



018530 - SWITCH

Sustainable Water Management in the City of the Future

Integrated Project
Global Change and Ecosystems

Tratamiento de aguas residuales municipales en el Valle del Cauca

Due date of deliverable: January, 2011
Actual submission date: January, 2011

Start date of project: 1 February 2006

Duration: 60 months

Lead partner: UNIVALLE

Revision: final

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	X

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN EL VALLE DEL CAUCA

CLAUDIA LORENA SUAREZ MARMOLEJO

Código 0703333

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
MAESTRIA EN INGENIERÍA AREA DE ENFASIS EN INGENIERIA
SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
NOVIEMBRE 2 de 2010**



TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN EL VALLE DEL CAUCA

CLAUDIA LORENA SUAREZ MARMOLEJO

Código 0703333

Trabajo de Investigación para optar al título de Magister en Ingeniería

Directoras:

Jenny Rodríguez, Ing. Sanitaria, PhD

Patricia Torres Lozada, Ing. Sanitaria, PhD

Asesor:

Alberto Galvis, Ing, MSc

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
MAESTRIA EN INGENIERÍA AREA DE ENFASIS EN INGENIERIA
SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
NOVIEMBRE 2 de 2010**

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS	iii
INDICE DE FIGURAS	v
AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
1. OBJETIVOS	5
1.1. Objetivo General.....	5
1.2. Objetivos Específicos	5
2. MARCO REFERENCIAL.....	6
2.1. Generalidades	6
2.2. Aguas Residuales.....	6
2.2.1. Composición típica de agua residual doméstica	7
2.3. Tratamiento de aguas residuales.....	9
2.3.1. Objetivos del tratamiento de aguas residuales	9
2.3.2. Procesos biológicos combinados (Anaerobio + Aerobio)	10
2.3.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales	12
2.3.4. Evolución en el tratamiento de aguas residuales.....	13
2.3.5. Tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales	14
Lodos activados	16
Lagunas de estabilización	16
Biodisco	18
Filtro biológico o percolador	19
Humedales construidos.....	21
Reactor UASB	22
Tanque séptico y filtro anaerobio	24
2.3.6. Postratamiento en aguas residuales.....	26
2.4. Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales.....	28
2.4.1. Confiabilidad y eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales	30
2.5. Situación y perspectivas del tratamiento de aguas residuales municipales	32
2.5.1. Experiencias en el tratamiento de aguas residuales.....	33
3. MATERIALES Y METODOS	38
3.1. Descripción del Área del estudio.....	38
3.2. Identificación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	38
Reconocimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	39
Evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales	39

3.4.	Definición de puntos críticos del diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento.....	40
3.5.	Propuesta de estrategias de optimización	40
3.6.	Análisis estadístico	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	41
4.1.	Identificación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Valle del Cauca	42
	Análisis de la selección de tecnologías.....	47
	Tanque séptico seguido de filtro anaerobio	48
	Lagunas de estabilización	49
	Reactor UASB seguido de filtro percolador	50
	Otras tecnologías	51
4.2.	Análisis del diseño, construcción y operación.....	53
4.2.1.	Lagunas de estabilización	53
4.2.2.	Reactor UASB seguido de Filtro percolador	65
4.4.	Definición de puntos críticos	88
4.4.1.	Puntos críticos de la tecnología de lagunas de estabilización.....	88
4.4.2.	Puntos críticos de la tecnología de reactor UASB y filtro percolador	89
4.5.	Estrategias de optimización de las PTARs	91
4.5.1.	Estrategias de optimización de la tecnología de lagunas de estabilización	91
4.5.2.	Estrategias de optimización de la tecnología de reactor UASB y filtro percolador.....	93
5.	CONCLUSIONES.....	95
	ANEXOS.....	96
	BIBLIOGRAFIA.....	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipos de agua residual (Adaptado de Roeleveld y Grietje, 2006)	7
Tabla 2.2. Principales constituyentes de las aguas residuales a reducir (Adaptado de von Sperling y Chernicharo, 2005; Metcalf y Eddy, 2003)	8
Tabla 2.3. Características microbiológicas de las aguas residuales (von Sperling y Chernicharo, 2005)	8
Tabla 2.4. Variación de la composición de las aguas residuales en diversas partes del mundo (Veenstra y Polprasert, 1997, van Haandel y Lettinga, 1994, Cubillos <i>et al.</i> , 2003)	9
Tabla 2.5. Principales procesos de tratamiento biológico en aguas residuales (Adaptado de Crites y Tchobanoglous, 2000).....	12
Tabla 2.6. Niveles de tratamiento (Adaptada de Idelovitch y Ringslog, 1997; Metcalf y Eddy, 2003; Hernández <i>et al.</i> , 2000).....	13
Tabla 2.7. Ventajas y limitaciones de las procesos (URL-1, 2009)	15
Tabla 2.8. Parámetros de diseño y operación del sistema de lodos activados (von Sperling, 1997; Romero, 1999; Rittmann y McCarty, 2001; Metcalf y Eddy, 2003; Orozco, 2005).....	16
Tabla 2.9. Condiciones para el uso de lagunas de estabilización (Yanéz, 2000)	17
Tabla 2.10. Parámetros de diseño de las lagunas de estabilización	18
Tabla 2.11. Factores que influyen en el proceso (Romero, 1999).....	18
Tabla 2.12. Parámetros de diseño y operación (Crites y Tchobanoglous, 2000).....	19
Tabla 2.13. Factores de diseño (Crites y Tchobanoglous, 2000; Metcalf y Eddy, 2003)	20
Tabla 2.14. Factores de diseño en humedales construidos (EPA, 2000).....	22
Tabla 2.15. Ventajas y limitaciones de la tecnología de Reactor UASB (Adaptado de van Haandel y Lettinga, 1994).....	23
Tabla 2.16. Parámetros de diseño (Adaptado van Haandel y Lettinga, 1994)	24
Tabla 2.17. Condiciones para el diseño y operación adecuado del reactor UASB (Monroy, 1997).....	24
Tabla 2.18. Factores de diseño de la configuración Tanque séptico seguida de filtro anaerobio (Adaptado de Young, 1991; van Haandel y Lettinga, 1994)	25
Tabla 2.19. Condiciones para un buen desempeño de la configuración Tanque séptico - filtro anaerobio (Adaptado de Young, 1991; van Haandel y Lettinga, 1994).....	26
Tabla 2.20. Tipo de tecnologías construidas en los municipios Colombianos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2002)	36
Tabla 2.21. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia (URL-5, 2002).....	37

Tabla 3.1. Instituciones visitadas y tipo de información solicitada.....	38
Tabla 4.1. Características de las plantas de tratamiento de aguas residuales	43
Tabla 4.2. Descripción general de los municipios del Valle del Cauca con planta de tratamiento de aguas residuales	45
Tabla 4.3. Criterios de selección de tecnologías	47
Tabla 4.4. Dimensiones de las lagunas de estabilización	59
Tabla 4.5. Parámetros de las lagunas de estabilización en el Valle del Cauca	60
Tabla 4.6. Actividades de operación y mantenimiento para la tecnología de Lagunas de estabilización	62
Tabla 4.7. Parámetros de diseño de los reactores UASB	70
Tabla 4.8. Dimensiones de los Reactores UASB.....	70
Tabla 4.9. Dimensiones de los filtros percoladores	76
Tabla 4.10. Actividades de mantenimiento a la tecnología de Reactor UASB seguido por filtro percolador.....	83
Tabla 4.11. Normas de vertimiento a un cuerpo de agua (decreto 1594)	85
Tabla 4.12. Desviación estándar de las eficiencias de reducción	86
Tabla 4.13. Prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon.....	87
Tabla 4.14. Puntos críticos del diseño y la construcción de las lagunas de estabilización	88
Tabla 4.15. Puntos críticos en las actividades de operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización.....	89
Tabla 4.16. Puntos críticos del diseño y la construcción de los Reactores UASB y filtro percolador ..	89
Tabla 4.17. Puntos críticos en las actividades de operación y mantenimiento de los Reactores UASB y filtro percolador.....	90
Tabla 4.18. Estrategias de optimización del diseño y la construcción de las lagunas de estabilización	91
Tabla 4.19. Estrategias de optimización de las actividades de operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización	92
Tabla 4.20. Estrategias de optimización del diseño y la construcción de los Reactores UASB y filtro percolador.....	93
Tabla 4.21. Estrategias de optimización de las actividades de operación y mantenimiento de los Reactores UASB y filtro percolador.....	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Composición de las aguas residuales (Adaptado Metcalf y Eddy, 1998).....	7
Figura 2.2. Proceso aerobio y proceso anaerobio (Sterling, 1987)	14
Figura 2.3. Esquema de un proceso de lodos activados (Ruiz <i>et al.</i> , 1999)	16
Figura 2.4. Lagunas de estabilización (von Sperling, 1995)	17
Figura 2.5. Biodisco (URL- 2, 2009).....	19
Figura 2.6. Filtro Biológico o Percolador (Romero, 1999).....	20
Figura 2.7. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales (Lara, 1999)	21
Figura 2.8. Reactor UASB (Chernicharo, 2007).....	23
Figura 2.9. Tanque séptico y Filtro Anaerobio (URL- 3, 2008)	25
Figura 2.10. Selección de tecnología de tratamiento en relación con el origen del agua residual, su composición y objetivos de tratamiento (Adaptado de Helmer y Hespanhol, 1997)	29
Figura 3.1. Ubicación área de estudio	38
Figura 4.1. Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Valle del Cauca.....	42
Figura 4.2. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales predominantes en el Valle del Cauca...	44
Figura 4.3. Zona de sedimentación de alta tasa	73
Figura 4.4. Compendio de las eficiencias de reducción en diagrama de cajas y alambres	86
Figura 4.5. Revestimiento adecuado (Stewart, 2005).....	92
Figura 4.6. Tipos de descarga de agua residual (Adaptado de Stewart, 2005)	93
Figura 4.7. Dispositivo de distribución del afluente (van Haandel y Lettinga, 1994, Chernicharo, 2007)	95

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su incondicional apoyo

A mis directoras por sus enseñanzas y tiempo dedicado

A la Ingeniera Amparo Duque por su disposición y colaboración

Al proyecto SWITCH por su contribución en el desarrollo de la investigación

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el Departamento del Valle del Cauca, en los aspectos de diseño, construcción, operación, mantenimiento y desempeño. Se propusieron como objetivos específicos diagnosticar las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en los municipios del Departamento del Valle del Cauca, analizando la información existente en el órgano ambiental sobre el desempeño, identificar las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), definir los factores críticos que afectaban su operación y desempeño, para finalmente proponer estrategias de optimización de las PTAR evaluadas.

En la etapa de identificación se encontró que en el Departamento predomina la tecnología de lagunas de estabilización y en un segundo lugar se encuentra la configuración de reactor UASB seguido de filtro percolador. Después del estudio de cada tecnología se identificaron puntos críticos relacionados con el diseño tales como; selección inadecuada de parámetros y configuraciones inapropiadas. En la construcción se identificaron aspectos relacionados con la mala ubicación de unidades y el uso de materiales no recomendados. Para las actividades de operación y mantenimiento se encontró deficiencia en el seguimiento del proceso, de igual manera, se encontraron actividades que se realizan con frecuencias que no garantizan un funcionamiento adecuado y en algunas ocasiones insuficiente capacitación del operador.

A partir de los puntos críticos identificados y de la experiencia en otras PTARs bajo condiciones similares a las estudiadas, se propusieron estrategias de optimización tendientes a solucionar, de una manera práctica y sencilla las limitaciones encontradas.

A pesar de las limitaciones halladas con relación al diseño, construcción y actividades de operación y mantenimiento, las tecnologías adoptadas se consideran aceptables para las condiciones socio-económicas y ambientales del Departamento, además de que alcanzan un nivel aceptable de eficiencia. Se presume que otras tecnologías de tratamiento no podrían funcionar con tanto éxito como las lagunas y la configuración de reactor UASB seguido de filtro percolador. No obstante, se precisa mayor atención a la hora de diseñar y mantener las PTARs de manera que se garantice el adecuado desempeño del sistema.

ABSTRACT

The main aim of this research was to contribute to the enhancement of the wastewater plant treatment performance from the region of the Valle del Cauca, in the areas of design, construction, operation, maintenance and performance. It was proposed as specific objectives to diagnose the plant wastewater treatment in the municipalities of Valle del Cauca Department, analyzing the information in the environmental agency on performance, identify water treatment plant (WWTP), define the critical factors that affect the operation and performance, and finally, propose strategies for the optimization of the evaluated wastewater treatment plants.

In the identification stage it was found out the dominant technology in the region is the treatment by stabilization ponds, and in second place is the UASB reactor configuration followed by a trickling filter. After the study of each technology it was identified the critical factors related with the design, such as an inadequate selection of the parameters and inappropriate configurations. Also it was found some aspects related with the wrong positioning of some operation units and the use of non-recommended materials in the construction. For the maintenance and operation it was found deficient periods of measurement and control of the process, i.e. long delay time for the measure of the process variables and not enough technical instruction to the operators of the plant.

It was proposed some strategies of optimization of the identified critical points based on the experience in other WWTP, which are under similar conditions with the studied plants, aimed to solve those limitations in a simple and practical way.

Despite the found limitation in the design, construction, maintenance and operation activities of the wastewater treatment plants, the adopted technologies were considered sustainable for the environmental and socio-economic situation of the region of the Valle del Cauca. Moreover, their efficiency is quiet acceptable. It's considered that other technologies for wastewater treatment different to the stabilization ponds and the configuration of a UASB reactor followed by a trickling filter could not work out better than them. However, it's required to pay more attention in the design and maintenance processes of the wastewater treatment plants to warranty the well performance of the system.

INTRODUCCION

El manejo inadecuado de las aguas residuales generan un sin número de problemas de carácter político, social y económico que demanda soluciones acordes con las capacidades tecnológicas de cada comunidad, ya que si bien, muchas comunidades no tienen posibilidades de implementar técnicas costosas cuando se deben suplir otro tipo de necesidades. Dentro de esas necesidades están las relacionadas con el uso del agua para abastecimiento doméstico y con la disposición de las aguas residuales.

El acceso al agua potable y al saneamiento puede hacer una gran contribución a la erradicación de la pobreza, mejoras en la salud, calidad de vida y protección del ambiente. No obstante, progresos en las condiciones sanitarias, tanto en el ámbito urbano como el rural, deben realizarse a una rapidez mayor a la que crece la población, a fin de poder alcanzar en un mediano plazo una cobertura sanitaria adecuada y mejoras significativas en la salud pública. A nivel nacional, el avance en la ampliación de la cobertura de abastecimiento de agua y saneamiento ha sido lento, especialmente con respecto a este último, requiriendo por lo tanto una prioridad más alta.

Construir un sistema de tratamiento de aguas residuales no significa por sí sólo un progreso ni una solución a la problemática ambiental; para que esto sea posible, es necesario garantizar su eficiencia y sostenibilidad a través del tiempo mediante una adecuada selección de la tecnología y operación del sistema.

Por otro lado, para garantizar el adecuado funcionamiento y sostenibilidad de los sistemas de tratamiento, se deben contar con herramientas que permitan efectuar un análisis de su desempeño, teniendo en cuenta las condiciones propias de cada tecnología de tratamiento. Así mismo, resulta ineludible que el manejo y tratamiento de las aguas residuales debe dar como resultado un efluente que pueda ser descargado de manera segura en el ambiente o con propiedades de reuso, considerando en términos del desarrollo sostenible el agua residual como un recurso y no como un desecho.

Bajo este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de los sistemas de tratamiento de Aguas Residuales en el Departamento del Valle del Cauca, con el fin de realizar un diagnóstico de los sistemas existentes. La investigación fue apoyada por el proyecto SWITCH “Sustainable Water Management Improve’s Tomorrow Cities’ Health”, el cual orienta al desarrollo efectivo y sostenible del manejo del agua en las zonas urbanas y por el grupo de investigación “Estudio y control de la contaminación ambiental – ECCA”.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Evaluar las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el Departamento del Valle del Cauca, en los aspectos de diseño, construcción, operación, mantenimiento y desempeño.

