumidores. Sin embargo, los trabajadores seguirían expuestos a un gran riesgo, entonces se haría necesaria la implementación de un sistema de tratamiento adicional, que reduzca estos riesgos potenciales.

En la Tabla N° 6.4 se presentan los resultados de las estadísticas descriptivas para los valores de Coliformes Fecales obtenidos.

Tabla N° 6.4. Estadísticas descriptivas, Coliformes Fecales

Coliformes Fecales/ 100ml	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Media Geométrica	3.46×10^6	1.06×10^6
Máximo	13.5×10^6	3×10^6
Mínimo	7.5×10^5	2.5×10^5
Desviación Estándar	3.6×10^6	8.4×10^5
Número de Datos	11	11
Intervalo de Confianza	$[2.3 \times 10^6 - 6.6 \times 10^6]$	$[8.2 \times 10^5 - 1.8 \times 10^6]$
Eficiencia de remoción	69.40 %	
Reducción logarítmica	0.51 unidades	

La concentración usual de coliformes fecales en las aguas residuales domésticas crudas es alrededor de 10^3 a 10^7 UFC/100 ml, siendo el valor más usual 10^4 a 10^5 UFC/100ml (Crook (1998) y Feachem *et al* (1983), citados por Tchobanoglous, 2000). Por lo tanto, el agua residual cruda estudiada se encuentra dentro de estos niveles, como se observa en la Tabla N° 6.4, donde el promedio geométrico es de 3.46×10^6 UFC/100ml, con un máximo de 13.5×10^6 y un mínimo de 7.5×10^5 UFC/100ml.

Considerando que en las directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura (OMS, 1989), la concentración de coliformes fecales debe ser menor a 1000 UFC/100ml, para la categoría de aprovechamiento A, el agua residual efluente estudiada no es apta para el riego no restringido de cultivos, pues como se muestra en la Tabla N° 6.4 la media geométrica del efluente es de 1.06×10^6 UFC/100ml, con un máximo de 3×10^6 UFC/100ml, valores que sobrepasan ampliamente los niveles establecidos.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos y expuestos en la Tabla N°6.4 el efluente estudiado podría ser empleado para el riego de cultivos pertenecientes a las categorías B y C, es decir riego restringido, pues para la cantidad de coliformes fecales no se recomienda ningún valor específico. Las medidas de utilización de aguas residuales cuidadosamente seleccionadas, como es el riego localizado (Categoría C), evitan la contaminación del cultivo o de los trabajadores y por tanto permiten proteger la salud de estos y la de los consumidores.

En términos generales, el efluente motivo de estudio posee una calidad microbiológica deficiente, para el riego no restringido de cultivos (Categoría A), pues como se mencionó anteriormente supera los límites establecidos para su utilización, lo que supone un alto riesgo sanitario ocasionado por la manipulación del efluente y el consumo de alimentos regados con el mismo. En consecuencia es necesaria la implementación de un sistema de tratamiento adicional, que proporcione la calidad microbiológica requerida para su reutilización.

Sin embargo, la calidad microbiológica del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento compuesto por Tanque Imhoff y Filtro Anaeróbico se encuentra muy cerca de cumplir con la calidad para su uso en riego restringido (Categoría B), pero debe considerarse la reducción de la concentración de huevos de helmintos, lo cual permita unido a la toma de medidas como es la reducción de la exposición humana al contacto, alcanzar tanto los niveles establecidos como reducir los riesgos para los trabajadores que son el grupo expuesto, para ello, podría explorarse la combinación de tanques sépticos con filtros anaeróbicos que permitiría aumentar los tiempos de retención y reducir la concentración de huevos de helmintos. De otro lado, la calidad microbiológica que presenta el efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento permite ubicarlo en la categoría de aprovechamiento C, ya que no se recomienda ningún valor específico y la utilización de aguas residuales mediante el riego localizado permite proteger la salud de los trabajadores y de los consumidores.

En cuanto a la necesidad de implementación de un sistema de tratamiento que mejore la calidad microbiológica para la Categoría de aprovechamiento A, las lagunas de estabilización son una alternativa apropiada para minimizar los riesgos potenciales para la salud pública, previa a las actividades propias del reuso como lo menciona la OMS.

En áreas tropicales y subtropicales las lagunas de estabilización son recomendadas como unidades efectivas y económicas para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico y aseguran el grado de tratamiento requerido. Alternativamente se pueden emplear en forma mixta digestores anaeróbicos de flujo ascendente combinados con lagunas de estabilización. En ambos casos se obtendrá efectividad en el tratamiento, es decir un efluente libre de protozoarios y helmintos. La remoción está influenciada por el movimiento de las aguas, el flujo no uniforme, la presencia de detergentes y material flotante, pero sobre todo por los grandes periodos de retención que proporcionan las lagunas de estabilización, lo que hace viable obtener una remoción total de todos los parásitos presentes en las aguas residuales crudas, a pesar de su baja velocidad de sedimentación.

Moscoso (1994) menciona, que la opción tecnológica mediante la cual se alcanza plenamente el objetivo de no patógenos, corresponde a las lagunas de estabilización, ya que su efluente puede emplearse en cualquier actividad agropecuaria, desde la horticultura, los cultivos agroindustriales y acuicultura hasta la forestación. Peña y Valencia (1998), reportan que las lagunas de estabilización son también empleadas para el tratamiento de las aguas residuales destinadas a irrigación en el municipio de Ginebra (Valle del Cauca), donde se alcanzan eficiencias de remoción del 99 y 100% para Coliformes Fecales y Huevos del Helminto respectivamente, con un tiempo de retención hidráulico total de 8 días.

Diversos trabajos de investigación han indicado los tiempos de retención más recomendables para la remoción de parásitos en lagunas de estabilización. Según Wachs 1961 (Citado por CEPIS, 1990), y los diferentes estudios realizados en las lagunas de San Juan (Perú), el tiempo requerido para remover parásitos es de aproximadamente 20 días en dos lagunas en serie, en otros casos (Arcievala 1970; Lalshminarayana y Abdulappa 1972, Citados por CEPIS, 1990) han obtenido periodos de retención menores (6-7días), pero en varias lagunas de estabilización más pequeñas en serie.

Según la OMS en su estudio “Evaluación de riesgos para la salud por el uso de aguas residuales en agricultura (1990)”, se comprobó que la contaminación por protozoarios y helmintos de interés sanitario es considerablemente mas alta en verduras irrigadas con aguas residuales crudas que en las que se cultivan con aguas residuales tratadas procedentes de laguna de estabilización. Este estudio también plantea basándose en encuestas de morbilidad, que el riesgo de enfermar por deficiencias en el suministro de aguas y saneamiento, se manifiesta en mayor grado que por el uso mismo de las aguas residuales.

6.2.2 Calidad Fisicoquímica

Para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua residual estudiada, se consideraron los siguientes parámetros: pH, Conductividad Eléctrica, Sólidos disueltos, Fosfatos, Nitrógeno total, orgánico y amoniacal; los cuales influyen en el desarrollo de las plantas y además pueden evitar o minimizar el uso de agroquímicos que afecten el suelo.

El pH es rara vez un problema por si mismo, es más un indicador de la acidez o la basicidad del agua. El agua de irrigación con un pH fuera del alcance normal podría causar un desequilibrio nutritivo o contener un ión tóxico (FAO, 1985).