1.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en los municipios del Departamento del Valle del Cauca, analizando la información existente en el órgano ambiental sobre el desempeño
- Definir los puntos críticos que afectan el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento
- Proponer estrategias de optimización de las plantas de tratamiento de aguas residuales evaluadas

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Generalidades

Uno de los recursos más valiosos con los que cuenta el ser humano es el agua y ésta sin duda alguna constituye un elemento esencial para la vida en el planeta. Actualmente, la administración racional del agua ha alcanzado una importancia de dimensión mundial; sin embargo, este recurso cada vez es más escaso, ya que tanto en las ciudades como en las comunidades rurales se consumen grandes cantidades de agua potable y sólo una poca cantidad de agua residual es tratada. La protección de la salud pública es el propósito fundamental del tratamiento de residuos tanto sólidos como líquidos y le sigue en orden de importancia la protección del ambiente. Por tanto, es responsabilidad de los ingenieros proyectistas, investigadores y gestores públicos involucrados, asegurar que los sistemas de tratamiento logren esta meta (Gijzen, 2001).

Aunque se han generado numerosas alternativas de mejoramiento en cuanto al adecuado manejo y gestión del recurso hídrico, los esfuerzos son aun excipientes, ya que la contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más graves, no sólo para la comunidad colombiana sino para el mundo entero. Este recurso se ve afectado principalmente por los vertimientos de aguas residuales de origen urbano y rural, con un gran aporte de carga orgánica; la descarga de estos efluentes residuales a los cuerpos de agua representa la principal causa de mortandad a nivel mundial; ya que las aguas residuales poseen características favorables para la proliferación de microorganismos generadores de enfermedades fatales para el ser humano como la hepatitis, el cólera y la tifoidea, entre otras (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Por lo anterior, es de interés público adoptar sistemas sostenibles para la reducción y la transformación de los constituyentes de las aguas contaminadas, básicamente en países en desarrollo, donde gran parte de su territorio no trata sus residuos líquidos. Se precisa apuntar hacia la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH), la cual intenta asegurar que los esfuerzos para administrar el agua sean coordinados, sustentables, eficaces y que tomen en cuenta todo tipo de temas relacionados con el recurso, que van desde opiniones y necesidades, hasta los efectos que cualquier acción puede causar aguas abajo. Básicamente, la GIRH indica que si se desea lograr un desarrollo sustentable y con eficacia de costos, se tiene que considerar un panorama más amplio.

2.2. Aguas Residuales

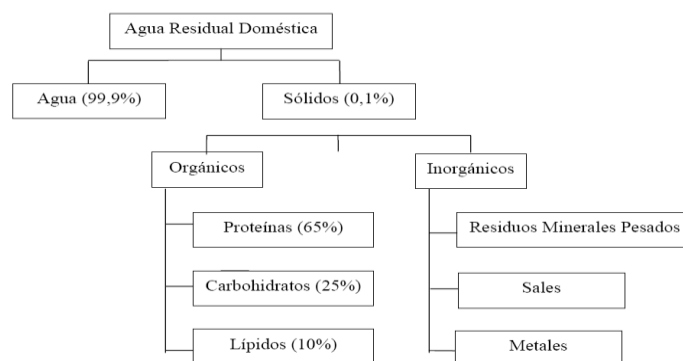
Las *aguas residuales* (AR) son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en los sumideros y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado. De manera general, la Tabla 2.1 presenta los tipos de agua residual.

Tabla 2.1. Tipos de agua residual (Adaptado de Rooleveld y Grietje, 2006)

Tipo de agua	Definición	Característica
Agua residual doméstica	Producida en las diferentes actividades al interior de las viviendas, colegios, etc.	Los contaminantes están presentes en moderadas concentraciones
Agua residual municipal	Son las transportadas por el alcantarillado de una ciudad o población	Contiene materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc
Agua residual industrial	Las resultantes de las descargas de industrias	Su contenido depende del tipo de industria y/o procesos industriales
Agua negra	Contiene orina y heces	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos farmacéuticos
Agua amarilla	Es la orina transportada con o sin agua	Alto contenido de nutrientes, productos farmacéuticos, hormonas y alta concentración de sales
Agua café	Agua con pequeña cantidad de heces y de orina	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos
Agua gris	Provenientes de lavamanos, duchas, lavadoras	Tiene pocos nutrientes y agentes patógenos y por el contrario presentan máxima de carga de productos para el cuidado personal y detergentes

2.2.1. Composición típica de agua residual doméstica

El ARD, está compuesta por un 99.9% de agua y un 0.1% de sólidos, de los cuales el 70% son orgánicos y el 30% son inorgánicos como arenas, sales y metales; siendo éste 0.1% el que debe ser sometido a tratamiento en las PTARs. La composición del agua residual está en función del uso, ésta depende tanto de las características sociales y económicas de la población así como del clima, la cultura y del uso del suelo entre otras (von Sperling y Chernicharo, 2005). La Figura 2.1 presenta la composición del ARD.


Figura 2.1. Composición de las aguas residuales (Adaptado Metcalf y Eddy, 1998)

Aproximadamente el 65% de los sólidos orgánicos son proteínas como albúminas, globulinas y enzimas provenientes de las industrias o de la actividad microbiológica en el agua residual. La proporción de los carbohidratos está en función de las costumbres en la región (éstos se encuentran en sus formas más comunes como glucosa, sacarosa, almidón y celulosa). Las grasas y aceites animales o vegetales son el tercer componente de los alimentos. La Tabla 2.2 presenta los constituyentes que deben ser reducidos de las aguas residuales y en la Tabla 2.3 se observan sus características microbiológicas.

Tabla 2.2. Principales constituyentes de las aguas residuales a reducir (Adaptado de von Sperling y Chernicharo, 2005; Metcalf y Eddy, 2003)

Componente	Importancia
Sólidos suspendidos	Forman depósitos de lodo y favorecen las condiciones anaerobias cuando son descargados a los ecosistemas
Materia orgánica	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, comunmente es medida como DBO y DQO; si se descarga sin tratamiento a un cuerpo de agua, reduce en este el oxígeno disuelto y desarrolla condiciones anaerobias
Patógenos	Microorganismos que transmiten enfermedades
Nutrientes	El nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento, cuando son descargados en los cuerpos de agua generan crecimiento excesivo de algas y condiciones anaerobias
Contaminantes prioritarios	Pueden ser orgánicos e inorgánicos, causan alteraciones genéticas, mutaciones; además son cancerígenos
Compuestos orgánicos refractarios	Son resistentes al tratamiento convencional como por ejemplo los fenoles y algunos pesticidas utilizados en la agricultura
Metales pesados	Se encuentran en las aguas residuales provenientes de industrias, pueden ser removidos y reutilizados
Compuestos orgánicos disueltos	El calcio, sodio y sulfatos son añadidos en algunos casos al agua de consumo con el fin de suplir algunas necesidades, estos pueden ser removidos y reutilizados
Temperatura	Ligeramente alta comparada con el agua de beber Variaciones acorde al año (estaciones) Influye en la actividad microbiana Influye en la solubilidad de los gases Influye en la viscosidad
Color	Aguas frescas: ligeramente gris Aguas sépticas: gris oscuro o negro
Olor	Aguas frescas: relativamente desagradable Aguas sépticas: olor ofensivo, tanto del ácido sulfhídrico como de otros productos de la descomposición Aguas industriales: depende de lo que se fabrique
Turbiedad	Causado por una gran variedad de sólidos suspendidos Las aguas frescas presentan mayor concentración de sólidos

Tabla 2.3. Características microbiológicas de las aguas residuales (von Sperling y Chernicharo, 2005)

Organismos	Descripción
Bacterias	Presentes en varias formas y tamaños Son los responsables de la estabilización de la materia orgánica Algunas bacterias son patógenas causando enfermedades intestinales
Arqueas	Similar a las bacterias en tamaño y componentes celulares Se diferencia de las bacterias en el material celular ARN Es importante en los procesos anaerobios
Algas	Organismos fotosintéticos autótrofos, contiene clorofila Importante en la producción de oxígeno en los cuerpos de agua y en los procesos de tratamiento de aguas residuales En lagos y reservorios puede proliferar y deteriorar la calidad del agua
Hongos	Predominan los aerobios, multicelulares no fotosintéticos, son organismos heterótrofos Son también importantes en la descomposición de la materia orgánica Pueden crecer en condiciones de baja temperatura y pH
Protozoos	Usualmente organismos unicelulares sin pared celular En su mayoría son aerobios y facultativos Se alimentan de bacterias, algas y otros microorganismos Son esenciales en tratamientos biológicos por que mantienen el equilibrio entre microorganismos Algunos son patógenos
Virus	Organismos parásitos, formados por la asociación de material genético (ADN o ARN) y estructura proteica Patógenos y frecuentemente se dificulta su reducción en el tratamiento de aguas residuales
Helminths	Los huevos ocasionan enfermedades

Con relación a la variación de la composición de las ARM en diferentes lugares del mundo la Tabla 2.4 presenta las concentraciones en países como Kenia, Brasil y Colombia, entre otros.

Tabla 2.4. Variación de la composición de las aguas residuales en diversas partes del mundo (Veenstra y Polprasert, 1997, van Haandel y Lettinga, 1994, Cubillos *et al.*, 2003)

Parámetro	Lugar / Concentración					
	Manchester (UK)	Aman (Jordania)	Nairobi (Kenia)	Emirato (Dhabi)	Campina Grande (Brasil)	Cali (Colombia)
DBO (mg/L)	240	770	520	228	240	250
DQO (mg/L)	520	1830	1120	600	570	267
SST (mg/L)	210	900	520	198	392	215
N-NH ₃ (mg/L)	22	100	33	35	38	17
NTK (mg/L)						24
pH (Unidades)	7,4		7	7,6	7,8	
Temperatura (°C)	14	22	24		26	25

De manera general, cuanto mayor sea la cantidad de materia orgánica contenida en un agua residual, mayor será su concentración. El término de materia orgánica es utilizado como indicador de la cantidad de sustancias orgánicas presentes en un AR. La concentración depende del consumo de agua; en Estados Unidos donde el consumo es elevado (350 a 400 L/hab.d) el agua residual es diluida (la DBO varía de 200 a 250 mg/L), mientras que en países en desarrollo el agua residual es más concentrada (la DBO varía de 300 a 700 mg/L) y el consumo de agua es más bajo (40 a 100 L/hab.d).

Las diferencias culturales con respecto al uso del agua y al manejo de los residuos, es otro factor que influye en la calidad y cantidad de las AR, así como los productos utilizados en la cocina, en el lavado y en el aseo o cuidado personal; Jefferson *et al.* (2001) reportan variaciones incluso entre ciudades de un mismo país. Para el caso de Colombia, donde las épocas de lluvia pueden superar los 7 meses, la existencia de sistemas de alcantarillado combinados representa una desventaja, ya que además de incrementar los caudales generan AR altamente diluidas.

2.3. Tratamiento de aguas residuales

2.3.1. Objetivos del tratamiento de aguas residuales

La contaminación de los cuerpos de agua origina entre otros, problemas de salud pública al aumentar el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas, problemas estéticos al alterar el aspecto agradable y natural del paisaje, problemas ambientales al comprometer la supervivencia de la biota presente, el bienestar de la población y los usos recreativos y deportivos; además, la contaminación demanda un mayor consumo de insumos químicos en las plantas de potabilización o de uso industrial (Unda, 1999).

Para Castro (2003) tres aspectos básicos son analizados cuando se presenta la contaminación de los cuerpos de agua por causa de la descarga de un ARM; el primero se refiere a la concentración del grupo coliforme que refleja el riesgo relativo de infección; el segundo alude a la calidad física y química del agua, en especial lo relacionado con el contenido de materia orgánica en solución, suspensión o en estado coloidal, la presencia

de grasas o aceites, de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo y de sustancias tóxicas como los metales pesados. El tercero se refiere a los objetivos de calidad del agua en función de sus usos, entre los cuales se puede citar el uso humano, el doméstico, la preservación de la flora y fauna, el agrícola y el recreativo.

Diversos autores argumentan que el objetivo básico del tratamiento de AR es proteger la salud, promover el bienestar de las personas y proteger el ambiente. Para otros autores, el objetivo es modificar las características del agua de tal forma que el efluente tratado cumpla con los requisitos especificados en la legislación, para ser vertido en un cuerpo receptor sin causar impactos adversos en el ecosistema o pueda ser reutilizado en otras actividades (Bernal y Cardona, 2003).

Desde el año 1900 hasta la década de los 70, los objetivos de tratamiento fueron inicialmente la reducción del material coloidal, suspendido y material flotante. Hasta los 80 los objetivos estaban más relacionados con criterios estéticos y ambientales. Los criterios posteriores se hicieron más exigentes y empezó a considerarse la necesidad de eliminación de nutrientes (Bernal y Cardona, 2003).

Posteriormente en los años 90 como consecuencia del avance tecnológico, el tratamiento de aguas residuales se enfocó en solucionar los problemas de salud pública causados por sustancias tóxicas y microorganismos patógenos presentes en el agua residual y a desarrollar prácticas que permitan solucionar el problema en la fuente (Metcalf y Eddy, 2003).

Ahora bien, el enfoque tradicional del tratamiento de las AR, difiere totalmente del tratamiento destinado al reuso; para el primer caso, los objetivos se centran en la reducción de los compuestos orgánicos biodegradables, del material flotante y del suspendido. El tratamiento con finalidades de reuso consiste en aprovechar los nutrientes y parte de la materia orgánica, concentrándose básicamente en la reducción de patógenos (OMS, 2006). Los objetivos del reuso pueden ser múltiples, entre ellos se encuentra evitar la sobreexplotación del recurso hídrico, fomentar el uso eficiente del agua, prevenir la contaminación, sensibilizar y concientizar la población sobre la importancia del reuso, complementar instrumentos de prevención y control.

2.3.2. Procesos biológicos combinados (Anaerobio + Aerobio)

El tratamiento biológico, al ser una herramienta de la naturaleza, está mejor adaptada para resolver los problemas de tratamiento de AR biodegradables, como las de origen municipal (Noyola, 1996). Los procesos anaerobios y aerobios cumplen los requisitos deseables para establecer una tecnología perdurable siempre y cuando se conozcan sus limitaciones y bondades, de manera que se ajusten buscando un beneficio en particular (objetivos de tratamiento).

El debate de hace algunos años, que llevaba a oponer las tecnologías anaerobias modernas con las aerobias, ya ha sido resuelto en buena medida y por el contrario la combinación de procesos ha madurado a través de la experimentación. Ahora lo que se acepta en forma creciente es que ambos tipos de procesos no se oponen, sino que se complementan al aportar cada uno y atenuando entre ambos sus respectivas desventajas (Noyola, 2003).

De considerarse los atributos de cada proceso al momento de seleccionar una tecnología, se avanzaría aunque fuera de modesta forma, en la construcción del desarrollo sustentable (Noyola, 1996). Para la escogencia de tecnologías en América Latina y el Caribe se pueden identificar dos grandes subconjuntos, los cuales a su vez se combinan entre sí, en función de la densidad de la población; área urbana y área rural y en función del clima; zonas cálidas y zonas frías o templadas, entre otros.

La influencia del clima y la temperatura del agua son particularmente importantes para los sistemas naturales, así como para los sistemas compactos anaerobios. De esta forma, temperaturas inferiores a 10°C o ambientes donde la temperatura es cercana a 0°C puede limitar la aplicación de estos procesos, lo que resulta menos problemático para los procesos compactos aerobios o fisicoquímicos (Noyola, 2003). En este contexto, las condiciones ambientales prevalecen a la hora de escoger el tipo de tecnología a utilizar, sin embargo es sabido que el tratamiento combinado se presenta como una gran opción.

A diferencia de los sistemas de tratamiento aerobio, las cargas de los reactores anaerobios no están limitadas por el suministro de ningún reactivo. Entre más lodo esté siendo retenido en el reactor bajo condiciones operacionales, más altas son las cargas potenciales del sistema, siempre y cuando un tiempo de contacto suficiente entre el lodo y el agua residual pueda ser mantenido (Lettinga *et al.*, 1987).

Una combinación entre ciertos procesos compactos y procesos naturales podrá en ocasiones ser una ventajosa opción, en particular cuando los costos deben ser reducidos y se tienen ciertas limitaciones de terreno (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Es sabido que los procesos biológicos, ya sea aerobio o anaerobio, por si solos son insuficientes para la eliminación de microorganismos patógenos y nutrientes, excepto las lagunas de estabilización para el caso de los patógenos (von Sperling, 1995); posicionando la combinación de procesos como una herramienta a la hora de eliminar este tipo de constituyentes en las aguas residuales.