En la Tabla N° 6.5, se presentan las estadísticas descriptivas para los resultados obtenidos en las mediciones de pH.

Tabla N° 6.5. Estadísticas descriptivas, pH

pH	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Máximo	7,85	7,51
Mínimo	6,60	6,10
Desviación Estándar	0,33	0,36
Número de Datos	16	16
Intervalo de Confianza	[7.14 – 7.46]	[6.76 – 7.12]

De acuerdo a la Tabla N° 6.5, el máximo valor obtenido de pH a la entrada del sistema de tratamiento es 7.85 con un mínimo de 6.60, valores que se encuentran dentro del intervalo normal de pH para un agua residual doméstica cruda, el cual se sitúa entre 6.5 y 8.5 (Metcalf & Eddy, 1991) (Mujeriego, 1990). El efluente presenta un máximo valor de pH de 7.51 y un mínimo de 6.10 los cuales se encuentran dentro de los niveles establecidos para el reuso, es decir, 6.5 - 8.4 (FAO, 1985), por lo tanto el agua residual proveniente del Sistema de

Tratamiento de Villa del Viento probablemente no afectaría la solubilidad de los metales ni la alcalinidad del suelo, problemas que se presentan debido a niveles extremos de pH, ya que el agua estudiada presenta valores alrededor de 7.

La salinidad es el parámetro más importante para determinar la posibilidad de usar el agua para irrigación (EPA, 2004), esta se determina por las mediciones de la conductividad eléctrica y/o los sólidos disueltos en el agua. Por lo tanto, en las Tablas N° 6.6 y 6.7 se presentan las estadísticas descriptivas para los resultados obtenidos en relación a la conductividad eléctrica y a la concentración de sólidos disueltos, respectivamente.

Tabla N° 6.6. Estadísticas descriptivas, Conductividad Eléctrica

Conductividad Eléctrica (dS/m)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	0,73	0,51
Máximo	0,87	0,58
Mínimo	0,45	0,38
Desviación Estándar	0,13	0,05
Número de Datos	14	14
Intervalo de Confianza	[0.66 – 0.80]	[0.48 – 0.54]
Eficiencia de remoción promedio	30.14 %	

Las aguas residuales tienen un contenido de sales variable, que en términos de conductividad eléctrica oscila, en general, entre 2 y 4 dS/m; valores de conductividad eléctrica superiores a 2 dS/m, ocasionan empobrecimiento del suelo y baja productividad (Ramos, 1996). Por lo tanto, posiblemente el agua residual evaluada no ocasionaría estos inconvenientes, ya que presenta valores inferiores a este, pues como se observa en la Tabla N° 6.6, el máximo valor alcanzado a la entrada del sistema es de 0,87 dS/m y a la salida es 0,58 dS/m. Además la conductividad eléctrica promedio a la entrada y a la salida es de 0.73 dS/m y 0.51 dS/m, respectivamente. De acuerdo con las directrices de la FAO (1985) en relación a la conductividad eléctrica, el efluente no presentaría restricciones sobre su uso, debido a que ésta es menor a 0.7 dS/m.

Tabla N° 6.7. Estadísticas descriptivas, Sólidos Disueltos

Sólidos Disueltos (mg/L)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	366	240
Máximo	481	283
Mínimo	278	210
Desviación Estándar	55,49	21,76
Número de Datos	16	16
Intervalo de Confianza	[338.81 – 393.19]	[229.34 – 250.66]
Eficiencia de remoción promedio	34.4 %	

Las concentraciones de sólidos disueltos presentes en las aguas residuales domésticas crudas oscilan entre 280 y 850 mg/L (Tchobanoglous y Burton, Citados por Tchobanoglous, 2000). Según la Tabla N° 6.7 el agua residual que ingresa al Sistema de Tratamiento presenta una concentración promedio de 366mg/L, con una concentración máxima de 481 mg/L y una mínima de 278 mg/L, lo que demuestra que la concentración de sólidos disueltos es media según Metcalf & Eddy, (1991) y Mujeriego (1990) y además se encuentra dentro de los valores típicos para las aguas residuales domésticas crudas.

De acuerdo a la Tabla N° 6.7, la concentración promedio de sólidos disueltos presentes en el efluente del sistema de tratamiento es baja (FAO, 1985), ya que es de 240 mg/L, con una concentración máxima de 283 mg/L y una mínima de 210 mg/L. Según los parámetros de calidad para reuso (FAO, 1985), el efluente estudiado no presentaría restricciones sobre su uso y presenta concentraciones adecuadas para su reutilización, pues su concentración de sólidos disueltos es menor a 450 mg/L.

El sistema de tratamiento presenta eficiencias de remoción promedio de 30.14 % y 34.4 % para conductividad eléctrica y sólidos disueltos respectivamente. Estas eficiencias pueden considerarse como significativas, ya que una de las desventajas del filtro anaeróbico es la producción de un efluente rico en sales minerales (Oliveira, 2005); por lo tanto, estas remociones pueden ser favorables

pues contribuyen a disminuir aun más, los ya bajos valores de conductividad eléctrica y de sólidos disueltos presentes en el efluente del sistema de tratamiento.

Al analizar los valores de conductividad eléctrica y de sólidos disueltos para determinar la posible afectación que tendría la irrigación de los cultivos con este tipo de agua residual tratada, se puede concluir como se mencionó anteriormente que posiblemente no se presentarán problemas debidos a excesos de sales.

El contenido de nutrientes en las aguas residuales domésticas se ha considerado como un elemento importante para el reuso en la agricultura. Usualmente estos elementos se presentan en cantidad suficiente en las aguas residuales domésticas para el reuso agrícola (EPA, 2004). El nitrógeno y el fósforo son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de las plantas y su presencia en el agua aumenta su valor para el riego.

En las Tablas N° 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se presentan las estadísticas descriptivas para los valores obtenidos en relación al contenido de nutrientes presente en el agua residual evaluada, es decir la concentración de: fosfatos, nitrógeno total, también nitrógeno amoniacal y orgánico.

Tabla N° 6.8. Estadísticas descriptivas, Fosfatos

Fosfatos (mg/L P-PO₄)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	2,25	2,54
Máximo	2,91	3,04
Mínimo	1,51	1,97
Desviación Estándar	0,42	0,30
Número de Datos	12	12
Intervalo de Confianza	[2.01 – 2.49]	[2.37 – 2.71]

Según Metcalf & Eddy (1991) y Mujeriego (1990), las concentraciones de fósforo en el agua residual doméstica cruda varían entre 4 y 15 mg/L P, siendo la concentración más usual 7 mg/L P. Como se observa en la Tabla N° 6.8, el agua residual cruda motivo de estudio presenta una baja concentración promedio de fósforo de 2.25 mg/L P-PO₄ con un máximo de 2,91 mg/L P-PO₄.

Según S. Braatz y A. Candía (1996), después de un tratamiento secundario la remoción de fósforo no es muy significativa. Por lo tanto, se realizó una prueba de hipótesis para determinar que las concentraciones promedio de fósforo del afluente y efluente son iguales, y de esta manera establecer que el sistema de tratamiento no remueve fósforo.

La hipótesis planteada es H_0 en la cual se consideran que las concentraciones promedio de fósforo del afluente y efluente son iguales. La hipótesis alternativa H_1 por supuesto hace relación a que estas sean diferentes.

Entonces la hipótesis puede probarse utilizando la ecuación 1, que corresponde al estadístico de prueba Z_0 :

$$Z_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

donde:

\bar{y}_1 : Promedio de los valores de fósforo del afluente

\bar{y}_2 : Promedio de los valores de fósforo del efluente

σ_1^2 : Varianza de los valores de fósforo del afluente

σ_2^2 : Varianza de los valores de fósforo del efluente

n_1 : Número de datos para el afluente

n_2 : Número de datos para el efluente

Reemplazando los valores respectivos en la Ecuación 1, se obtiene $Z_0 = -1.94$.

$$Z_0 = \frac{2.25 - 2.54}{\sqrt{\frac{0.177}{12} + \frac{0.091}{12}}} = -1.94$$

Específicamente, H_0 se rechazaría si $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$, considerando un nivel de significación α de 0.05; en el Anexo 6 se encuentra que $Z_{\alpha/2} = 1.96$. Por lo tanto, se acepta H_0 y se concluye que las concentraciones promedio de fósforo en el afluente y en efluente son iguales, lo cual indica que la eficiencia de remoción del Sistema de Tratamiento es nula.

El sistema de tratamiento no remueve fósforo, debido posiblemente a que de acuerdo con Tchobanoglous (2000), la remoción biológica de fósforo requiere tanto de condiciones aeróbicas como anaeróbicas. En aquellas plantas que no fueron diseñadas para retirar fósforo la remoción de éste puede obtenerse por medio de la utilización de un fermentador externo. Los fermentadores externos se utilizan para producir AGV (Ácidos Grasos Volátiles), en plantas con tanques de sedimentación primaria, se pueden producir AGV a partir del lodo sedimentado si se opera el tanque en modo de fermentación. El lodo primario fermentado se recircula hacia la entrada del tanque de sedimentación.

El agua residual procedente del tratamiento secundario, en este caso un filtro anaeróbico, debe tener una concentración de fósforo entre 0.1 y 30 mg/L P y menor a 0.1-2 mg/L P cuando el objetivo tras el tratamiento es el reuso con fines agrícolas (Akiçca, 2005). Como se observa en la Tabla N° 6.8, la concentración de fósforo en el agua residual efluente estudiada esta dentro de los límites establecidos para este tipo de tratamiento, pero supera ligeramente los valores considerados para el reuso, pues posee en promedio una concentración de 2.54 mg/L P-PO₄, con un máximo de 3.04 mg/L P-PO₄.

Considerando que los valores obtenidos para la concentración de fósforo en el agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, no superan significativamente los valores establecidos para reuso y la experiencia presentada por Peña y Valencia (1998), en donde valores más altos que los obtenidos en este estudio fueron utilizados sin generar mayores limitaciones, se podría considerar que el agua residual tratada y evaluada en el presente estudio puede emplearse en la actividad agrícola.

Si bien es cierto que el agua residual cruda procedente de la Urbanización Villa del viento presenta en particular una baja concentración de fosfatos, otras aguas residuales de calidades distintas podrían superar los valores mencionados por Metcalf & Eddy (1991) y Mujeriego (1990) y con el esquema tecnológico usado no sería posible alcanzar los requerimientos de fosfatos en el efluente necesarios para su reutilización.

En las Tablas N° 6.9, 6.10 y 6.11 se presentan las estadísticas descriptivas para los valores obtenidos de nitrógeno total, nitrógeno orgánico y amoniacal respectivamente.

Tabla N° 6.9. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Total

Nitrógeno Total (mg/L N)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	68,07	37,46
Máximo	91,39	54,26
Mínimo	31,99	25,58
Desviación Estándar	15,06	7,51
Número de Datos	14	14
Intervalo de Confianza	[60.18 – 75.96]	[33.52 – 41.4]
Eficiencia de remoción promedio	45%	

El agua residual proveniente de la Urbanización Villa del Viento, presenta como se observa en la Tabla N° 6.9, una concentración promedio de nitrógeno total de 68,07 mg/L N, con un valor máximo de 91,39 mg/L N y un mínimo de

31,99mg/L N; valores normales considerando que típicamente el agua residual proveniente del procesamiento de alimentos y fuentes domésticas, se caracteriza por tener un alto contenido de nitrógeno con valores que sobrepasan los 10 a 50 mg/L (FAO, 1985). Además, los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites usuales para las aguas residuales domésticas de 20 a 85 mg/L N reportados por Tchobanoglous y Burton (Citados por Tchobanoglous, 2000).

Tabla N° 6.10. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Orgánico

Nitrógeno Orgánico (mg/L N orgánico)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	8,24	5,38
Máximo	20,56	20,56
Mínimo	1,14	0,59
Desviación Estándar	5,33	5,16
Número de Datos	13	13
Intervalo de Confianza	[5.34 – 11.14]	[2.58 – 8.18]
Eficiencia de remoción promedio	34.7 %	

De igual forma, la concentración promedio de nitrógeno orgánico en el agua residual estudiada se encuentra dentro de los niveles estimados 8 y 35 mg/L N (Tchobanoglous, 2000), pues como se observa en la Tabla N° 6.10, la concentración promedio de nitrógeno orgánico es de 8,24 mg/L con un valor máximo de 20,56 mg/L N y un mínimo de 0,59 mg/L N.

Tabla N° 6.11. Estadísticas descriptivas, Nitrógeno Amoniacal

Nitrógeno Amoniacal (mg/L N amoniacal)	Punto de Muestreo	
	ENTRADA	SALIDA
Promedio	60,17	32,50
Máximo	83,40	41,13
Mínimo	30,84	24,99
Desviación Estándar	15,29	4,73
Número de Datos	14	14
Intervalo de Confianza	[52.16 – 68.18]	[30.02 – 34.98]
Eficiencia de remoción promedio	46 %	

De acuerdo a la Tabla N° 6.11, la concentración promedio de nitrógeno amoniacal obtenida en el agua residual cruda estudiada, es de 60.17 mg/L con un intervalo de confianza entre 52.16 y 68.18 mg/L, esta concentración es superior a los niveles estimados en la composición usual del agua residual doméstica cruda 12 y 50 mg/L, (Tchobanoglous, 2000).

Según Tchobanoglous (2000), en el tratamiento de aguas residuales cerca del 20% del nitrógeno total se decanta durante la sedimentación primaria. En el tratamiento biológico, una porción importante de nitrógeno orgánico se convierte en nitrógeno amoniacal, una parte de la cual se incorpora a las células biológicas que son extraídas del flujo del agua tratada antes de la descarga, retirando así otro 20% del nitrógeno entrante; por lo tanto la remoción del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento debe ser aproximadamente del 40%, situación que se presenta, pues como se observa en las Tablas N° 6.9, 6.10 y 6.11 las eficiencias de remoción se encuentran alrededor de este valor.

En el efluente la concentración promedio de nitrógeno total es de 37,46 mg/L N, con un valor máximo de 54,26 mg/L y un mínimo de 25,58 mg/L, de acuerdo a la Tabla N° 6.9, para nitrógeno orgánico la concentración promedio es de 5.38 mg/l N, con un valor máximo de 20,56 mg/L N como se observa en la Tabla N° 6.10 y la concentración promedio de nitrógeno amoniacal es 32.50 mg/L N, con un intervalo de confianza entre 30.02 y 34.98 mg/L como se presenta en la Tabla N°6.11.