Para solucionar el problema de tratamiento del AR, existen procesos de tipo aerobio y anaerobio o procesos combinados anaerobio-aerobio. En la Tabla 2.5 se observan los principales procesos biológicos empleados.

Tabla 2.5. Principales procesos de tratamiento biológico en aguas residuales (Adaptado de Crites y Tchobanoglous, 2000)

Tipo	Nombre común	Uso	Fundamentos del proceso	Eficiencias logradas
Procesos aerobios				
Crecimiento en suspensión	Lodos activados	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	En un reactor donde se mantiene una masa floculenta en suspensión, de superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, constituida por microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos.	80-85% DBO y SST
	Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y de maduración)	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	En ellas se reduce la materia orgánica, los microorganismos patógenos que representan un grave problema para la salud y además su efluente puede ser reutilización, con finalidades como la agricultura.	80-90% DBO y SST; además de N y P
Película bacterial adherida	Filtros percoladores	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	La materia orgánica que se halla presente en el AR es degradada por la población de microorganismos adherida al medio, en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios, a medida que los microorganismos crecen el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar todo el espesor de la película.	80-85% DBO y SST
	Biodiscos	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	La película biológica se encuentra en rotación dentro del agua residual sedimentada y dentro de la atmosfera para proveer oxígeno a los microorganismos. El AR fluye en sentido paralelo o perpendicular al eje horizontal de rotación, al pasar de una etapa a otra o de un tanque a otro	80-85% DBO y SST
Híbrido (combinación) crecimiento en suspensión y adherido	Humedales construidos (superficiales y subsuperficiales)	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	La materia orgánica y los nutrientes que transportan las AR, son degradados por la población microbiana y asimilados por las plantas emergentes, sumergidas y flotantes con enraizamiento fijo, mientras que las libremente flotantes toman los nutrientes directamente del agua	80-85% DBO y SST, además de N y P
Procesos anaerobios				
Crecimiento en suspensión	Tanque séptico		Se logran las fases de hidrólisis y acidogénesis del material orgánico, con la correspondiente retención de sólidos biodegradables durante más tiempo, que el material orgánico presente en forma disuelta o coloidal; generalmente se complementa con otro tratamiento buscando mejorar <u>eficiencias de reducción</u>	40-50% DBO y SST
	Reactor UASB	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación, estabilización	La tecnología UASB está basada en la acumulación de microorganismos en un reactor, cuyas características de sedimentación impidan su arrastre fuera del mismo; otras propiedades esenciales que reúne este tipo de reactor es disponer de un mecanismo de separación gas-líquido-sólido, por medio de campanas colectoras situadas en su parte alta, mediante la cual se consigue la sedimentación de los flóculos de pequeño tamaño que ascienden adheridos a las burbujas de gas y el disponer de un sistema distribución uniforme del afluente en la base del reactor	80-90% DBO y SST
	Laguna anaerobia		La estabilización en condiciones anaerobias es lenta, ya que las bacterias ase reproducen a una baja tasa, es por esto que generan menos lodo que los <u>proceso aerobios</u>	80-90% DBO y SST
Película bacterial adherida	Filtro anaerobio		En los filtros anaerobios de flujo ascendente la mayor parte de la biomasa bacteriana se acumula como flóculos, mientras que en los de flujo descendente, la biomasa está casi totalmente retenida en las paredes del reactor y el material de soporte.	60-80% DBO y SST

2.3.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales

En términos generales, en una PTAR ocurren operaciones, procesos físicos, químicos y biológicos.

Se puede considerar que las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en estos procesos son las mismas que se realizan en la naturaleza (ríos, lagos, suelo, etc.) sólo que en forma controlada dentro de tanques o reactores y a velocidades mayores. Los niveles de tratamiento son presentados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Niveles de tratamiento (Adaptada de Idelovitch y Ringslog, 1997; Metcalf y Eddy, 2003; Hernández *et al.*, 2000)

Nivel	Descripción	Tipo de unidad
<i>Preliminar</i>	Remueve material causantes de problemas operacionales como trapos, ramas, arenisca, material	Rejas, tamices, desarenador, tanques de homogenización, trampas de grasa
<i>Primario</i>	Remueve una porción de sólidos suspendidos y de materia orgánica	Sedimentador, unidades con inyección de aire, tanque séptico, Imhoff
<i>Secundario</i>	Remueve materia orgánica biodegradable disuelta o suspendida. Puede ir acompañado de procesos	Lodos activados, biodiscos, filtros percoladores, humedales, lagunas, reactor UASB
<i>Terciario</i>	Remueve sólidos suspendidos a través de microfiltración, además en este nivel se remueven	Microfiltración, la coagulación y precipitación, la adsorción por carbón activado, cloración
<i>Avanzado</i>	Remueve material remanente suspendido o disuelto, después de tratamiento biológico	Destilación, osmosis, cloración, ozonización, intercambio iónico, nanofiltración, adsorción por carbón activado, electrodialisis

Una PTAR está integrada por varias etapas e independiente del tipo de tecnología utilizada, es necesario la instalación de tratamiento o niveles preliminares que impidan el desgaste de equipos y reduzcan los riesgos por obstrucción y posibles daños.

2.3.4. Evolución en el tratamiento de aguas residuales

Las canalizaciones de desagüe construidas por los romanos aun funcionan en la actualidad y aunque su principal función era el drenaje, la costumbre romana de arrojar los desperdicios a las calles significaba que con el agua se transportaban grandes cantidades de materia orgánica. Hacia finales de la edad media empezaron a usarse en Europa excavaciones subterráneas privadas y más tarde letrinas. El contenido de los pozos negros era vertido en los cuerpos de agua, en tierras no explotadas o se empleaban como fertilizante en las granjas cercanas. Posteriormente, con la introducción del abastecimiento de agua y la instalación de cañerías, llegaron los inodoros y los primeros sistemas sanitarios modernos (Ferrer *et al.*, 1998).

En los años posteriores se reportaron las primeras referencias sobre el tratamiento de AR en ciudades europeas como Bunzlau en Alemania, donde utilizaron rudimentarios procesos de disposición en el suelo; luego a comienzos del siglo XVIII surgieron las lagunas, seguidas por los tanques sépticos y los lodos activados en 1914, hasta llegar a tiempos más recientes cuando en 1966, se perfeccionaron investigaciones sobre reactores anaerobios convencionales para AR con cantidades relativamente altas de materia orgánica; este avance contó con la contribución de James Young y Perry McCarty (Ferrer *et al.*, 1998).

El tratamiento del agua residual ha experimentado una evolución constante; en la actualidad se dispone de gran variedad de tecnologías y se piensa en los objetivos de

tratamiento a la hora de seleccionarlás. Sin embargo, como grandes avances, se tiene la propuesta de estrategias de minimización y control y finalmente el hecho de considerar el reuso como la opción preferida antes que la descarga a los cuerpos receptores; esta actividad contribuye a satisfacer la demanda de agua y/o fertilizantes, además de mejorar el manejo y la disposición final de las AR, con una reducción de la contaminación y un beneficio económico.

2.3.5. Tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales

Los procesos biológicos utilizan microorganismos que se alimentan de la materia orgánica y reducen su concentración en las AR, además de utilizar los compuestos para la formación de nuevas células (Díaz *et al.*, 2002). Los procesos biológicos se clasifican en (von Sperling y Chernicharo, 2005):

Aerobios: realizados por microorganismos, cuyo metabolismo tiene lugar en presencia de oxígeno disuelto. Los productos finales son principalmente CO_2 , H_2O y una parte es empleada para la formación de nuevos microorganismos.

Anaerobios: realizados por microorganismos cuyo metabolismo se efectúa en ausencia de oxígeno libre, pudiendo verse gravemente afectados por su presencia. Los productos finales son CH_4 y CO_2 .

Facultativos: los microorganismos responsables de estos procesos (organismos facultativos) son indiferentes a la presencia de oxígeno disuelto.

Anóxicos: la presencia de oxígeno es letal para el desarrollo de este proceso, por lo tanto, se debe garantizar la ausencia total de este elemento.

La Figura 2.2 presenta las diferencias entre los procesos aerobios y anaerobios.

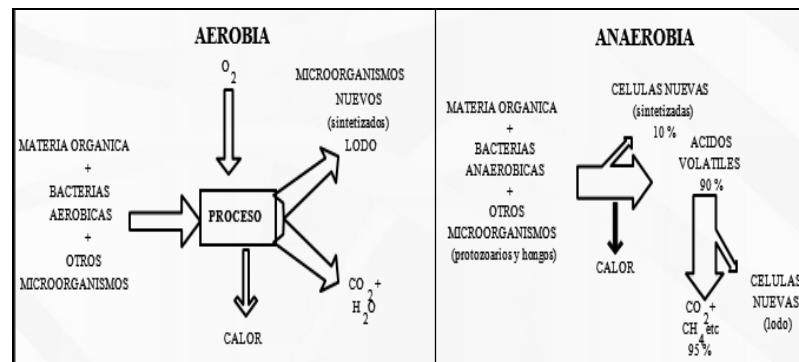


Figura 2.2. Proceso aerobio y proceso anaerobio (Sterling, 1987)

La Tabla 2.7 presenta las limitaciones y ventajas de los procesos aerobios y anaerobios.

Tabla 2.7. Ventajas y limitaciones de las procesos (URL-1, 2009)

Aerobio	Anaerobio
$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CO_2 + 3 CH_4$
Mayor producción de lodos	Menor producción de lodos
Operatividad comprobada	Menores costos de operación
50% de C es convertido en CO_2 , 40-50% es incorporado dentro de la masa microbiana	95% de C es convertido en biogas; 5% es transformado en biomasa microbiana
60% de la energía es almacenada en la nueva biomasa, 40% es perdido como calor	90% de la energía es retenida como CH_4 , 3-5% es perdido como calor, 5-7% es almacenada en la biomasa
Ingreso de elevada energía para aireación	No requiere de energía
Limitación de cargas orgánicas	Acepta altas cargas orgánicas
Se requiere adición de nutrientes	Requerimiento bajo de nutrientes
Requerimiento de grandes áreas	Se requiere pequeña área superficial
Periodos de arranque cortos	Largos periodos de arranque
Baja generación de olores	Generación de olores molestos

Experiencias reportadas en diversos países, muestran resultados satisfactorios al acoplar procesos aerobios y anaerobios. Después de pasar por reactores anaerobios, el efluente es pulido en lagunas de estabilización (Cavalcanti, 2003), en filtros de goteo (Chernicharo y Nascimento, 2001), en filtros gasificados sumergidos (Goncalves *et al.*, 1998), en sistemas de lodos activados (von Sperling *et al.*, 2001), en Biodiscos (Castilho *et al.*, 1997; Tawfic *et al.*, 2002, 2003, 2004), en humedales (Kaaseva, 2004; Mbuligue, 2004), en reactores de biomasa inmovilizada (Vieira *et al.*, 1986, 1988) y en reactores de lotes secuenciales (Sousa y Foresti, 1996; Torres y Foresti, 2001).

Los tratamientos incluirán la reducción de la concentración de por lo menos uno de los cinco constituyentes más importantes del agua residual como los sólidos suspendidos; el material orgánico (biodegradable), los nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), los microorganismos patógenos y los metales pesados (von Sperling, 1995).

Los diferentes tipos de tratamientos de las aguas residuales se han desarrollado en forma sencilla y general hacia dos propósitos; la captación o separación de los sólidos de acuerdo a su sedimentabilidad y la estabilización biológica de los sólidos restantes. La magnitud de estos propósitos dependerá del tipo de tratamiento empleado (Sterling, 1987).

Actualmente, existe una gran variedad de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales aunque estas deben ser seleccionadas de acuerdo a la realidad local. De manera general, se puede afirmar que en los países desarrollados el número de tecnologías factibles puede estar limitado por la existencia de normatividad ambiental más estricta; mientras que en los países en desarrollo el número de opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales podría ser más amplio debido básicamente a los diversos estándares de calidad. von Sperling (1995) argumenta que todos estos factores son críticos al seleccionar preliminarmente los sistemas más adecuados para un contexto particular.

A continuación se realiza una descripción de los sistemas más utilizados en el tratamiento de aguas residuales municipales.

Lodos activados

La tecnología fue desarrollada en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett, quienes realizaron experimentos con un cultivo biológico en suspensión en un tanque aireado e introdujeron la idea de recircular la biomasa suspendida formada durante la aireación (Metcalf y Eddy, 2003). La Figura 2.3 presenta la configuración básica del proceso de lodos activados que consta de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano capaz de asimilar la materia orgánica presente en el AR.

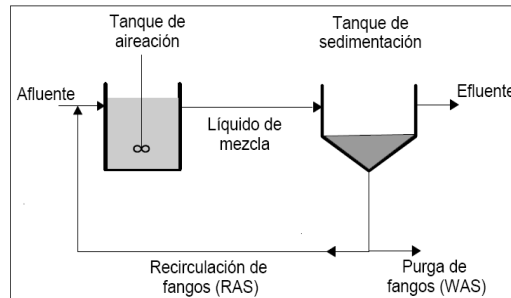


Figura 2.3. Esquema de un proceso de lodos activados (Ruiz et al., 1999)

Los parámetros de operación y diseño para los sistemas de lodos activados varían dependiendo de la modalidad utilizada; entre éstos se encuentran el tiempo de retención celular - θ_c , el tiempo de retención hidráulico - TRH, la carga orgánica volumétrica - COV, la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación (licor mixto) - SSVLM, la relación alimento microorganismos - A/M, la tasa de recirculación de lodo y la concentración de oxígeno disuelto. En la Tabla 2.8 se encuentran algunos parámetros utilizados para el diseño y operación de algunas de las modalidades de lodos activados.

Tabla 2.8. Parámetros de diseño y operación del sistema de lodos activados (von Sperling, 1997; Romero, 1999; Rittmann y McCarty, 2001; Metcalf y Eddy, 2003; Orozco, 2005)

Modalidad	PARAMETRO					
	θ_c (d)	TRH (h)	COV (kg $DBO_5/(m^3 \cdot d)^{-1}$)	SSVLM (mg.L ⁻¹)	A/M (kg- $DBO_5/(kgSSV \cdot d)^{-1}$)	R (%)
Estabilización por contacto	5 – 15	RC: 0.5 – 1.5 RE: 2 – 6	Sistema* 0.6 – 1.3	RC 1000 – 3000 RE 4000 – 10000	Sistema* 0.2 – 0.6	50 – 150
Convencional flujo pistón	5 – 15	4 – 8	0.3 – 0.6	1500 – 3000	0.2 – 0.4	25 – 75
Convencional completamente mezclado	5 – 15	4 – 8	0.8 – 2.0	3000 – 6000	0.2 – 0.6	25 – 100

RC: Reactor de contacto RE: Reactor de estabilización

* Incluye volumen y biomasa de las dos unidades

Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son excavaciones de forma rectangular o cuadrada y cercadas por taludes de tierra (Mendonça, 2000). La Figura 2.4 presenta los tipos de lagunas de estabilización y las diferentes configuraciones utilizadas.