Teniendo en cuenta estos resultados se puede afirmar que el agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento presenta concentraciones superiores a las requeridas para su correspondiente reuso, ya que de acuerdo con Akiçca (2005), las concentraciones deben ser menores a 10-15 mg/L N total, aunque cultivos sensibles pueden ser afectados por concentraciones de nitrógeno por encima de 5 mg/L tales como: la remolacha que aumenta de tamaño con la fertilización de nitrógeno excesiva pero el contenido y la pureza del azúcar son

más bajos, por lo tanto, la cantidad total de azúcar recuperable producida por hectárea podría ser en realidad reducida. Las uvas son también susceptibles y pueden continuar creciendo después de la fase inicial a expensas de la producción de fruta; los rendimientos son a menudo reducidos y las uvas podrían demorar en madurar y tener un contenido bajo de azúcar.

El alto contenido de nitrógeno en el efluente estudiado le da una restricción severa sobre el uso en algunos cultivos, pues su concentración es superior a 30 mg/L (FAO, 1985).

Altos contenidos de nitrógeno pueden afectar la producción de cultivos tales como: algodón, tomate, remolacha, uva, manzano, cítricos y aguacate (Bouwer e Idelovitch, Citados por Ambientum, 2004). Experiencias en Libia indicaron que no se obtuvo fruto en uvas regadas constantemente con aguas de concentración mayor a 50 mg/L de N. En muchos cultivos de cereal, el crecimiento vegetal excesivo genera pedúnculos débiles que no pueden sostener el peso del cereal, lo cual ocasiona problemas en la maquinaria utilizada (FAO, 1985).

La sensibilidad de los cultivos varía con el escenario de crecimiento, el agua con un alto contenido de nitrógeno puede ser usada como un fertilizante a comienzos de la fase inicial. Sin embargo, cuando las necesidades de nitrógeno de la cosecha disminuyen después en la temporada de crecimiento, el nitrógeno aplicado a la cosecha debe ser reducido considerablemente. Mezclar o cambiar suministros durante las etapas de crecimiento más críticas posteriores son provechosos. Otra alternativa es plantar una tanda menos susceptible, como el maíz, que puede utilizar el nitrógeno del agua de irrigación más eficazmente (FAO, 1985).

Como era de esperarse, los parámetros fisicoquímicos estudiados están en su mayoría dentro de los requerimientos exigidos para el reuso de las aguas residuales tratadas, a excepción del alto contenido de nitrógeno; por lo tanto se espera que usar el esquema tecnológico Tanque Imhoff y Filtro anaeróbico de

flujo ascendente con un tratamiento posterior disminuya estos niveles, y puedan ser utilizados para la categoría de aprovechamiento A, este sería las lagunas de estabilización, pues de acuerdo con Mara *et al* (1992), la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo por este sistema se encuentra en el orden del 80% y 45% respectivamente. Estos porcentajes proporcionan en promedio una disminución considerable de la concentración de nitrógeno total y fósforo en el agua residual estudiada a niveles aceptados para su reutilización agrícola.

Un ejemplo de las eficiencias que se alcanzan con las lagunas de estabilización son las reportadas por Moscoso *et al* 1994 (Citado por CEPIS, 2006) en el Proyecto de Reuso en Acuicultura de las Aguas Residuales Tratadas en las Lagunas de San Juan, donde en lagunas con un período de retención entre 57 y 32 días de acuerdo a la época fría y cálida respectivamente, se lograron eficiencias de remoción del 41% de fósforo total, 45% de nitrógeno orgánico y 96% de nitrógeno amoniacal.

En el caso de las Categorías de aprovechamiento B y C, debe hacerse un análisis de las concentraciones de nitrógeno admisibles por los cultivos que se consideren regar. También puede considerarse la reducción de los niveles de nitrógeno mediante la dilución con agua de menor concentración. Sin embargo, los altos contenidos de nitrógeno presentes en el efluente motivo de estudio, le dan una ventaja comparativa sobre otras aguas que comúnmente se utilizan en irrigación, puesto que pueden reemplazar total o parcialmente los fertilizantes químicos, con los beneficios económicos y ambientales que esto conlleva.

6.3 CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL PARA LA ACTIVIDAD FORESTAL

La utilización de aguas residuales domésticas en la actividad agrícola ha predominado notablemente sobre el uso en el riego de bosques y plantaciones de árboles; en consecuencia se han establecido normas de calidad y directrices sobre su utilización para el riego de los cultivos agrícolas, pero no de los árboles tipo maderables.

Sin embargo, para hacer una posible aproximación al tema considerando los objetivos planteados en este estudio y la poca información disponible, se buscó hacer una posible evaluación de la calidad del agua estudiada, utilizando en primer lugar algunos datos proporcionados por la FAO (1985) (Ver Tabla N° 4.14), de los que puede decirse que el agua residual efluente estudiada es de calidad tipo III, en función del tratamiento secundario que presenta y puede ser utilizada para la recuperación de suelos, el riego de bosques y forrajes sin presencia de personal. En segundo lugar, si se consideraron las directrices de la OMS mencionadas en las Tablas N° 4.9 y 4.10, en las que se plantea el riego restringido de árboles mas no se especifica su tipo, podría decirse que el agua residual estudiada puede utilizarse para el riego forestal, siempre y cuando este riego sea localizado y se evite el acceso al público en general. En el caso de no realizarse un riego localizado deben tomarse las medidas necesarias para evitar la exposición de los trabajadores.

De otro lado, es indudable el beneficio que tienen las aguas residuales tratadas en cuanto a las cantidades apreciables de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo que poseen, las cuales pueden ser aprovechadas para el crecimiento de las plantas y el consecuente aumento de la productividad forestal. Estos nutrientes representan un recurso de valor considerable si se comparan con el costo equivalente de los fertilizantes. Además, según Braatz y Candía (1996), el riego de árboles con agua residual no es sólo un medio de tratamiento eficaz en función de los costos, sino que representa un uso productivo de las aguas

residuales, siempre que haya suficiente tierra disponible, considerando que el costo de los tratamientos convencionales es alto y por lo tanto, un limitante para la mayoría de los países en desarrollo.

En Colombia se emplea para la fertilización el denominado NPK, un fertilizante que contiene nitrógeno (N), fósforo como P_2O_5 y potasio como K_2O , el cual presenta diferentes concentraciones de nutrientes dependiendo de los requerimientos de la planta; estas concentraciones oscilan entre 10-28% para el nitrógeno, 0-24% para el fósforo y 3-25% para el potasio (ABOCOL, 2004).

Si se consideran por ejemplo, los requerimientos de fertilizantes de árboles como el roble (*Quercus*), el cual demanda al momento de efectuar la plantación 150g de NPK (CONIF, 1998), con los aportes que brinda el fertilizante denominado triplequince (15, 15, 15) y los que puede aportar el caudal promedio de agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, se observa que se podrían fertilizar aproximadamente 1123 árboles de roble con relación a los aportes de nitrógeno y 76 árboles con relación al fósforo por día.

En el caso del ciprés (*Cupressus lusitanica*), las cantidades de NPK (10, 30, 10) recomendadas están entre 50 y 70 g (CONIF, 1998). Si se considera una cantidad promedio necesaria de 60 g, el aporte del caudal promedio de agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento podría fertilizar aproximadamente 4213 árboles de ciprés con relación a los aportes de nitrógeno y 95 árboles con relación al fósforo por día.