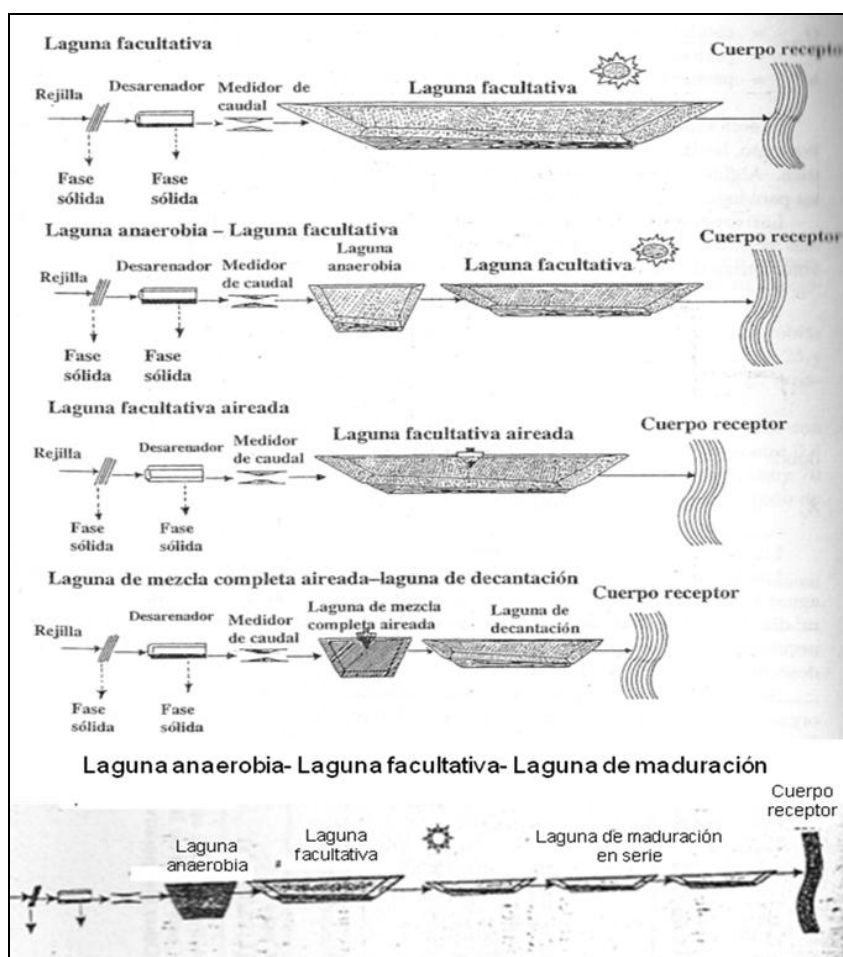


Figura 2.4. Lagunas de estabilización (von Sperling, 1995)

Existen condiciones favorables y otras que generan desventajas a la hora de utilizar lagunas de estabilización como tecnología de tratamiento de aguas residuales, la Tabla 2.9 muestra algunas de ellas.

Tabla 2.9. Condiciones para el uso de lagunas de estabilización (Yanéz, 2000)

Condiciones favorables	Condiciones desfavorables
Altos requisitos de calidad bacteriana y ausencia de helmintos en el efluente	Altos requisitos de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para controlar la eutrofización del cuerpo receptor
Disponibilidad de terreno a bajo costo	Grandes costos del terreno
Temperaturas cálidas y ausencia de variaciones bruscas	Problemas sociales en la adquisición del terreno (muchos propietarios)
Bajo costo inicial en comparación con otras alternativas	Bajas temperaturas y variaciones bruscas
Bajo costo de operación y mantenimiento	Presencia de desechos coloreados

Con relación a los parámetros utilizados para el diseño de las lagunas se presenta la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Parámetros de diseño de las lagunas de estabilización

PARAMETRO	TIPO DE LAGUNA								
	AEROBIA	FACULTATIVA				ANAEROBIA			
	(Metcalf y Eddy, 2003)	(Metcalf y Eddy, 2003)	(Mara et al., 1992; 1996; Yanéz, 1992)	Sobalvarro, 1997	Rolim, 2000	(Metcalf y Eddy, 2003)	(Mara et al., 1992; 1996; Yanéz, 1992)	Sobalvarro, 1997	Rolim, 2000
Tiempo de retención (d)	10-40	7-30	10-16	15-35	6-20	20-50	1-5	1-8	1-5
Profundidad (m)	1-1,5	1-2,5	1,8-2			5,5-5,0	3-5		
pH	6,5-10,5	6,5-9,0				6,8-7,2			
Rango de temperatura (°C)	0-30	0-50	10-30	20-30	20-25	6-50	10-30	20-35	20-25
Temperatura optima (°C)	20	20	20			30	25	27	22
Carga orgánica (Kg DBO ₅ , ha.d)	40-120	15-200	275-350			200-500	100-400		
Reducción DBO ₅ (%)	80-95	80-95				50-70			
Concentración de algas (mg/L)	40-100	20-80				0-5			

Biodisco

Los biodiscos son un sistema de tratamiento biológico secundario del tipo de crecimiento adherido o reactor de película fija. La Tabla 2.11 presenta los principales factores que intervienen en el proceso y algunas ventajas y desventajas de la tecnología.

Tabla 2.11. Factores que influyen en el proceso (Romero, 1999)

Factores que influyen en el proceso	Ventajas	Desventajas
Características del agua residual	Simplicidad	Fallas en los discos, los ejes y motores
Carga hidráulica	Confiabilidad (con pretratamiento apropiado, generalmente sedimentación), resistencia a cargas choque y	Fugas de lubricantes
Carga orgánica	Tiempos de retención cortos	Criterios de diseño muy disímiles (aún)
Velocidad rotacional de los discos	Poco consumo energético, bajos costos de operación y mantenimiento	Generalmente necesitan recirculación
Profundidad de sumergencia	Lodos de buena sedimentabilidad	
Tiempo de retención y temperatura del agua residual	Construcción modular	

En la Figura 2.5 se presenta el esquema de un Biodisco.

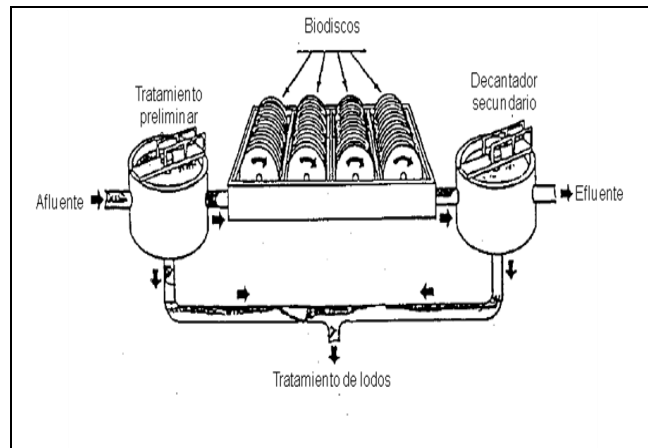


Figura 2.5. Biodisco (URL- 2, 2009)

Con relación a los parámetros de diseño y operación, la Tabla 2.12 presenta los más utilizados.

Tabla 2.12. Parámetros de diseño y operación (Crites y Tchobanoglous, 2000)

Elemento (parámetro)	Unidades	Cantidad
Medio (Hojas circulares de polietileno)	Longitud (m)	7,5 - 8,2
	Area superficial (m ²)	9300 -16700
	Diámetro (m)	3,7 - 3,6
Carga orgánica	gr DBO/día	12 - 31

En algunos diseños se adiciona aire en la parte inferior del tanque para proveer oxígeno y hacer girar los discos cuando éstos se encuentran equipados con dispositivos para capturar el aire. Sin embargo, las guías de diseño de los fabricantes varían ampliamente entre sí (WEF - ASCE, 1992).

Filtro biológico o percolador

Es un reactor compuesto por un material de relleno sobre el que crece una película de microorganismos aerobios y anaerobios con aspecto de limos, el material de relleno generalmente tiene de 2 a 3m de profundidad, aunque a veces se utilizan lechos menos profundos, la Figura 2.6 presenta el esquema de un filtro percolador. Cada filtro posee un sistema de desagüe inferior el cual recoge el agua tratada y los sólidos biológicos que se han separado del medio, éste sistema de desagüe es importante en la evacuación del efluente y por permitir la circulación del aire.

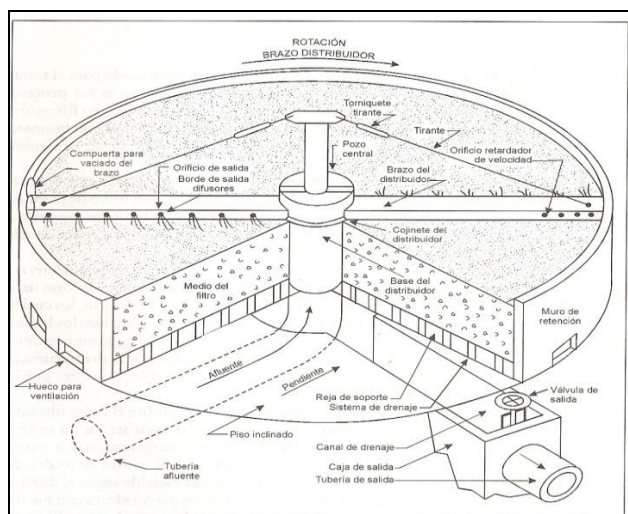


Figura 2.6. Filtro Biológico o Percolador (Romero, 1999)

Los filtros percoladores se clasifican en función de la carga orgánica en filtros de baja carga, filtros de media y alta carga, filtros de muy alta carga, filtros de desbaste y filtros de dos etapas (Becerra, 2001). Los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un filtro percolador se encuentran en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Factores de diseño (Crites y Tchobanoglous, 2000; Metcalf y Eddy, 2003)

Elemento	Definición y parámetros
Tasa hidráulica	Dado que la mayoría de los filtros percoladores de medio rocoso están entre 1 y 2m de profundidad, la carga volumétrica que se utiliza en algunos países se convierte fácilmente a flujo por unidad de área-tiempo.
Tasa orgánica	No hay parámetro para la carga de sólidos y la reducción de sólidos en los filtros no se ha caracterizado de forma predictiva alguna.
Sistema de distribución	La velocidad de giro varía con el caudal en la unidad accionada por reacción, esta debe ser del orden de una vuelta cada 10min, o menor en un distribuidor de dos brazos, la distancia entre el fondo del brazo del distribuidor y la parte superior del lecho debe ser de 15 – 22cm, esto permitirá que el agua residual salga de las boquillas, se extienda y cubra de forma uniforme todo el lecho.
Medio filtrante	Una de las características más importantes de un medio filtrante es su resistencia y durabilidad, medios sintéticos se han utilizado con éxito recientemente, como rosetas y las láminas de plástico entrelazadas dispuestas como un panal de abejas para producir medios con gran área superficial, este tipo de medio filtrante puede ajustarse a cualquier configuración de filtro, se pueden construir filtros de hasta 12m de profundidad.
Drenaje inferior	La ventilación del filtro es esencial para mantener condiciones aerobias y lograr un buen desempeño. Si existe porosidad apropiada dentro del medio del filtro, la diferencia de temperatura entre el aire y el agua residual provee aspiración natural y aireación suficiente. Los fabricantes de medio sintético recomiendan 0.1m ² de área de ventilación por cada 3 a 4.6m de periferia de la torre de filtración y 1 a 2m ² de área de ventilación, en el área de drenaje por cada 1000m ³ de medio.
Recirculación	La recirculación del efluente en sistemas de alta carga, incluyendo aquellos con medio de filtrado plástico, puede ser desde un punto anterior o posterior al tanque de sedimentación.

La DBO_5 del efluente y las concentraciones de SST provenientes de los filtros percoladores bien operados y que mantienen una velocidad estándar, se encuentran en el rango de 20mg/L. Los filtros percoladores convencionales ligeramente cargados han demostrado ser muy efectivos en la nitrificación (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Humedales construidos

En los humedales se logra la reducción de la materia orgánica, nutrientes, metales y patógenos, por una combinación de mecanismos biológicos y fisicoquímicos (Kadleck y Knigh, 2000; Stottmeister *et al.*, 2004). Se ha demostrado que los humedales construidos son adecuados para el ARD crudas como tratamiento único, aunque es aconsejable un pretratamiento con el fin de remover sólidos de gran tamaño y material flotante (Morris y Herbert, 1997; Mander y Mauring, 1997).

El uso de humedales construidos de flujo subsuperficial para el tratamiento de ARD ha aumentado. Los datos indican que el incremento ha sido de 340 municipalidades en 1940 a 571 en los 80s (Gopal, 1999; Billore *et al.*, 1999). Esta inclinación en el uso de técnicas no convencionales para el tratamiento de dichas aguas, establece la necesidad y el reto de estudiar el funcionamiento de estos sistemas y el papel que ejercen los mecanismos biológicos e hidrodinámicos involucrados en la reducción de la carga orgánica (Reed *et al.*, 1995; Gopal, 1999; Wetzel, 2000). La literatura ha manifestado en su mayoría, la bondad de estos sistemas naturales como una opción sostenible, ambientalmente limpia y de bajo precio para los países en desarrollo (Harberl, 1999). La Figura 2.7 presenta esquemas de los humedales de flujo superficial y subsuperficial.

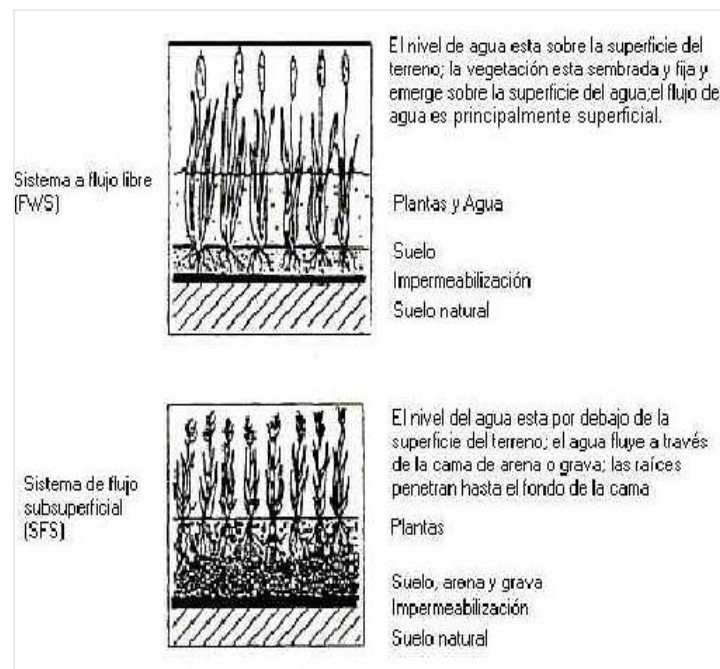


Figura 2.7. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales (Lara, 1999)

Para realizar un diseño adecuado del humedal, se deben considerar aspectos claves como la existencia de pretratamiento o estructuras que retengan los sólidos, que al entrar

al humedal podrían ocasionar obstrucciones. La Tabla 2.14 presenta los factores que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar.

Tabla 2.14. Factores de diseño en humedales construidos (EPA, 2000)

Elemento	Definición
Estructuras de entrada y salida	Se requieren condiciones de flujo uniforme para garantizar que todo el medio filtrante actúe y de esta forma alcanzar buenos rendimientos, la distribución y recolección del agua residual en el humedal se realiza mediante tubería perforada.
Impermeabilización del terreno	Se recomienda impermeabilizar con una geomembrana de polietileno o si el suelo es arcilloso, esta puede compactarse de manera que la infiltración sea mínima.
Medio soporte	La selección adecuada del tamaño del medio soporte asegura una buena conductividad hidráulica, además de proporcionar superficie para la fijación de los microorganismos.
Pendiente	El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo. Esta resistencia es impuesta por la vegetación, la capa de sedimentos, el medio soporte y la biopelícula. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la salida y la entrada, para ello se provee al fondo del humedal con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo; la pendiente como máximo debe ser del 1% ya que mayores inclinaciones corren el riesgo de dejar la entrada sin agua residual.

Reactor UASB

El reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) fue desarrollado por el doctor Gatzke Lettinga y colegas en la década de 1970 en la Universidad de Wageningen (Holanda). Este consiste esencialmente en un reactor, a través del cual el agua residual pasa a una baja velocidad ascensional.

Posee además un manto de lodos que se compone de gránulos o flocs. El fenómeno que rige la formación de los gránulos o flocs constituye la parte fundamental del proceso. El tratamiento del agua se da cuando se pone en contacto el agua residual con los gránulos. Los gases producidos bajo condiciones anaerobias provoca la recirculación interna, lo que ayuda en la formación y mantenimiento de las partículas biológicas, sobre las cuales algunas partículas de gas se adhieren. El gas libre y el gas adherido a los gránulos se retienen en el colector de gas en la parte alta del reactor (Lettinga *et al.*, 1980). En la Figura 2.8 se ilustra el reactor.

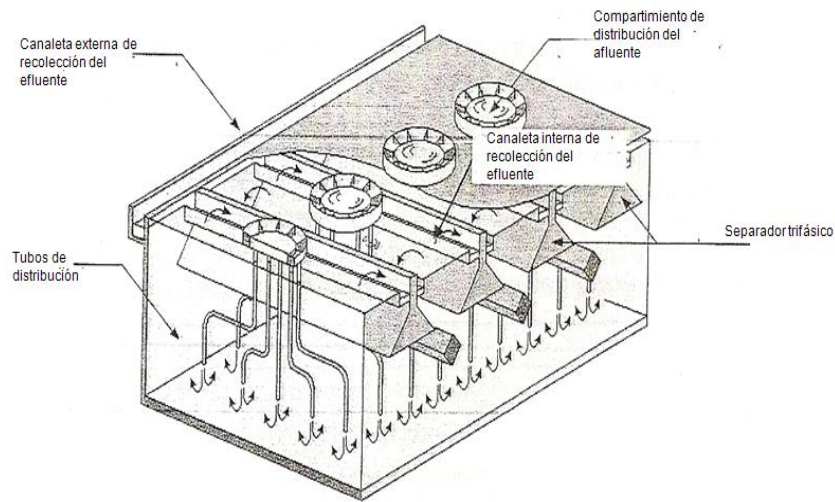


Figura 2.8. Reactor UASB (Chernicharo, 2007)

El reactor UASB requiere por lo menos de cuatro tipos de microorganismos para que ocurra la degradación de las macromoléculas orgánicas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos, las cuales posteriormente resultan en la producción de dióxido de carbono, Metano e Hidrógeno molecular. En la Tabla 2.15 se presentan las ventajas y limitaciones que posee este tipo de tecnología.

Tabla 2.15. Ventajas y limitaciones de la tecnología de Reactor UASB (Adaptado de van Haandel y Lettinga, 1994)

Ventajas	Desventajas
Sistema compacto, utilizando un área de superficie pequeña	Posibilidad de malos olores, particularmente en el caso de un mal diseño o fallas operacionales, ya que este es un proceso con un alto potencial de generación de H_2S
Prácticamente no se requiere ningún equipo en el proceso anaerobio, con costos bajos de construcción y consumo de energía muy bajo	Baja capacidad para recibir cargas tóxicas (por lo general no es el caso de las ARD) El arranque requiere inoculación
Se produce poco lodo en exceso	Eficiencia limitada, según los parámetros de diseño: aproximadamente 45 a 70 % para la reducción de la DQO; de 80 a 90 % en la DBO, menos de un orden logarítmico para la eliminación de coliforme fecal (CF); prácticamente ninguna eficiencia para la eliminación de nitrógeno (N) y fósforo (P)
El lodo en exceso tiene una buena concentración (aproximadamente 5 a 6%), con buenas características de secado	Por lo general el efluente tratado no cumple con lo exigido en la legislación y requiere el acoplamiento de una tecnología aerobia
No se requieren aparatos de calefacción en climas cálidos	

Los criterios de diseño para los reactores deben ser específicos tanto para el tratamiento de ARD como para agua residual industrial, considerando la concentración en el afluente, la presencia de sustancias tóxicas o la cantidad de sólidos inertes y biodegradables (von Sperling y Chernicharo, 2005). Entre los parámetros de diseño se encuentran la carga

hidráulica y orgánica, el tiempo de retención y la profundidad, ente otros, la Tabla 2.16 los presenta.

Tabla 2.16. Parámetros de diseño (Adaptado van Haandel y Lettinga, 1994)

Parámetro	Valor
Tiempo de retención (h)	6
Profundidad (m)	4-6
Velocidad ascensional (m. h-1)	1
Angulo de inclinación separador (°)	45-60
Temperatura (°C)	16-35
Eficiencia teórica esperada DBO (%)	≥80

En la Tabla 2.17 son presentadas las principales condiciones para el diseño y operación de reactores UASB.

Tabla 2.17. Condiciones para el diseño y operación adecuado del reactor UASB (Monroy, 1997)

Condición	Definición
Retención de lodo activo dentro del reactor	Mientras mayor sea la concentración de microorganismos activos retenidos, mayor será la carga orgánica que podrá tratar. Por lo anterior, los factores claves en el diseño y operación de los reactores deben ser un sistema que garantice la separación de las fases gas-sólido-líquido y un mecanismo que permita la retención de biomasa.
Contacto entre el lodo y el sustrato	El tiempo de retención hidráulico debe ser suficiente para permitir un adecuado contacto entre el lodo y el agua residual, principalmente en la zona de reacción del reactor. Uno de los problemas que se presentan en el reactor es la flotación de algunos lodos, lo que evita el contacto adecuado con el agua residual, causando su salida del reactor. Varias condiciones pueden asociarse con la flotación de lodo: presencia de biomasa filamentosa que puede entrapar biogás; presencia de grasas en el lodo las cuales absorben biogás, presencia de proteínas en el agua residual; contacto inadecuado entre la biomasa y el agua residual debido a deficiencias en el sistema de alimentación.
Adecuadas velocidades de reacción	Se debe garantizar la difusión del sustrato en el lodo y la transferencia de los subproductos generados entre las especies bacterianas.
Transferencia de masa	El tamaño de las biopartículas o biopelículas debe permitir el fácil acceso de los microorganismos al sustrato.
Altos tiempos de retención celular	Para permitir una mayor adaptación de los lodos al afluente, lo que favorecerá su estabilidad.

Tanque séptico y filtro anaerobio

El tanque séptico consta de una cámara rectangular con separaciones o no, éstas se ubican por debajo de la superficie del suelo buscando que las aguas residuales fluyan por

gravedad. El período de retención está comprendido entre uno y tres días; durante este período los sólidos se sedimentan en el fondo del tanque, en donde tiene lugar una digestión anaerobia la cual es favorecida por una gruesa capa de espuma que se forma en la superficie del líquido (van Haandel y Lettinga, 1994).

El filtro anaerobio (también llamado sistema de película fija o de lecho fijo) es utilizado en acompañamiento del tanque séptico; en éste, la biopelícula se encuentra en parte inmovilizada en un material de soporte fijo y en parte en suspensión entre los espacios vacíos que restan (la mayor proporción).

La entrada del flujo es generalmente vertical, ascendente o descendente. El material de relleno actúa como separador de gas (se recoge en la parte superior) proporcionando zonas de reposo para la sedimentación de los sólidos que se encuentran en suspensión (van Haandel y Lettinga, 1994). La Figura 2.9 presenta la configuración.

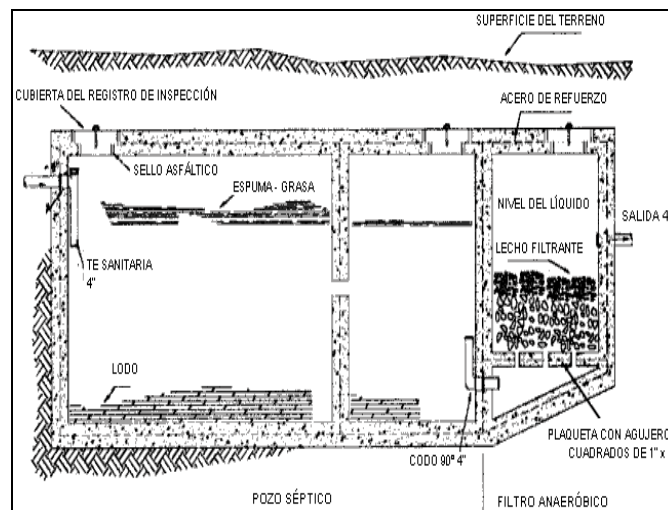


Figura 2.9. Tanque séptico y Filtro Anaerobio (URL- 3, 2008)

Algunos factores que se deben tener en cuenta la hora de diseñar esta tecnología son presentados en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Factores de diseño de la configuración Tanque séptico seguida de filtro anaerobio (Adaptado de Young, 1991; van Haandel y Lettinga, 1994)

Elemento	Definición y parámetro
Tamaño del tanque	El tamaño requerido de un tanque séptico para un establecimiento comercial depende de los caudales anticipados de la instalación, conjuntamente con el caudal proveniente de las viviendas o de otras fuentes, si se trata de un <u>sistema comunitario</u>
Construcción del tanque	Un factor clave en el diseño del tanque séptico es la relación entre la extensión del área superficial, la capacidad de almacenar el agua residual y la cantidad y velocidad de descarga del agua residual. Estos factores afectan la eficacia y la capacidad de retención de lodos. La construcción del tanque debe también <u>asegurar una estructura de cerrado hermético</u>
Alcalinidad	El agua residual debe tener alcalinidad suficiente para mantener un pH, en la zona de los mayor de 6.5; para ello puede requerirse una alcalinidad igual a un 25% de la DQO del agua residual. Sin embargo, el amonio liberado en la hidrólisis de las proteínas puede reducir la alcalinidad requerida de fuentes <u>externas</u>
Tiempo de retención	Para aguas residuales de baja concentración es preferible diseñarlos con base en el tiempo de retención hidráulico el cual varía entre 1 y 3 días; en general la recirculación puede ser necesaria cuando la DQO del residuo es mayor a 8000mg/L
Medio soporte (filtro anaerobio)	Al trabajar con medios plásticos de polipropileno con alta porosidad, se reducen los problemas de obstrucción en el filtro anaerobio que ocurren al usar <u>otro tipo de medio como la piedra</u>
Falso fondo	Al instalar un falso fondo con una profundidad entre 0.4 a 0.55m y al reducir la altura del medio soporte quedando entre 1 y 1.20m, mejora el funcionamiento del filtro

La Tabla 2.19 presenta las condiciones que se deben tener en cuenta para una adecuada operación.

Tabla 2.19. Condiciones para un buen desempeño de la configuración Tanque séptico - filtro anaerobio (Adaptado de Young, 1991; van Haandel y Lettinga, 1994)

Elemento	Descripción
Tanque séptico y filtro anaerobio	El tanque no debe estar expuesto a inundación y debe disponer de espacio suficiente para la construcción del <u>sistema de disposición</u> Debe ser completamente hermético, de material no corrosivo (concreto, metal recubierto)
Mantenimiento	Contar con acceso adecuado para mantenimiento y limpieza y las unidades de entrada y salida ser fácilmente accesibles. Se recomiendan bocas de inspección mayores a los 50cm
Entrada	La batea del tubo de entrada debe estar por lo menos 7.5cm por encima del nivel del agua en el tanque para permitir los levantamiento transitorios del nivel agua durante las <u>descargas al tanque</u>
Mantenimiento	La limpieza se realiza cuando la capa de natas se extiende a menos de 7.5cm desde el borde inferior de la pantalla o unidad de salida o cuando el manto de lodos tiene un espesor mayor del 40% de la profundidad del líquido en el <u>tanque</u>
Medio soporte	El medio en el filtro anaerobio permanece sumergido en el agua residual, permitiendo una concentración de biomasa alta y un efluente clarificado; el proceso se ha usado a bajas temperaturas, pero preferiblemente la temperatura debe ser <u>mayor a 25°C</u>
Mantenimiento	Se debe evitar la acumulación de biomasa y sólidos suspendidos ya que pueden causar líneas preferenciales y <u>corto circuito</u>
Profundidad	La profundidad del lecho debe estar entre 0.8 y 1.5m y el falso fondo no debe ser inferior a 0.3m de altura. Al incrementar esta altura han mejorado los resultados

2.3.6. Postratamiento en aguas residuales

El postratamiento es utilizado para pulir los efluentes de los sistemas de tratamiento, ya sea para reducir materia orgánica remanente o para reducir nutrientes, entre otros. Según

Noyola (2003) y von Sperling y Chernicharo (2005) las principales razones por las cuales los efluentes de los procesos anaerobios pueden requerir un postratamiento son:

- Reducción de materia orgánica remanente (DQO y DBO) en el efluente, esto se debe a que la digestión anaerobia tiene un límite de reducción que depende básicamente de la cinética de degradación y por lo tanto de la temperatura, el contenido de biomasa activa y del grado de contacto entre el sustrato y los microorganismos
- Reducción de nutrientes (N y P). Los procesos anaerobios tienen bajos requerimientos de nutrientes y prácticamente no remueven nitrógeno ni fósforo. Esta reducción sin embargo, puede no ser necesaria, en caso de que el agua sea reutilizada para el riego de cultivos
- Reducción de microorganismos patógenos, los reactores anaerobios no son eficientes en la reducción de bacterias y virus, aunque si tiene capacidad de reducción de huevos y quistes de protozoarios, pero con un postratamiento se aseguraría una reducción del 100%. Con excepción de las lagunas de estabilización, todos los procesos biológicos tienen esta limitante
- Reducción de sólidos sedimentables que hayan permanecido en el efluente o que se hayan descargado en una desestabilización del reactor

La necesidad y el tipo de postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trate ARM, estará determinada fundamentalmente por los parámetros de calidad del efluente que la legislación haya fijado en particular (Morgan *et al.*, 1999).

En Latinoamérica, Colombia, Brasil y México representan los países donde el uso de tecnologías anaerobias han sido ampliamente aplicadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas; aunque se sabe que la concentración de DQO, SST en los efluentes se mantienen entre 80 y 120 mg/L; para coliformes fecales menos de un orden logarítmico y prácticamente ninguna eficiencia para la reducción de N y P (Jordao y Sobrinho, 2004).

Para evitar esta deficiencia en los efluentes, el uso del postratamiento está creciendo con buenos resultados y con una disminución significativa en los costos de inversión. En Brasil se están diseñando y construyendo varias plantas, algunas de ellas secundarias, precedidas por un reactor UASB, las cuales proveen los beneficios esperados, al igual que menores costos de construcción y operación, comparados con los de una planta convencional primaria y secundaria.

Para Jordao y Sobrinho (2004), las ventajas reportadas hacen que dichas plantas sean tanto factibles como deseables, particularmente en climas cálidos y en países en desarrollo, donde los costos de construcción pueden ser un factor limitante para la expansión del tratamiento de aguas residuales.

Dependiendo de la disposición final del efluente y de la legislación sobre la calidad de los vertimientos, se pensaría en la necesidad de postratamiento (Rodríguez, 2003). Para esta finalidad, las tecnologías más utilizadas incluyen procesos biológicos como Lodos Activados, Filtros Percoladores, Lagunas de estabilización, Humedales y Plantas Acuáticas; aunque también han sido empleados procesos físicos, químicos y fisicoquímicos como Filtración en Arena, Desinfección y Floculación- Coagulación (van Haandel y Lettinga, 1994).

2.4. Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales

Una de las decisiones más importantes cuando se planifica un proyecto de saneamiento es la selección de tecnología, la adopción de un sistema inapropiado lleva al desperdicio de recursos y al descontento de la comunidad. Por lo anterior, la sostenibilidad de una tecnología depende en gran parte del éxito obtenido en esta etapa, la cual debe basarse en el criterio básico de que la comunidad sea la protagonista desde el inicio del proceso, participando desde el diagnóstico de la situación actual, la identificación de las prioridades, la formulación de alternativas de solución y la selección de la mejor opción que permita responder a la demanda de saneamiento de la población; planteando soluciones que consideren de manera integral los aspectos socioeconómicos, culturales, ambientales, institucionales de los usuarios potenciales.

Del mismo modo, la tecnología debe estar en armonía con la cultura local y en concordancia con la capacidad financiera y técnica de la comunidad. En lo posible el uso debe conducir a una autonomía de la comunidad con respecto a recursos externos, sobre todo en los aspectos de operación y mantenimiento (Aragón, 1999)

En el proceso de escogencia, la confiabilidad operacional y el funcionamiento del conjunto de procesos y operaciones unitarias son factores importantes. Las soluciones de tratamiento no se generalizan, se debe examinar la influencia de factores sociales, económicos, culturales, jurídicos, ambientales y educativos (Souza, 1997). El diseño de una PTAR debe involucrar la escogencia adecuada de los procesos buscando un funcionamiento óptimo de acuerdo a la situación en particular (Guerrero, 2003). Para Crites y Tchobanoglous (2000) la selección es el proceso mediante el cual se opta por la opción más apropiada para las condiciones del sitio donde se implementará la PTAR. El ingeniero debe escoger la tecnología o combinación de procesos, con el propósito de transformar las características iniciales del AR a niveles aceptables para cumplir con las normas de vertimiento y de reutilización.

En la Región de América Latina y el Caribe, durante la década de 1950 se trató de imitar tecnologías aplicadas en los países desarrollados y se construyeron plantas con tratamiento primario (sedimentación) y secundario (tratamiento biológico con filtros y/o lodos activados), pero éstas no funcionaron bien; la mayoría operó por períodos limitados, los lodos se manejaron deficientemente y con frecuencia se descargaron en los cuerpos de agua que se querían proteger; esta situación habría sido evitada con una adecuada selección basada en las necesidades propias de cada región (Suematsu, 1995).