Por lo tanto, la utilización del agua residual estudiada en el riego de los árboles generaría un ahorro en la compra de fertilizantes al proporcionar las cantidades requeridas por las plantas. Particularmente se debe estudiar la utilización de este tipo de aguas en los viveros donde se realice la germinación de las semillas y su crecimiento en plántula, procesos que requieren de una mayor cantidad de nutrientes y que por su ubicación espacial facilitarían el riego con este tipo de aguas.

Otras razones para estudiar a fondo la viabilidad de emplear las aguas residuales para el riego de los bosques y de las plantaciones de árboles son (Braatz y Candía, 1996):

- ✓ Factores relacionados con la salud como el riesgo de contaminación de los cultivos alimentarios por elementos patógenos y metales pesados.

- ✓ Consideraciones ambientales tales como:
 - Beneficios derivados de las zonas verdes y de otras plantaciones forestales urbanas y periurbanas.
 - Beneficios económicos (el valor de los productos forestales y de los servicios ambientales, que normalmente están subvalorados).
 - Beneficios sociales y estéticos.

En términos generales y de acuerdo con la literatura, se puede decir que la utilización de aguas residuales en la actividad forestal ha sido muy poco estudiada, por tal razón se sugiere estudiar más a fondo esta posibilidad considerando que probablemente el riego de los árboles plantea menores riesgos para la salud y es más aceptable desde el punto de vista social que el de los cultivos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en la evaluación de la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, permiten plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento no es apta para la utilización en la actividad agrícola, para el riego no restringido (Categoría A), pues, si bien es cierto que su calidad fisicoquímica presenta una tendencia más o menos aceptable, su calidad microbiológica es deficiente, lo cual supone la necesidad de un tratamiento complementario que mejore las condiciones que facilitarían su reuso.
- Dado que la calidad microbiológica del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento se encuentra muy cerca de cumplir con la calidad para su uso para riego restringido (Categoría B), podría explorarse la combinación de tanques sépticos con filtros anaeróbicos que permitiría aumentar los tiempos de retención y reducir la concentración de huevos de helminto, alcanzando de esta manera los niveles de uso para riego restringido.
- El agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento, puede utilizarse para el riego de los cultivos pertenecientes a la Categoría de aprovechamiento C, en la cual se realiza el riego localizado de los cultivos de la Categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos.
- La calidad fisicoquímica del agua residual efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento presenta una tendencia que podría ser considerada como aceptable para el reuso agrícola, pues si bien las concentraciones de sales son las adecuadas para riego, las concentraciones de nutrientes son muy

superiores a las establecidas en el caso del nitrógeno, el fósforo por su parte no supera significativamente los valores establecidos para reuso y por tanto posiblemente no se presentarían problemas debido a su concentración en el efluente; las concentraciones de nitrógeno total, orgánico y amoniacal deben reducirse a los niveles establecidos para evitar posibles inconvenientes tanto en el suelo como en las plantas. Debe aclararse que el contenido de nutrientes y su posible afectación depende del tipo de cultivo y las características específicas del suelo.

- El tratamiento complementario que se recomienda para el mejoramiento de la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua residual estudiada, considerando esta última en términos de la disminución del contenido de nitrógeno, cuando las condiciones de aprovechamiento pertenecen a la Categoría A, es una serie de lagunas de estabilización, las cuales proporcionarían altas eficiencias de remoción de organismos patógenos y a la vez una adecuación del contenido de nutrientes a concentraciones favorables para su reuso.
- Si el objetivo tras el reuso es el riego de los cultivos pertenecientes a las categorías B y C, podría explorarse la combinación del agua efluente del Sistema de Tratamiento de Villa del Viento con aguas que presenten menores contenidos de nutrientes de tal manera que pueda reducirse la compra de fertilizantes y aprovechar el efluente proporcionado por el sistema.
- De acuerdo a la revisión de literatura realizada, se puede decir que la utilización de aguas residuales en la actividad forestal ha sido muy poco estudiada, por tal razón se sugiere estudiar más a fondo esta posibilidad considerando que probablemente el riego de los árboles plantea menores riesgos para la salud, presenta ventajas económicas al proporcionar los nutrientes requerido por los árboles y es más aceptable desde el punto de vista social que el de los cultivos. Particularmente se debe estudiar su utilización en los viveros donde se realice la germinación de las semillas y su crecimiento en plántula, ya que estos procesos requieren de una mayor cantidad de nutrientes y su ubicación espacial facilitaría el riego.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abonos Colombianos S.A (ABOCOL), (2004). (En red). Disponible en: www.abocol.com/busqueda/busqueda_productos.php?tprod=1&tipoventa=1&tipoprod=15. (Visitada 13/09/06).

Akiçca Bahri, Valentina Lazarova (2005). *Water Reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass*; CRC Press. (En red). Disponible en: www.lennotech.com/espanol/irrigacion/Irrigacion-calidad-agua.htm. (Visitada 24/04/06).

Alvear, Maryanella y López, Marcela (2005). *Estudio del impacto del lavado de un filtro anaeróbico de flujo ascendente con medio filtrante en grava*. Tesis de grado, Universidad del Cauca.

Ayres, Rachel M. Mara, Duncan (1996). *Analysis of Wastewater for Use in Agriculture - A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques*. World Health Organization. Geneva.

Braatz, S. Candía, A (1996). *Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques*. FAO. (En red). Disponible: www.fao.org/DOCREP/W0312S/W0312S09.HTM. (Visitada 05/09/06).

Campos, José Roberto (1990). *Prometo e Operação de Filtros anaeróbios para tratamento de efluentes líquidos industriais*. Taller Regional y Conferencia sobre Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales en América Latina.

CEPIS (1990). *Evaluación de riesgos para la salud por el uso de aguas residuales en agricultura. Volumen I. Aspectos microbiológicos*. Lima, Perú.

CEPIS (2006). *Tratamiento con lagunas*. (En red). Disponible en: www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind53/arp/arp02.html#tral. (Visitada 08/09/06).

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), (2003). *La regulación y el sector de agua potable y saneamiento básico*. En: CONGRESO 10 AÑOS DE REGULACIÓN EN SERVICIOS PÚBLICOS. EAFIT. Medellín. (En red). Disponible en: www.eafit.edu.co/NR/rdonlyres/D56301F9-4C2D-4013-9997-40270777C041/1075/No18Articulo993.pdf. (Visitada 10/05/06).

Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal CONIF (1998). *Guía para plantaciones forestales comerciales*. Serie de documentación N° 31 y 34. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Departamento de Salud de Cataluña (2004). *Peligros sanitarios derivados de la aplicación a la tierra de aguas residuales depuradas*. Cataluña. (En red). www.gencat.net/salut/depsan/units/sanitat/html/es/dir90/spsard03.htm (Visitada 15/08/06)

Díaz Gutiérrez, Joaquín (2003). *Reuso de agua y nutrientes*. Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA). (En red). Disponible en: www.cepis.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/rep84/vleh/matedu/diaz.pdf. (Visitada 23/08/06)

EPA; U.S. Environmental Protection Agency (2004); *Guidelines for Water Reuse*; EPA/625/R-04/108 September 2004 U.S. Agency for International Development; Washington, DC

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1985). *Water quality for agriculture*. Roma, Italia. (En red). Disponible en: www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm#TOC. (Visitada 17/08/06)

Gobernación del Cauca (2004). *Plan Departamental de Desarrollo 2004-2007 "Por El Derecho a la Diferencia"*; Popayán, mayo del 2004.

IDEAM-UTP-CINARA (2005). *Proyecto de selección de tecnologías para el control de la contaminación por aguas residuales domésticas para poblaciones entre 500 y 30000 habitantes. Reuso y aprovechamiento de subproductos*. Cali junio de 2005. (En red). Disponible en: www.ideam.gov.co/publica/aguasresiduales/Bloque6.pdf (Visitada 20/04/06)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2001). *Perfil del estado de los recursos naturales y el medio ambiente*. (En red). Disponible en: www.ideam.gov.co/indicadores/agua4.htm. (Visitada 16/03/06)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2000). *Estudio Nacional de Agua*. (En red). Disponible en: www.ideam.gov.co. (Visitada 19/09/06).

Lucho-Constantino, Carlos A. Prieto García, Francisco. Del Razo, Luz María. Rodríguez Vázquez, Refugio. Poggi-Varaldo, Héctor M (2005). *Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico*. Journal Agriculture, Ecosystems and Environment 108 (2005) 57–71. (Visitada 09/05/06).

Mara, D.D. Alabaster, G.P. Pearson, H.W. Mills, S.W (1992). *Waste Stabilitation Ponds a Design Manual for Easter Africa*. Lagoon Technology International Leeds, England.

Mara, Duncan. Cairncross, Sandy (1990). *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas*. OMS. Ginebra, Suiza.

Metcalf & Eddy (1981). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Editorial Labor S.A. Barcelona, España.

Metcalf & Eddy (1991). *Ingeniería Sanitaria*. Mc Graw Hill, Barcelona.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). *Plan Nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia*. (En red). Disponible en: www.minambiente.gov.co/viceministerios/ambiente/dir_agua_potable_saneam_basico/recurso_hidrico/recurso_h%C3%ADrico.htm. (Visitada 12/04/2006).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2002). *Bases para la formulación de un Plan Nacional de Aguas residuales*. Universidad de los Andes.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2002). *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*.

Ministerio de Ambiente; Dirección General Ambiental Sectorial; Grupo De Gestión Ambiental Urbana y Salud (2001). *Guía Técnica para el Desarrollo de Proyectos de Reuso de Aguas Residuales Domésticas Municipales*. Santa Fe de Bogota.

Moscoso, Julio. León, Guillermo (1994). *Uso de aguas residuales*. CEPIS. Septiembre. (En red). Disponible en: www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt059.html. (Visitada 09/02/06)

Mujeriego, R. (1990) *Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada*. Editorial: Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España.

Mujeriego, Rafael (2005). *La reutilización planificada del agua. Aspectos reglamentarios, sanitarios, técnicos y de gestión*. (En red). Disponible en: www.canagua.com/es/pdf/reutilizacion.pdf (Visitada 21/06/06)

Oliveira de Ávila, Renata (2005). *Avaliação do desempenho de sistemas tanque séptico-filtro anaeróbio com diferentes tipos de meio suporte*. Rio de Janeiro. Brasil. (En red). Disponible en: www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/AVILA RO 05 t M rhs.pdf. (Visitada 30/08/06)

Organización Mundial de la Salud (1989). *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud (Serie de informes técnicos 778).

Organización Panamericana de la Salud (2001). *Salud, Agua Potable y Saneamiento en el Desarrollo Humano Sostenible. 128ª Sesión del Comité Ejecutivo*. Washington, D.C., U.S.A. (En red). Disponible en: www.paho.org/spanish/gov/ce/ce128_13-s.pdf. (Visitada 16/05/06).

Peña, Miguel. Valencia, Eduardo (1998). *Reuso en irrigación de aguas residuales domésticas tratadas. Una alternativa sostenible para el manejo integral del recurso hídrico*. Ponencia Presentada en: Seminario-Taller Saneamiento Básico y Sostenibilidad AGUA.98 Junio 1 al 12 1998. Cinara. Santiago de Cali.

Pérez Restrepo, Jaime Enrique. *Probabilidad y estadística con aplicaciones al tránsito y a las vías*. Universidad del Cauca.

Plan de Ordenamiento Territorial Municipio de Popayán (2002-2011).

Ramírez R y Moreno R. (2005) *Estudio de la eficiencia hidráulica y de lavado de filtros anaeróbicos de flujo ascendente con medio filtrante mixto*. Informe preliminar Tesis de grado, Universidad del Cauca.

Ramos, C (1996). *El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos*. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. (En red). Disponible en: www.horticom.com/fitech3/ponencia/text/cramos.html (Visitada 24/04/06)

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000. *Tratamiento de aguas Residuales*, Título E. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio de Desarrollo Económico. Bogota, noviembre de 2000.

Revista Ambientum (2004). *Reciclaje de Aguas Procedentes de EDAR*. (En red). Disponible: www.Ambientum.com/2001_36/2001_36_AGUAS/REUAGUA1.htm (Visitada 15/03/2006).

Standard Methods for the Examination of water and wastewater (1998). Printing United Book Press, Inc; Baltimore, Maryland. 20th edition.

Suematsu, Guillermo León (1995). *Parámetros de Calidad para el Uso de Aguas Residuales*. Guías de Calidad de Efluentes para la Protección de la Salud. CEPIS/OPS 1995.

Suematsu, Guillermo León (1995). Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización. CEPIS en Seminario Internacional/Lagunas de estabilización. Santiago de Cali, Colombia. 12-14 de julio de 1995. (En red). Disponible en: www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind57/sil/sil.html#uso. (Visitada 10/08/06).

Tchobanoglous, G. Crites, R (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. McGraw-Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia.

Zambrano, Napoleón. Calderón, Jhon. (2000). *Tratamiento de las aguas residuales domésticas producidas en la Urbanización Villa del Viento de Popayán*. Revista Ingeniería Hoy. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca. N° 18. Septiembre de 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Supervivencia de ciertos patógenos en aguas, suelos y plantas. Fuente: CEPIS 1990