Bajo este contexto, la selección de un sistema de tratamiento debe considerar, además de los criterios convencionales de factibilidad técnica económica, su adecuación a la realidad sociopolítica y ambiental del sector considerado, así como su capacidad para satisfacer, a través del tiempo, los criterios de descarga establecidos por la normativa vigente. Para ello es necesario desarrollar herramientas que permitan evaluar los posibles esquemas de tratamiento en forma objetiva y considerando las condiciones mencionadas (Sánchez *et al.*, 2006).

No obstante, la particularidad de cada comunidad hace difícil definir un método universal para seleccionar el tipo más adecuado de PTAR (Idelovitch y Ringslog, 1997). Según Helmer y Hespanhol (1997) el proceso de selección de tecnología resulta de una optimización de múltiples criterios que considera factores tecnológicos, socioeconómicos, ambientales e instituciones algunos de los cuales son:

- El tamaño de la comunidad a ser servida
- Las características del sistema de alcantarillado (convencional o no convencional)
- Las fuentes de aguas residuales (doméstico, industrial, aguas lluvias, infiltración)
- Las futuras oportunidades para minimizar las cargas contaminantes
- Los estándares de descarga para efluentes tratados (objetivos de tratamiento)
- La disponibilidad de mano de obra capacitada para el diseño, construcción y operación y mantenimiento
- Condiciones ambientales tales como disponibilidad de terreno, geografía y clima

La importancia de hacer una adecuada selección está siendo cada vez más reconocida por las instituciones del sector agua y saneamiento. Este reconocimiento está asociado con el limitado impacto de muchas de las inversiones en el control de contaminación por aguas residuales, tanto en Colombia como en los demás países de Latinoamérica, especialmente en comunidades pequeñas menores de 30.000 habitantes (Galvis *et al.*, 2005).

En la Figura 2.10 se presenta un proceso de selección tomando en cuenta el origen del agua residual, su composición y los objetivos de tratamiento.

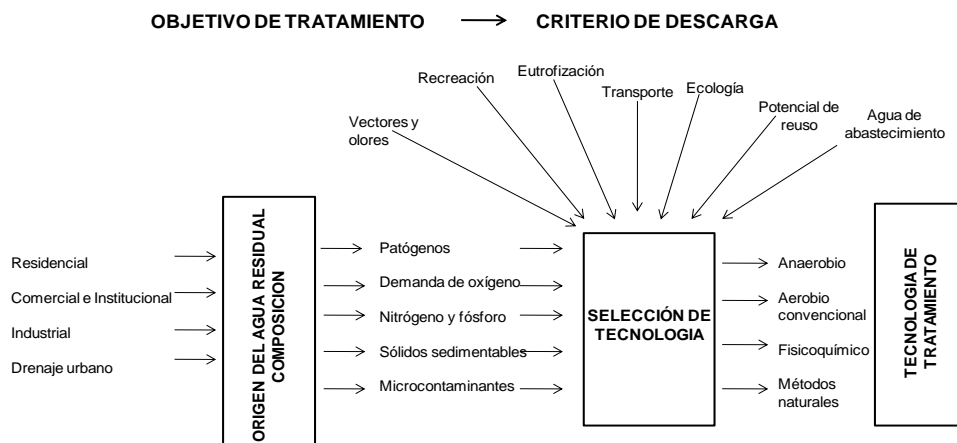


Figura 2.10. Selección de tecnología de tratamiento en relación con el origen del agua residual, su composición y objetivos de tratamiento (Adaptado de Helmer y Hespanhol, 1997)

Diferentes autores han resaltado la importancia de formular criterios para el proceso de selección de tecnologías. En el campo de la ingeniería sanitaria y ambiental se han desarrollado metodologías para apoyar el trabajo de los planificadores, especialmente orientados a países en desarrollo con condiciones tropicales, en los procesos concernientes con la selección de las tecnologías sostenibles para el tratamiento de agua para consumo humano y el tratamiento de aguas residuales domésticas, un caso fue el modelo de la Universidad de Oklahoma (Reid, 1982). Posteriormente, se desarrollaron otros modelos utilizando el método del análisis de decisiones con múltiples criterios (Souza, 1997). A mediados de 1998, investigadores de la Humboldt State University, Arcata, California, dieron a conocer el programa WAWTTAR (Water and Wastewater Technologies Appropriate for Reuse y a comienzos de 1999, se publicó el resultado de los trabajos del Centro de Investigación de la Universidad de Queensland, Australia, con el

modelo SANEX, *Appropriate Sanitation in Developing Countries: the development of a computerized decision aid* (Loetscher y Keller, 1997).

Del mismo modo, von Sperling (1995) presentó criterios y datos para una selección preliminar de sistemas de tratamiento de aguas residuales, relacionados con los factores que afectan directamente el proceso; como eficiencia en la reducción, costos de implementación, requisitos energéticos y de área, además de analizar una serie de ventajas y desventajas que existen en los procesos.

Para disminuir los inconvenientes causados por las desventajas propias de cada tecnología, resulta oportuno conocer las características del sitio donde se instalará el sistema, ya que se simplifica aun más el trabajo de selección, al brindar información como datos generales, morfológicos y analíticos (Sobalvarro, 1997). Debe entenderse como datos generales la información de relieve, señales de erosión, litología, el material de origen, pedregosidad, etc. La descripción morfológica encierra datos de espesor, color, textura, estructura, plasticidad, consistencia y transición entre capas. Los datos analíticos presentan valores de granulometría (arcilla, sílice, arena fina, arena gruesa, etc.). De no contar con este tipo de información, será necesario realizar sondeos en el terreno, para obtener muestras representativas y luego realizar los ensayos pertinentes para obtener las propiedades mecánicas donde se pretenda instalar el sistema de tratamiento. Dentro de los factores climáticos a ser estudiados están fundamentalmente la temperatura, la intensidad y el tiempo de exposición de luz solar (luminosidad), el régimen de vientos, la humedad del aire y la pluviosidad.

Los datos de temperatura se consideran de vital importancia, ya que interfiere directamente en todos los procesos, pudiendo afectar las reacciones bioquímicas, conviene por tanto realizar cualquier selección con la temperatura media más baja del mes más frío. Esta información puede ser obtenida a través de estaciones meteorológicas (Sobalvarro, 1997).

La luminosidad es otro aspecto importante, principalmente en aquellos procesos donde se precisa de la ocurrencia del proceso de fotosíntesis. Por esta razón, regiones con elevada radiación solar y baja nebulosidad son propicios para procesos donde generalmente la degradación se realiza por medio naturales.

Estudiar la velocidad, intensidad y dirección de los vientos en donde se pretende ubicar una PTAR es también de gran importancia, dado que problemas en el funcionamiento generalmente ocasionan malos olores, además de la influencia que tienen sobre el equilibrio en la estratificación térmica y oxigenación; para tal efecto, es necesario construir la rosa de los vientos de la zona urbana próxima y luego realizar un estudio detallado de los lugares con vientos predominantes, convirtiéndose así en un paso más para realizar la selección adecuada de la ubicación y del proceso de tratamiento (Sobalvarro, 1997).

2.4.1. Confiabilidad y eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales

El acceso al tratamiento de AR no implica por sí mismo un saneamiento adecuado, continuo, confiable, suficiente y sostenible. Un importante desafío es emprender de manera simultánea las inversiones para rehabilitar y optimizar la infraestructura existente, asegurar una gestión eficiente y sostenible de los servicios, con especial énfasis en el saneamiento logrando mejorar las condiciones de calidad y confiabilidad de los sistemas (BID, 2008).

La confiabilidad en el desempeño de una PTAR es un concepto plasmado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) a principios de la década de los años 70, cuando existió un fuerte crecimiento en el número de PTARs municipales. La confiabilidad tiene como objetivo asegurar la operación en un alto grado de eficiencia y a su vez, la eficiencia de una PTAR está en función directa con el desempeño típico o promedio que han mostrado otras plantas del mismo tipo y depende entre otras causas de las condiciones de diseño, de la implementación en el uso de equipos, de factores ambientales, de las prácticas de operación y mantenimiento y de la confiabilidad para resistir las variaciones (Castro, 2003).

De acuerdo con lo anterior, las condiciones y factores cambian según las circunstancias de cada lugar, a este respecto, la literatura coincide en asignar un orden decreciente de importancia a los siguientes factores que afectan el desempeño: el tercer lugar lo ocupa el diseño incorrecto, deficiencia que no puede corregirse con una operación adecuada; el segundo lugar está representado por las fallas en los equipos de O&M (operación y mantenimiento) y el primer lugar, lo constituye la confiabilidad de la tecnología para soportar las variaciones de carga tanto hidráulicas como orgánicas (Crites y Tchobanoglous, 1998; WEF-ASCE, 1998).

Para otros autores, la confiabilidad de una tecnología de tratamiento puede especificarse como la probabilidad de lograr el rendimiento adecuado en un determinado período de tiempo y en determinadas condiciones. En términos del cumplimiento en una PTAR, la confiabilidad puede entenderse como el porcentaje de remoción en el tiempo esperado, si no son violados los límites establecidos por la legislación ambiental (Dean y Forsythe, 1976; Niku *et al.*, 1979, 1981)

Crites y Tchobanoglous (2000) presentan una definición similar, para los autores la confiabilidad en términos del desempeño de la PTAR es el tiempo durante el cual se consiguen las concentraciones esperadas en el efluente para cumplir con las normas de vertimiento. Esto abarca la confiabilidad de los procesos y la confiabilidad mecánica de los equipos. Sánchez *et al.* (2006) coinciden al proponer la confiabilidad como la probabilidad de comportamiento adecuado, definido por la capacidad para satisfacer los criterios de descarga establecidos por la normativa ambiental vigente.

Por otro lado, Luna (2005) la define como la probabilidad de que dicho componente no falle durante el intervalo de tiempo previsto o a la probabilidad de que falle en un tiempo mayor que lo previsto como periodo de diseño. No obstante, el concepto de confiabilidad reúne el proceso de selección de la tecnología y diseño, ya que el efluente debe tener las características necesarias para ser vertido en un cuerpo receptor sin que éste se altere (Metcalf y Eddy, 2003).

Para von Sperling y Oliveira (2007) es la posibilidad de obtener un desempeño apropiado bajo determinadas condiciones y por un periodo de tiempo predeterminado. En una investigación en Brasil, los autores aplicaron el concepto de confiabilidad, al realizar un análisis en 166 plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en el país. Seis diferentes procesos biológicos fueron evaluados; tanque séptico + filtro anaerobio, laguna facultativa, laguna anaerobia + laguna facultativa, lodos activados, reactor UASB y reactor UASB con post-tratamiento. Sperling y Oliveira aplicaron la metodología desarrollada por Niku *et al.* (1979), la cual determina los coeficientes de confiabilidad (CDC), en términos

de porcentaje de reducción en los parámetros de DBO, DQO, SST, nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y coliformes fecales (CF).

Uno de los aspectos principales de la investigación fue generar información que pudiera ser utilizada por los diseñadores y operarios de los sistemas de tratamiento en la evaluación y predicción de sucesos. Cabe resaltar, que el estudio además de aclarar conceptos, estableció los parámetros que se deben utilizar en un análisis del desempeño. Por lo anterior, el realizar evaluaciones análogas básicamente en países con condiciones similares (características de las AR, temperatura, tecnologías, etc.) resulta indispensable conocer las experiencias obtenidas en diferentes PTARs.

2.5. Situación y perspectivas del tratamiento de aguas residuales municipales

A pesar que la Región de América Latina y el Caribe (ALyC) es considerada como una de las de mayor disponibilidad de agua en el mundo, hay varios países dentro de ella y zonas dentro de los países con carencia de agua. Esta situación en compañía del bajo nivel de los servicios públicos, la deficiente cobertura de saneamiento y el escaso tratamiento del agua residual constituyen los principales retos de la región (Cisneros, 2007).

A pesar de los progresos realizados durante las últimas décadas, casi 76 millones de personas (el 15,5% de la población) no tienen acceso a ninguna fuente de agua confiable. A esta cifra debe sumarse otro 11% (que representan 53 millones de personas) que se abastecen de agua en sistemas con riesgo significativo. En lo que respecta al saneamiento, poco más del 45% de la población estaba conectada a sistemas convencionales de alcantarillado sanitario y sólo el 14% de éstas eran tratadas, en su mayor parte con sistemas de tratamiento de baja eficiencia (OPS, 2000). No obstante, en el 2002 se alcanzó una cobertura para ALyC del 75% (WHO/UNICEF, 2004), un 49% de la población contaba con conexión al drenaje y 29% tenía otro método de disposición. En total se estima que hay 137 millones de personas sin servicio, ubicados en su mayoría en grandes ciudades de Brasil (57 millones), México (10 millones), Argentina (8 millones), Venezuela (7 millones) y Perú (7 millones).

El tratamiento de aguas residuales en promedio para ALyC es de 22% (CNA, 2006; WWF, 2006), lo que significa que la mayor parte de ellas son descargadas a los cuerpos receptores (lagos, ríos, quebradas, suelo, etc.), creando un riesgo latente para la salud. Dicha situación se presenta principalmente por la escasa cobertura de tratamiento, por inadecuados desempeños de las PTARs y por la aplicación de tecnologías desarrolladas para realidades socioeconómicas, culturales y tecnológicas de países industrializados, las cuales originan una situación insostenible por los elevados costos de operación y mantenimiento. No obstante, es difícil generalizar acerca de cualquier condición en Latinoamérica, debido a la diversidad económica, social y ambiental de la región, tanto entre país y país como dentro de una misma nación (URL – 4, 2009).

Bajo este contexto, el tratamiento de aguas residuales no ha sido prioridad para los gobiernos de Latinoamérica en las últimas décadas. Sin embargo, a medida que el desarrollo de los países de la región mejora, también ha surgido gradualmente una mayor conciencia ambiental. Los pequeños municipios y localidades rurales sufren graves problemas de contaminación del recurso hídrico como consecuencia de la poca disponibilidad de recursos de inversión y del bajo apoyo institucional.

La ubicación geográfica de los asentamientos humanos es otro factor que influye en el impacto de la contaminación producida pero también en el tipo de solución a implementar. La aplicación de algunos conceptos ambientales modernos como el tratamiento por objetivos de aguas residuales, la gestión integrada del recurso hídrico y la sostenibilidad, permiten percibir el tratamiento como algo más que una herramienta para reducir la contaminación (Peña, 2003).

De manera general, para los países en desarrollo básicamente los ubicados en regiones tropicales donde la temperatura oscila entre los 19 y 24°C, las tecnologías anaerobias han sido utilizados ampliamente para la reducción de la materia orgánica; dichas tecnologías se presentan como una opción que contribuye a la mejora en el saneamiento. El éxito en el uso de reactores anaerobios (especialmente los de tipo UASB), para el tratamiento de ARD en países tropicales y subtropicales, se debe principalmente a las pocas restricciones que se tienen para su aplicación. A pesar de las ventajas que le son inherentes, los efluentes requieren tratamiento posterior con el fin de pulir o alcanzar algunas exigencias según lo establecido en cada país (Foresti *et al.*, 2006).

2.5.1. Experiencias en el tratamiento de aguas residuales

En países como Australia aproximadamente el 12% de la población reportan el uso de tecnologías de bajo coste construyendo como solución de tratamiento de las aguas residuales tanques sépticos (Ahmed *et al.*, 2005). Este tipo de tecnología descentralizada es utilizada igualmente en países como Canadá y Grecia, en éste último, son usados además lodos activados (Tsagarakis *et al.*, 2001).

En Turquía, un 28% de población es atendida por tanques sépticos; aunque en el resto del país son aplicadas otro tipo de tecnologías (Engin y Demir, 2006). De igual manera, la literatura reporta que el tratamiento de AR en zonas residenciales de Vietnam es realizado mediante tanques sépticos y filtros anaerobios; tecnologías que a través de la experiencia práctica han demostrado ser la opción más viable (Anh *et al.*, 2002).

Autores como Bradley *et al.* (2002) reportan que en Estados Unidos, las lagunas de estabilización con plantas acuáticas constituyen el método más común y útil para el tratamiento de ARD en poblaciones pequeñas; aunque alrededor de 60 millones de personas usan sistemas de tratamiento in situ de los cuales 20 millones están constituidos por tanques sépticos.