Organismo	Medio ecológico	Tiempo de supervivencia (días)	Referencia
BACTERIAS			
Coliformes	-Suelo	4-77	Kowal y Col. (1981)
		38	Epstein, Chaney (1978)
	-Vegetales	35	Epstein, Chaney (1978)
	-Pasto	6-34	Epstein, Chaney (1978)
	-Hojas de vegetales	35	Kowal y Col. (1981)
	-Tomate	30	Kowal y Col. (1981)
Coliformes fecales	-Forrajes	6-34	Kowal y Col. (1981)
	-Agua residual	60, usualmente 30	Shuval y Col. (1986)
	-Suelos	70, usualmente 20	Shuval y Col. (1986)
	-Cultivos	8-55	Kowal y Col. (1981)
	-Cultivos	30, usualmente 15	Shuval y Col. (1986)
Escherichia coli	-Vegetales	21	Kowal y Col. (1981)
	-Césped	8	Kowal y Col. (1981)
Salmonella	-Suelo	15-280	Epstein, Chaney (1978)
	-Suelo	11-280	Kowal y Col. (1981)
		1-120	Epstein, Chaney (1978)
		38	Seoanez (1978)
		Más de 40	Seoanez (1978)
		70, usualmente 20	Shuval y Col. (1986)
	-Vegetales y frutas	3-49	Epstein, Chaney (1978)
		1-168	Epstein, Chaney (1978)
	-Sobre verduras	31	Seoanez (1978)
	-Sobre hierba	14	Seoanez (1978)
		6 semanas o mas	Seoanez (1978)
	-Sobre vegetales	7 a 40 según autores	Seoanez (1978)
	-Agua residual	60, usualmente 30	Shuval y Col. (1986)
	-Cultivos	30, usualmente 15	Shuval y Col. (1986)
	-Hojas de vegetales	7-40	Kowal y Col. (1981)
	-Betarraga	21	Kowal y Col. (1981)
	-Tomates	3-7	Kowal y Col. (1981)
	-Col	5	Kowal y Col. (1981)
	-Grosellas	5	Kowal y Col. (1981)
	-Tréboles	12	Kowal y Col. (1981)
Salmonella paratyphi	-Suelo	259	Kowal y Col. (1981)
Salmonella typhi	-Suelo	1-120	Kowal y Col. (1981)
Streptococcus feacalis	-Suelo	26-77	Kowal y Col. (1981)
Shigella	-Sobre pasto (agua residual cruda)	42	Epstein, Chaney (1978)
	-Agua residual	30, usualmente 10	Shuval y Col. (1986)
	-Cultivos	10, usualmente 5	Shuval y Col. (1986)
	-Vegetales	2-10	Epstein, Chaney (1978)
	-En agua con humos	160	Epstein, Chaney (1978)
Bacilo de tuberculosis	-Suelo	180	Epstein, Chaney (1978)
	-Pasto	10-49	Epstein, Chaney (1978)
		Más de un mes	Seoanez (1978)
Brucella abortus	-Suelo	Más de un mes	Seoanez (1978)
B. anthracis	-Aguas residuales	19	Seoanez (1978)
	-Verduras	27-35	Seoanez (1978)
	-Sobre el suelo regado	2 a 3 años	Seoanez (1978)
	-Suelo	6 años	Seoanez (1978)
V. cólera	-Verduras y frutas	De 6 horas a 29 días	Seoanez (1978)
	-Agua residual	30, usualmente 10	Shuval y Col. (1986)
	-Suelo	20, usualmente 10	Shuval y Col. (1986)
	-Cultivos	5, usualmente 2	Shuval y Col. (1986)

Mycobacterium	-Césped	10-14	Kowal y Col. (1981)
	-Lechuga	35	Kowal y Col. (1981)
	-Rabanito	13	Kowal y Col. (1981)
	-Suelo	10-450	Kowal y Col. (1981)
Leptospira	-Agua de río	8	Seoanez (1978)
	-Aguas fecales	30	Seoanez (1978)
	-Aguas de drenaje	32	Seoanez (1978)
	-Suelo	15	Kowal y Col. (1981)
VIRUS			
Virus enterovirus (a)	-Agua residual	120, usualmente 50	Shuval y Col. (1986)
	-Suelo	100, usualmente 20	Shuval y Col. (1986)
	-Cultivos	60, usualmente 15	Shuval y Col. (1986)
Enterovirus	-Suelo	8	Epstein, Chaney (1978)
		Más de un mes	Seoanez (1978)
	-Vegetales	4-6	Epstein, Chaney (1978)
		4	Seoanez (1978)
	-Césped	42	Seoanez (1978)
	-Huertos	2	Seoanez (1978)
Poliovirus	-Agua contaminada a 20°C	20	Seoanez (1978)
	-Suelos	32	Seoanez (1978)
HELMINTOS			
Ascaris (huevos)	-Suelo	2-5 años	Lehmann (1983)
		7 años	Feachem (1983)
		4-5	Ajijas (1984)
		Hasta 7 años	Epstein, Chaney (1978)
		Varios meses	Shuval y Col. (1986)
	-Suelo irrigado	2-5 años	Lehmann (1983)
	-Suelo arenoso, soleado y seco	Pocas semanas	Soulsby (1968)
	-Suelo en invierno	3-6 meses	Rudolfs (1950)
	-Suelo en clima cálido	Promedio 180	
		Máximo 300	Cross (1985)
	-Plantas y frutas	1 mes	Lehmann (1983)
	-Vegetales en clima cálido	Promedio 25	
		Máximo 60	Cross (1985)
	-Vegetales	35	Feachem (1983)
	-Vegetales (tomate)	27	Rudolfs (1950)
	-Vegetales y frutas	27-35	Epstein, Chaney (1978)
	-Cultivos	60, usualmente 30	Shuval y Col. (1986)
	-Agua residual	Varios meses	Shuval y Col. (1986)
	-Hoja de vegetales	Resisten al medio ambiente, conserva su movilidad durante años	Ajijas (1984)
Ascaris suun, huevos	-Tomates y lechugas regadas profusamente con suspensiones de 20.000 huevos/ml en condiciones cálidas y secas	-Tomate: todos los huevos generan o son incapaces de desarrollar después de 27 días	Rudolfs, et. al (1951)
		-Lechuga: 59% y 99% de huevos son incapaces de desarrollar después de 3 a 20 días.	
Taenia saginata (huevos)	-Agua de río a 18°C	33 días	Feachem (1983)
	-Aguas crudas 18°C	16 días	Feachem (1983)
	-Lodos 24 a 30°C	6 meses	Feachem (1983)
	-Pasto, clima frío	6 meses	Feachem (1983)
	-Pasto, clima caluroso	2 meses	Feachem (1983)
	-Suelo	18 meses	Feachem (1983)
Trichuris (huevos)	-Suelo arcilloso	18 meses	Feachem (1983)
Strongyloides stercoralis (larvas)	-En agua (20-25°C)	3 semanas	Feachem (1983)
Ancylostomideos (huevos)	-En agua	5 horas	Feachem (1983)
	-Lodo a 27°C	43 días	Feachem (1983)
	-Suelo	12 semanas	Feachem (1983)
Fasciola (huevos)	-Agua (15-12°C)	70 días	Feachem (1983)
	-Agua (4-8°C)	101 días	Feachem (1983)
Hymenolepis nana (huevos)	-Agua 1°C	Muere rápidamente	Feachem (1983)
	-Agua 43°C	Muere rápidamente	Feachem (1983)
	-Agua 37°C	30 minutos	Feachem (1983)
		Mobilidad en el medio ambiente de 4 a 5 días	Ajijas (1984)

Anexo 3. Equipos para medición de caudal a la entrada y salida del Sistema del Tratamiento.

- Equipo de medición a la entrada.



- Equipo de medición a la salida.



Anexo 4. Huevos de helmintos



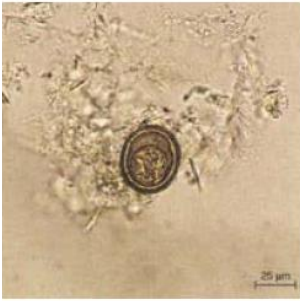
Ascaris lumbricoides



Trichuris trichiura



Enterobius vermicularis



Taenia sp



Hymenolepis diminuta



Hymenolepis nana



Schistosoma mansoni

Fuente: Ayres (1996)

Anexo 5. Agentes parcialmente infecciosos presentes en agua residual doméstica no tratada.