En Latino América y el Caribe las lagunas de estabilización se presentan como una de las opciones de mayor aplicación para el tratamiento de las aguas residuales. El uso de las lagunas inició a finales de la década de los 50 y se incrementa aceleradamente en la actualidad.

Según diversos autores, han sido realizadas innumerables investigaciones sobre el uso de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo (Arthur, 1983; Mara y Cairncross, 1989; Mara *et al.*, 1992; Yáñez, 1992; León y Moscoso, 1996; Mendonça, 2000; Egocheaga y Moscoso, 2004;) y los resultados muestran claramente que pueden tratar aguas residuales logrando altas eficiencias tanto en la reducción de microorganismos patógenos como en la de compuestos orgánicos con pocos requerimientos de operación y mantenimiento.

En la Región, Cuba es considerado uno de los países con mayor número de lagunas en operación, ya que a finales de 1997 existían aproximadamente 1800 lagunas funcionando en todo el territorio. Un gran porcentaje son facultativas y trabajan como lagunas primarias, tratando casi siempre ARM (Duque, 2006).

En ALyC se poseen otras experiencias valiosas para el tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías naturales; en Lima, Perú fue construida la PTAR “SAN JUAN DE MIRAFLORES”. El principal propósito es entregar un efluente con característica de reuso; a través de la acuicultura y basándose en criterios sanitarios, socioeconómicos y de bioingeniería que permitan mejorar eficientemente este tipo de tecnología (CEPIS, 2002).

El proyecto propuso tratar previamente las aguas residuales en lagunas de estabilización hasta alcanzar la calidad apropiada para la producción de peces. Estas investigaciones demostraron la gran eficiencia de las lagunas de estabilización en la reducción de parásitos (huevos de helmintos y quistes de protozoos), virus y bacterias patógenas, incluido el *Vibrio cholerae*. Las lagunas de estabilización de San Juan son capaces de reducir los coliformes fecales hasta 5 logaritmos y obtener un efluente con niveles de 10 000 NMP/100 ml. Debido a que los estanques piscícolas trabajan en “batch” se logró reducir la concentración de coliformes fecales en un logaritmo adicional y obtener el nivel recomendado por la OMS (100 NMP/100ml) para el cultivo de peces.

El caudal de diseño de las lagunas es de $1\text{m}^3/\text{seg}$, la población servida de 3.000.000 habitantes y el periodo de diseño es de 30 años. Las eficiencias en la reducción de la DBO y la DQO son del orden de 70 al 85% y para coliformes totales (NMP/100 mL) < 5.000 y coliformes fecales < 1.000 .

Con relación a la aplicación de otro tipo de tecnología, la aplicación del reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas se ha incrementado notoriamente en América Latina (Borzacconi y López, 1994). Países como Brasil (Vieira, 1988; Van Haandel y Lettinga, 1994), México y Colombia (Schellinkhout y Collazos, 1992; Schellinkhout y Osorio, 1994) han construido reactores UASB a escala piloto y real para tratar las ARM.

La sencillez del reactor UASB y su facilidad de operación y mantenimiento hicieron que se comenzara a difundir la tecnología, aunque muchas de las primeras plantas sufrieron problemas operacionales relacionados básicamente a la inadecuada construcción y al poco entendimiento del proceso (Rodríguez, 2003). No obstante, una vez demostrada su aplicabilidad, se ha obtenido información valiosa sobre criterios de arranque, diseño y operación de reactores que tratan efluentes de diversos tipos.

De manera general, entre las tecnologías construidas en ALyC entre 1982 y 1993, un 82% corresponde a reactores de tipo UASB, 14% a filtros anaerobios y 4% a sistemas híbridos (Díaz *et al.*, 2002). Para el año de 1994 existían aproximadamente 396 reactores anaerobios, el 43% eran utilizados en el tratamiento de ARI y agroindustriales y el 57% restante para domésticas o para la digestión final de lodos provenientes de plantas aerobias. La mayoría de los reactores que trataban efluentes agroindustriales se localizan en Brasil y en menor proporción en México y Colombia, aunque su distribución se ha extendido a otros países.

Entre las PTARs construidas en la Región que poseen la tecnología anaerobia de reactor UASB se tiene la construida en Sololá, Guatemala “PTAR SAN ANTONIO”. Esta planta

fue de las primeras en construir un reactor UASB seguido de un filtro percolador y sedimentador final; los caudales medio y máximo de operación son de 10,5 L/s y 21 L/s respectivamente y la población de diseño es de 7.000 habitantes para un periodo de 15 años. En el año 2001 la PTAR reportaba eficiencias del 90% y fue la primera en comercializar la totalidad de sus subproductos; biogás, abono seco y agua tratada (Conil, 2001).

En Brasil, en la ciudad de Piracicaba en 1997 fue construida la PTAR "PIRACICAMIRIM", posee una cobertura del 100% de la población con una capacidad instalada de 500L/s. La planta posee reactores UASB y lagunas aireadas. El volumen del reactor es de 8300m³, la población de diseño es de 100.000 habitantes, el tiempo de retención es de 8h y reporta eficiencias de reducción del 60 y el 78% en la DBO y DQO respectivamente (Passig *et al.*, 2000).

Por otro lado, en Colombia, la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB, con la asesoría del Gobierno de los Países Bajos, diseñó, construyó y puso en marcha (en 1990) la PTAR de Riofrío en Bucaramanga; en su tiempo fue la más grande en el mundo con la tecnología de reactor UASB ya que fue diseñada con una capacidad inicial de 32.000 m³/día. Además de los reactores se construyeron dos lagunas facultativas de 2,7 ha como postratamiento.

Posteriormente, en 1995 fue construida una tercera unidad UASB (cada una para 80.000 habitantes), para incrementar la capacidad de la planta. El lodo generado en el tratamiento es deshidratado en lechos de secado y posteriormente es utilizado como acondicionador de suelos. Entre los problemas operacionales que se han presentado en la planta se puede citar el arrastre de sólidos suspendidos a la laguna y algunos olores molestos para la comunidad (a pesar de una buena recolección y combustión del biogás).

La PTAR es reconocida por los expertos en tratamiento de aguas residuales de la tecnología anaerobia, como la PTAR más importante en el mundo del tipo UASB, con eficiencias de reducción por encima del 80%, cuando el afluente corresponde a ARD, ya que cuando se presentan descargas continuas de residuos no domésticos como rumen, vísceras y aceites minerales los reactores bajan notoriamente su eficiencia.

En los municipios Colombianos los reactores anaerobios reportan una amplia aplicación. A partir de la primera construcción experimental en Cali (Lettinga *et al.*, 1987). Las posteriores aplicaciones se realizaron en la India, Brasil, Portugal y México (Vieira y Souza, 1986; Maaskant *et al.*, 1991; Draaijer *et al.*, 1992; Schellinkhout y Collazos, 1992; Haskoning, 1996; Monroy *et al.*, 2000). En la India, con el impulso inicial de la cooperación Holandesa se desarrolló la tecnología anaerobia al construir un reactor UASB a escala real en Kampur, el caudal de diseño fue de 1200 m³ dividido en 3 secciones de 600, 300 y 300 m³ cada una. Hoy es el sistema promovido por el estado para la descontaminación de toda la cuenca del río Ganges. Dicha cuenca es la segunda Región de aplicación masiva de la tecnología UASB después del estado de Paraná en Brasil.

Por otro lado, se calcula que en Colombia existen aproximadamente más de 80 reactores anaerobios, los cuales se utilizan para el tratamiento de ARD y efluentes de procesos industriales, agroindustriales tales como; cervecerías, levaduras, gaseosas y refrescos, papeleras, lavado de lanas, avícolas, industria de la caña de azúcar, extracción del almidón de yuca y mataderos, con eficiencias de reducción de DQO que oscilan entre 40

y 85% (Borzacconi y Viñas, 1996; Conil, 2001). La Tabla 2.20 presenta algunas de las tecnologías aplicadas en el país.

Tabla 2.20. Tipo de tecnologías construidas en los municipios Colombianos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2002)

Tipo de tecnología	Nº de municipios
Plantas compactas aerobias	6
Lodos activados	17
Filtros percoladores	6
Lagunas de estabilización	96
Filtros biológicos	18
Aireación extendida	26
Reactores ananerobios UASB	17
Otros	16

De acuerdo con la información, las lagunas de estabilización son utilizadas en mayor número que otro tipo de tecnología; la configuración es básicamente laguna anaerobia seguida de laguna facultativa. Para mayor detalle la Tabla 2.21 presentan las PTARs construidas en algunas de las principales ciudades y cabeceras municipales del país.

Aunque los esfuerzos para reducir la carga contaminante en los cuerpos de agua cada vez son mayores, Colombia enfrenta una situación poco favorable en cuanto al saneamiento y tratamiento de aguas residuales, comparada con otros países de la Región. Sin embargo, a medida que se diseñan y construyen nuevas plantas de tratamiento, surgen dudas como: ¿Cuales tecnologías o procesos deberían ser elegidos?, ¿Cuales proveen la sostenibilidad a través del tiempo? y ¿Cuáles tecnologías son acordes a la realidad del país y obtienen eficiencias satisfactorias?. Bajo este contexto, es necesario realizar investigaciones que definan las bondades y limitaciones propias de cada tecnología y las condiciones que se deben tener en cuenta para su aplicación y para mejorar los desempeños de las ya existentes.

Tabla 2.21. Plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia (URL-5, 2002)

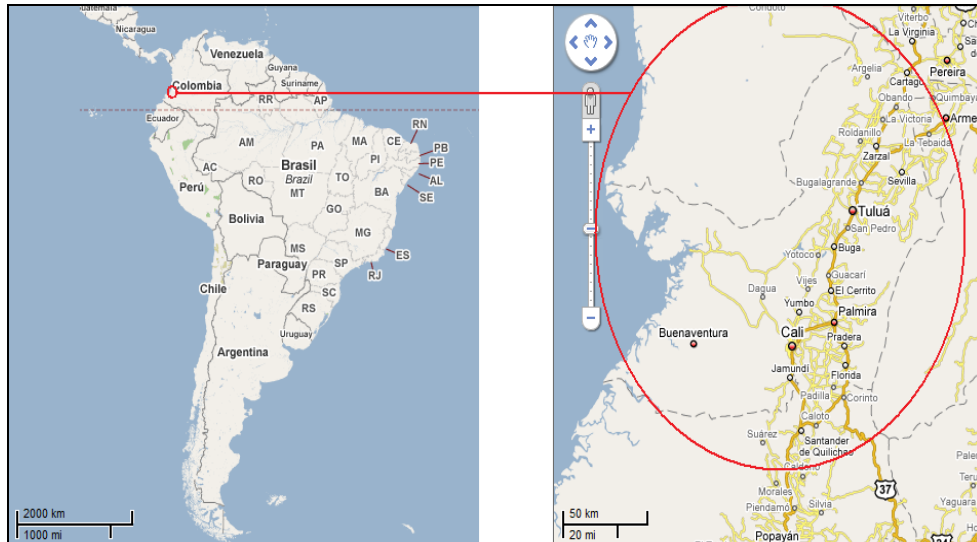
Ciudad / Municipio	Descripción (tratamiento de agua)	Descripción (tratamiento de lodo)	Caudal diseño
Medellín PTAR San Fernando	Rejillas de cribado medio, bombeo, 3 desarenadores tipo vértice, 3 decantadores primarios, 3 tanques de aireación y 4 decantadores secundarios	2 centrifugas para espesamiento, 2 digestores anaerobios para estabilización y 2 centrifugas para deshidratación	1.8 m ³ /s
Medellín PTAR El Retiro	Tanque de igualación, rejillas de cribado medio, bombeo, 2 desarenadores, tanque de aireación y 2 decantadores secundarios	Espesador y filtro prensa	22 L/s
Barranquilla PTAR el Pueblo	Rejillas, desarenador, laguna anaerobia y laguna facultativa	Lechos de secado	250 L/s
Bogotá PTAR El Salitre	Rejillas gruesas, bombeo, rejillas finas, 3 desarenadores aireados y 8 decantadores primarios	2 espesadores, 3 digestores anaerobios y 5 filtros banda	4 m ³ /s
Bogotá PTAR Facatativá	Rejilla de cribado fino, 2 desarenadores, 2 tanques de aireación (zanjones) con decantador incorporado	Espesador y Lechos de secado	180 L/s
Bogotá PTAR Madrid 1	Rejilla de cribado fino, laguna anaerobia, laguna facultativa y de maduración	Lechos de secado	70 L/s
Bucaramanga PTAR Riofrío	Rejillas de cribado grueso y fino, 3 desarenadores, 3 reactores UASB, 2 lagunas facultativas	Lechos de secado	540 L/s
Boyacá PTAR Paipa	Rejillas media y fina, desarenador, 2 trampas de grasa, tanque de igualación, 2 tamices, 2 tanques de aireación, 2 decantadores secundarios, 2 filtros de arena y desinfección	Espesador de lodos y filtro prensa	30 L/s
Cesar PTAR El Salguero	Rejillas finas, lagunas anaerobias, facultativas y de maduración	Lechos de secado	600 L/s
Cali PTAR Cañavalejo	Rejillas, tratamiento primario avanzado	Espesamiento, digestión, almacenamiento y deshidratación	7.6 m ³ /s
Cali PTAR Vivero	Rejilla, desarenador y reactor UASB	Lechos de secado	45 L/s
PTAR Ginebra	lagunas de estabilización y reactor UASB a escala real y a escala piloto humedales de flujo subsuperficial, discos biológicos rotatorios, tanque purificador japonés, tanque séptico, filtro anaerobio, filtro percolador, lagunas anaerobias de alta tasa	Lechos de secado	18 L/s

En este estudio se evaluaron las plantas de tratamiento existentes en el Departamento, teniendo en cuenta diferentes criterios como selección de tecnología, parámetros de diseño, labores de operación y mantenimiento, entre otros.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Descripción del Área del estudio

La investigación se desarrolló en las cabeceras municipales ubicadas en el Departamento del Valle del Cauca que poseían plantas de tratamiento de aguas residuales. En la Figura 3.1 se presenta la ubicación del área de estudio.



Fuente: (maps.google.com)

Figura 3.1. Ubicación área de estudio

Ubicado en Colombia, Sur América, el Valle del Cauca es una de las regiones más ricas y de mayor desarrollo de Colombia. Está situado en el suroccidente del país y tiene costa sobre el Océano Pacífico, en una extensión de 200 kilómetros, donde se encuentra el puerto de Buenaventura, catalogado el más importante de la nación por el constante movimiento de carga de importación y exportación que por allí se registra. La capital del Valle del Cauca es Santiago de Cali, ciudad considerada una de las principales del país.

3.2. Identificación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Con el propósito de levantar información general sobre los municipios donde fueron construidas las PTARs (ubicación), se visitaron las instituciones que poseían alguna relación con las plantas de tratamiento (construcción, operación, mantenimiento, etc).

En la Tabla 3.1 se muestran las diferentes instituciones visitadas.

Tabla 3.1. Instituciones visitadas y tipo de información solicitada

Instituciones	Construcción de los sistemas	Operación y mantenimiento	Control de vertimientos	Otras instituciones (web)
Firmas consultoras	X			
ACUAVALLE	X	X		
Comité de Cafeteros	X			
Alcaldías municipales		X		
CVC			X	
DANE				X
DNP				X
Ministerio de Salud				X
Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial				X

Una vez identificados los sistemas de tratamiento existentes (ubicación, número de PTARs), se realizó una descripción general de cada planta a partir de la siguiente información recopilada:

- Aspectos demográficos (población, densidades, estratificación, tasa de crecimiento)
- Estado de los servicios públicos: abastecimiento de agua, alcantarillado, recolección y disposición de residuos sólidos, energía, telecomunicaciones, coberturas, caudal de dotación de agua
- Producción de aguas residuales (caudales medios y máximos)

Reconocimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Con el fin de conocer las tecnologías, las labores de operación y mantenimiento, la calidad de los efluentes y el manejo de los subproductos, entre otros, se solicitó información adicional y de carácter específico al personal encargado del control y monitoreo de las PTARs; la información solicitada fue la siguiente:

- Orígenes del proyecto, beneficios esperados (eficiencia, exención tasa retributiva, etc.)
- Selección de la tecnología
- Planta de tratamiento (descripción)
- Actividades de mantenimiento
- Generación y manejo de subproductos
- Calidad del efluente (eficiencias)
- Características de la fuente receptora
- Papel de la autoridad ambiental en el desarrollo del proyecto

Para registrar las observaciones o detalles relevantes de las visitas se diligenciaron listas de chequeo; el formato de las listas se observan en el anexo 3.1.