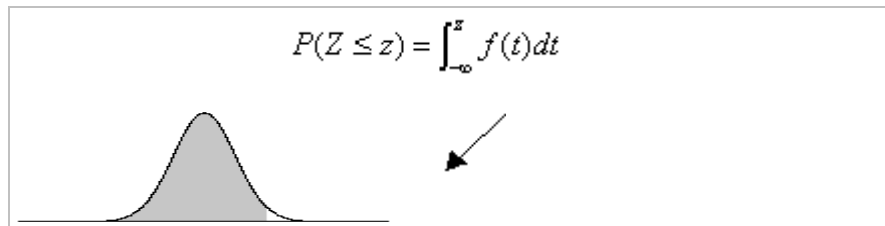
Organismo	Enfermedad	Síntomas
Bacterias		
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógeno)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Malestar, fiebre, dolor de cabeza, enfermedades respiratorias agudas
<i>Leptospira</i> (150esp)	Leptosporosis	Ictericia, fiebre(enfermedad de Weil)
<i>Salmonella typhi</i>	Fibre Tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlcera en el intestino delgado
<i>Salmonella</i> (~2100esp)	Salmonellosis	Envenenamiento por comida
<i>Shigella</i> (4esp)	Shigellosis	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarrea aguda, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
Protozoos		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiasis	Diarrea
<i>Cyclospora</i>	Ciclosporasis	Diarrea severa, dolor de estómago, náuseas y vómitos prolongados
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amébrica)	Diarrea prolongada con sangrado, abscesos en el hígado y en el intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea leve o severa, náuseas, indigestión
Helmintos*		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infección de gusanos intestinales
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis	Gusanos
<i>Fasciola hepática</i>	Fascioliasis	Lombriz de ovejas
<i>Hymenolepsis nana</i>	Hymenolepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Gusano intestinal alargado
Virus		
Adenovirus (31 clases)	Enfermedades respiratorias	Enfermedades respiratorias
Enterovirus (72 clases, p.ej., polio, eco y virus coxsackie)	Gastroenteritis, anomalías cardiacas, meningitis	Gastroenteritis, anomalías cardiacas, meningitis.
Hepatitis A	Hepatitis infecciosas	Ictericia, fiebre y vómito
Agente Norwalk	Gastroenteritis	
Parvovirus (3 clases)	Gastroenteritis	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis	Gastroenteritis

Adoptado de Feachen *et al.* (1983), Madigan *et al.* (1977) y Crook (1997)

* Los helmintos citados son aquellos de importancia a nivel mundial.

Fuente: Tchobanoglous, 2000

Anexo 6. Distribución normal. Áreas bajo la curva normal estándar.



Segunda cifra decimal del valor de z										
z	0.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995
3.3	.9995	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997
3.4	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9998

Fuente: Pérez

Anexo 7. Datos para la determinación de la Calidad Microbiológica

HUEVOS DE HELMINTO (Huevos de helminto/ L)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
30 de marzo	37	5
3 de abril	55	0
6 de abril	40	0
17 de abril	30	10
20 de abril	70	0
24 de abril	10	0
27 de abril	20	0
1 de mayo	20	8
4 de mayo	40	0
8 de mayo	50	0
11 de mayo	40	4
15 de mayo	10	0
18 de mayo	73	4
22 de mayo	20	0
31 de mayo	40	0

COLIFORMES FECALES (UFC/ 100ml)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	2,4E+06	8,0E+05
30 de marzo	2,5E+06	1,3E+06
6 de abril	7,5E+05	3,6E+05
17 de abril	5,1E+06	1,3E+06
20 de abril	2,6E+06	9,1E+05
8 de mayo	2,7E+06	2,3E+06
11 de mayo	2,7E+06	2,5E+05
15 de mayo	4,3E+06	9,6E+05
18 de mayo	8,8E+06	2,1E+06
31 de mayo	3,8E+06	1,3E+06
1 de junio	1,4E+07	3,0E+06

Anexo 8. Datos para la determinación de la Calidad Fisicoquímica

pH		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	7,51	7,03
30 de marzo	7,38	7,02
3 de abril	7,28	6,91
6 de abril	7,3	6,96
17 de abril	7,28	6,72
20 de abril	7,85	7,49
24 de abril	7,39	7,16
27 de abril	7,08	6,61
1 de mayo	7,12	6,87
4 de mayo	7,64	7,22
8 de mayo	7,79	7,51
11 de mayo	7,45	7,31
15 de mayo	6,81	6,75
18 de mayo	7,18	6,61
22 de mayo	6,6	6,10
1 de mayo	7,08	6,81

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (dS/m)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	0,86	0,49
30 de marzo	0,85	0,52
3 de abril	0,77	0,56
20 de abril	0,80	0,52
24 de abril	0,74	0,58
27 de abril	0,70	0,51
1 de mayo	0,45	0,38
4 de mayo	0,68	0,49
8 de mayo	0,61	0,46
11 de mayo	0,49	0,45
15 de mayo	0,87	0,52
18 de mayo	0,84	0,57
22 de mayo	0,78	0,49
31 de mayo	0,77	0,53

SÓLIDOS DISUELTOS (mg/L)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	481,0	209,5
30 de marzo	346,5	235,5
3 de abril	325,0	219,0
6 de abril	351,0	227,5
17 de abril	350,5	239,0
20 de abril	398,5	263,5
24 de abril	410,5	246,5
27 de abril	418,5	236,5
1 de mayo	278,0	227,0
4 de mayo	304,5	267,0
8 de mayo	333,5	275,5
11 de mayo	325,0	231,5
15 de mayo	323,0	226,5
18 de mayo	398,5	237,0
22 de mayo	452,5	214,0
31 de mayo	366,0	283,0

FOSFATOS (mg/L P-PO ₄)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	1,62	2,25
30 de marzo	2,35	2,47
3 de abril	1,51	2,92
6 de abril	2,91	2,64
17 de abril	2,41	2,78
8 de mayo	2,22	3,04
11 de mayo	2,66	1,97
15 de mayo	1,78	2,73
18 de mayo	2,17	2,501
22 de mayo	2,52	2,50
31 de mayo	2,34	2,49
1 de junio	2,42	2,26

NITROGENO TOTAL (mg/L N)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
27 de marzo	64,09	25,58
30 de marzo	64,97	32,05
6 de abril	78,79	36,16
17 de abril	78,79	37,63
20 de abril	72,91	39,98
24 de abril	62,83	37,13
27 de abril	31,99	26,85
1 de mayo	60,55	30,84
4 de mayo	55,98	35,41
8 de mayo	55,98	54,26
11 de mayo	85,11	42,84
15 de mayo	80,54	45,70
18 de mayo	91,39	38,84
22 de mayo	69,12	41,13

NITROGENO AMONICAL (mg/L N amoniacal)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
30 de marzo	61,45	24,99
3 de abril	61,45	32,63
17 de abril	70,85	33,81
20 de abril	67,62	32,93
24 de abril	64,68	37,04
27 de abril	54,26	29,13
1 de mayo	30,84	25,13
4 de mayo	48,55	28,56
8 de mayo	49,12	30,27
11 de mayo	35,41	33,70
15 de mayo	83,40	41,13
18 de mayo	75,40	38,84
22 de mayo	77,68	31,42
31 de mayo	61,69	35,41

NITROGENO ORGANICO (mg/L N orgánico)		
FECHA	ENTRADA	SALIDA
30 de marzo	2,65	0,59
17 de abril	7,94	2,35
20 de abril	11,17	4,70
24 de abril	8,23	2,94
27 de abril	8,57	8,00
1 de mayo	1,14	1,71
4 de mayo	12,00	2,28
8 de mayo	6,85	5,14
11 de mayo	20,56	20,56
15 de mayo	1,71	1,71
18 de mayo	5,14	6,85
22 de mayo	13,71	7,43
31 de Mayo	7,43	5,71