De igual manera, se revisó y analizó la información disponible en manuales de operación y en los documentos análogos que describían en detalle las características de las PTARs (caudales, % de reducción, estructuras, etc.).

Evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales

En esta etapa se realizó la escogencia de las tecnologías que se sometieron a evaluación. La selección se efectuó a partir de la información disponible sobre las características de

las PTARs y de la existencia de registros históricos de operación (eficiencias de reducción de DBO₅, DQO y SST) y mantenimiento (cronogramas y actividades).

La principal limitación que se encontró en esta etapa fue el escaso número de caracterizaciones realizadas básicamente a las PTARs más recientes.

3.3. Análisis de la información existente en el órgano ambiental sobre el desempeño

Una vez recopilada y analizada la información disponible, se seleccionaron los parámetros de calidad a considerar, estos fueron seleccionados partiendo de la cantidad de datos suministrados (registro histórico de desempeño), decidiéndose que las tecnologías de lagunas de estabilización y de reactor UASB seguida de filtro percolador serían evaluadas en términos de DBO₅, DQO y SST.

La evaluación del desempeño se realizó mediante un análisis estadístico de las variables de control de la contaminación establecidas en el decreto 1594/1984 (DBO, DQO, SST), se comparó el funcionamiento de los sistemas de tratamiento con experiencias exitosas reportadas en la literatura.

Para los sistemas de tratamiento donde la existencia de registros de operación eran insuficientes para realizar un análisis estadístico, se efectuó un análisis sobre el proceso de selección de la tecnología, donde se consideraron factores tanto tecnológicos, socioeconómicos, ambientales e instituciones.

3.4. Definición de puntos críticos del diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento

Para establecer los factores críticos de las PTARs, se realizaron visitas y entrevistas complementarias, teniendo en cuenta criterios como: comportamiento de las variables fisicoquímicas de control, estado de operación y mantenimiento, generación de olores, presencia de vectores y puntos críticos o limitantes que afectaban el proceso.

Con el propósito de verificar sus afirmaciones, se tomó un registro fotográfico y fílmico de las estructuras o unidades de tratamiento; también se solicitaron los registros de parámetros de control del proceso.

3.5. Propuesta de estrategias de optimización

Mediante la revisión continua de la literatura y comparaciones del desempeño de los sistemas de tratamiento con experiencias que reportaban buenas eficiencias en iguales condiciones (temperatura, pluviosidad, brillo solar; en condiciones tropicales) y a escala real reportadas en la literatura; se propusieron estrategias de mejora u optimización para cada una de las tecnologías de tratamiento evaluadas, de manera que se garantizara una real implementación que permitiera el tratamiento eficiente de las aguas residuales. Las propuestas se realizaron teniendo como referencia los siguientes criterios:

- Desempeño en términos de eficiencia de reducción con respecto a las principales variables del control de la contaminación establecidas en el decreto 3930/2010 (DBO, DQO, SST, Temperatura y pH)
- Objetivos de tratamiento
- Criterios de selección de las tecnologías

3.6. Análisis estadístico

Los registros históricos de operación (% de reducción) fueron suministrados por la entidad encargada del control de vertimientos (CVC), estos se recopilaron y se almacenaron en hojas electrónicas de Excel.

Una vez almacenados se aplicó estadística descriptiva obteniendo análisis de medias, mediana, datos máximos y mínimos, coeficientes de variación y desviación estándar, luego se efectuó el análisis de la relación entre los diferentes parámetros (Fernández, 2005).

Los resultados se mostraron a través de gráficos de Boxplot o cajas de alambres; con el fin de observar el comportamiento de los diferentes parámetros o la variabilidad en cada uno de ellos en el tiempo. Un diagrama de caja es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. Este tipo de análisis fue efectuado para la DBO₅, DQO y SST.

Al realizar el análisis descriptivo del desempeño de las tecnologías, se planteó un supuesto; este consideraba que la tecnología de reactor UASB lograba mejores desempeños que la tecnología de Lagunas de estabilización. Para probar esta hipótesis se utilizó la prueba no paramétrica para dos poblaciones independientes de Mann-Whitney-Wilcoxon (Sprent & Smeeton, 2001); dicha prueba es equivalente a la prueba paramétrica *t*-student, la cual requiere el supuesto de normalidad en los datos. Las metodologías no paramétricas se caracterizan por no tener este tipo de supuestos, es decir son flexibles a la ausencia de normalidad. En esencia esta prueba se basa en la metodología de la suma de los rangos de Wilcoxon y consiste en unir las dos poblaciones en una sola muestra; posteriormente es ordenada de forma ascendente y se asignan los rangos (en caso de existir empates se utiliza el criterio del rango promedio). Finalmente el estadístico de la prueba es la suma de los rangos correspondientes a la muestra de menor tamaño. Esta prueba está disponible en el paquete estadístico MINITAB versión 14.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Identificación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Valle del Cauca

En esta etapa se visitaron las instituciones relacionadas con las PTARs con el fin de recopilar información general sobre las cabeceras municipales donde están ubicadas.

El tratamiento de aguas residuales en promedio para ALyC es de 22% (CNA, 2006; WWF, 2006), lo que significa que la mayor parte de ellas son descargadas a los cuerpos receptores. En Colombia el tratamiento de aguas residuales tiende a aumentar, las tecnologías anaerobias son las de mayor aplicación a partir de la primera construcción experimental en Cali, la cual dio resultados satisfactorios con relación a la reducción de la DBO y la DQO (Lettinga *et al.*, 1987). En el Departamento de los 42 municipios sólo 13 poseen PTARs, las cuales están ubicadas en las cabeceras municipales presentadas en la Figura 4.1

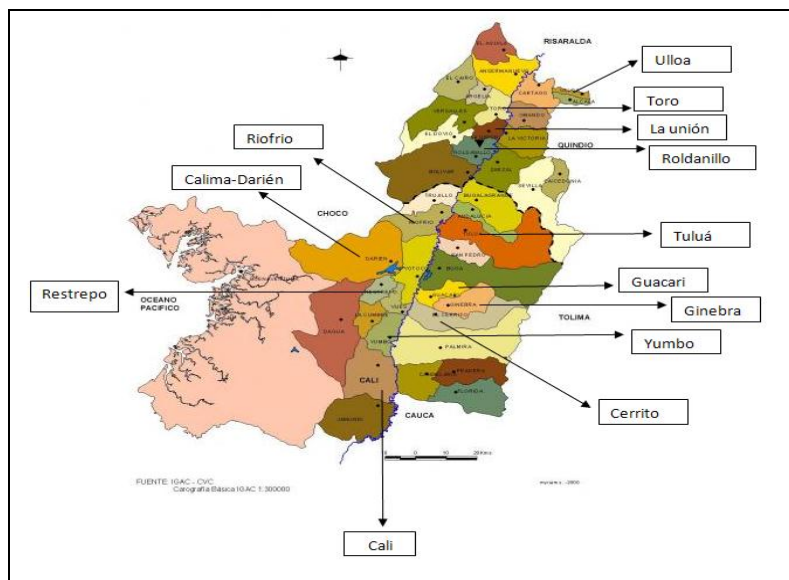


Figura 4.1. Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Valle del Cauca

La operación de las PTARs para el caso de los municipios de Toro, La Unión, Roldanillo, Guacarí, Ginebra, Cali, Restrepo, Calima - El Darién y Riofrío es normal. Las PTARs de Ulloa y Tuluá iniciaron operación recientemente, la ubicada en el municipio de El Cerrito está en proceso de arranque y la PTAR de Yumbo no opera desde el año de 1995 (fue construida en 1994). En la Tabla 4.1 se observan las tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicadas en el Departamento.

En esta etapa de identificación, se determinó que la PTAR de Cali (tratamiento primario avanzado TPA) y la del municipio de Ginebra (lagunas de estabilización y reactor UASB a escala real) no serían objeto de estudio; ya que la tecnología de tratamiento aplicada en la ciudad de Cali no es confrontable con las tecnologías implementadas en los municipios del Valle; Cali por ser una capital tiene mayor tamaño y su población es superior comparada con el resto de las cabeceras municipales del Departamento en las cuales las

poblaciones oscilan entre los 12.000 a 190.000 habitantes; de igual manera, esta diferencia se ve reflejada en los caudales a tratar. Del igual modo, la planta de tratamiento de Ginebra no se consideró en el estudio, ya que se encuentra conformada por varias tecnologías y por ser una estación experimental no refleja el comportamiento típico de una PTAR. Respecto al tipo de tecnologías adoptadas, la Tabla 4.1 presenta algunas características de las PTARs.

Tabla 4.1. Características de las plantas de tratamiento de aguas residuales

Cabecera municipal	PTAR (unidades)	Periodo de diseño (años)	Inicio del diseño (año)	Inicio de la operación	Población de diseño (hab)	Caudal de diseño (L/s)	Estado	Fuente
Ulloa	Preliminares, tanque séptico (2), Filtro anaerobio (2), lecho de secado	20	2000	2008	2416	9.55	Opera	CVC
Toro	Preliminares, laguna anaerobia, laguna facultativa, lecho de secado (4)	15	1990	1996	10.923	25.6	Opera	Acuavalle PSMV-2006
La Unión	Preliminares, laguna anaerobia, laguna facultativa, lecho de secado (4)	15	1990	1996	25.896	63	Opera	Acuavalle PSMV-2006
Roldanillo	Preliminares, laguna anaerobia, laguna facultativa, lecho de secado (4)	15	1990	1996	35.254	55	Opera	Acuavalle PSMV-2006
Guacarí	Preliminares, laguna anaerobia, laguna facultativa (2), lecho de secado (4)	15	1994	1996	19.008	56.35	Opera	Acuavalle PSMV-2006
El Cerrito	Preliminares, laguna Anaerobia de Alta Tasa (2), lagunas Facultativa Mejorada con Baffles (2), lecho de secado	20	2003	2009	50.919	90	Arranque	CVC
Restrepo	Preliminares, reactor UASB, filtro percolador, sedimentador secundario, lecho de secado	10	1995	1998	8.960	40.2	Opera	CVC
Calima - El Darién	Preliminares, reactor UASB (2), filtro percolador (2), sedimentador secundario (2), lecho de secado (2)	20	2003	2007	17.284	96	Opera	CVC
Riofrio	Preliminares, reactor UASB (2), filtro percolador (2), sedimentador secundario (2), lecho de secado (2)	20	2003	2008	11.975	43.5	Opera	CVC
Tuluá	Preliminares (desarenadores aireados, rejillas finas), filtro percolador de alta tasa (2), clarificador secundario (2), espesador de lodos, digestor primario de lodos, digestor secundario de lodos, lecho de secado (7)	20	2001	2009	185.000	321	Opera	CVC Centro Aguas
Yumbo	Preliminares, Unidad KROFTA, lecho de secado (6)	20	1993	1995	154.854	500	No opera	CVC Espy

A la hora de diseñar, un factor de relevancia es la población a servir; para el Departamento las poblaciones de diseño de las lagunas oscilan entre 10.000 y 50.000 habitantes. Se aprecia que el inicio del tratamiento de aguas residuales en el Valle es relativamente nuevo, ya que la PTAR más antigua inicio operación hace aproximadamente 20 años.

Un punto importante en los periodos de diseño de las tecnologías, lo representa el amplio tiempo transcurrido desde su diseño hasta el inicio de operación (2 a 6 años); independiente de los años de vida útil que se consideren en el diseño, estos deben ser

contados desde el inicio de la operación; sin embargo, se encuentran PTARs que después de 8 años de haber sido diseñadas inician operación. Por lo anterior, existen PTARs que sobrepasaron su vida útil o que están concluyendo el periodo para el que fueron concebidas.

Se observa que en el Departamento predomina la tecnología de lagunas de estabilización, seguida por la configuración de reactor UASB y filtro percolador; el menor porcentaje de aplicabilidad lo exhiben las tecnologías de filtro percolador (alta tasa), tratamiento primario avanzado, sistema de flotación Krofta y la configuración de tanque séptico y filtro anaerobio. En la Figura 4.2 se presentan estas tendencias en porcentajes.

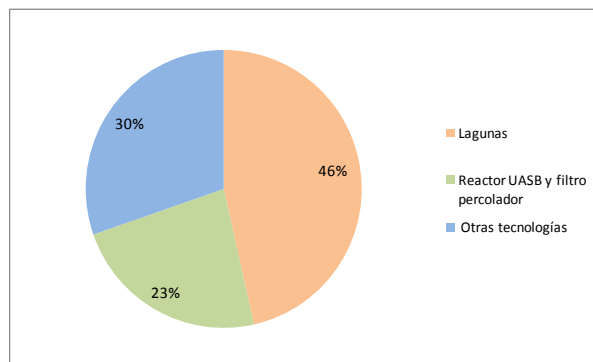


Figura 4.2. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales predominantes en el Valle del Cauca

Las lagunas de estabilización constituyen la tecnología de mayor aplicación en las cabeceras municipales del Departamento, la predominancia se puede atribuir probablemente a los bajos costos de operación (poco requerimiento de mano de obra calificada), facilidad en la operación y el mantenimiento y condiciones climáticas favorables. La amplia aplicación de las tecnologías anaerobias se debe básicamente a la existencia de condiciones ambientales propicias para el desarrollo del proceso anaerobio (temperatura estable durante todo el año y mayor a 18°C), sencillez y bajos costos operacionales y poco requerimiento de área. Cabe mencionar, que los procesos anaerobios para el tratamiento de las ARD se encuentran en un estado de madurez tecnológico, puesto que en este momento existen numerosos ejemplos exitosos de su aplicación (escala real) principalmente en zonas de clima tropical (Giraldo, 1993; van Haandel y Lettinga, 1994).

De otro lado, se tienen municipios donde las tecnologías están constituidas por procesos altamente mecanizados y compactos, que requieren el uso de químicos; donde el grado de complejidad o mecanización resultó en soluciones inviables o insostenibles. De manera general, los procesos tecnificados demandan mano de obra calificada u operación especial y de acuerdo a la realidad del Departamento y de cada municipio, las tecnologías son consideradas poco sostenibles.

La Tabla 4.2 presenta una descripción general de las cabeceras municipales que poseen PTAR en el Departamento.

Tabla 4.2. Descripción general de los municipios del Valle del Cauca con planta de tratamiento de aguas residuales

Municipio (PTAR)	Características generales	Servicios públicos domiciliarios		Fuente receptora
		Acueducto	Alcantarillado	
ULLOA	Altitud : 1350 msnm Temperatura : 21°C Extensión : 42.44 Km2 Población (2005): 12167 Hab aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es ondulado con lomas redondeadas y alargadas Ríos Principales: Barbas y Los Angeles	La planta de potabilización es de tipo convencional, con una capacidad para abastecer a 20.000 habitantes, el agua es captada (25L/s) de la quebrada San José en el municipio de Finlandia	El sistema de alcantarillado se encuentra en funcionamiento hace más de 40 años, la cobertura es del 90%, es de tipo combinado, funciona a gravedad y presenta pocos daños en su estructura	Las aguas residuales son descargadas a las quebradas El Brillante y Berlín
TORO	Altitud : 950 msnm Temperatura : 23°C Extensión : 166Km2 Población (2005): 19076 Hab aprox Características Geográficas: tiene zonas planas y montañosas Ríos Principales: Toro, Induque y San Lázaro	La planta de potabilización es de tipo convencional y funciona a gravedad. Las fuentes de abastecimiento son la Quebrada San Lázaro y la Quebrada La Grande, la capacidad de la planta es de 40L/s	Funciona como combinado aunque en un principio fue diseñado como alcantarillado sanitario. La red de recolección tiene una longitud total de 17.440,91 m. Las tuberías del alcantarillado varían entre 8 y 18 pulgadas	El canal ASORUT es la fuente receptora
LA UNION	Altitud : 975 msnm Temperatura : 23°C Extensión : 125 Km2 Población (2005): 30875 Hab aprox Características Geográficas: tiene una región plana en el valle del río cauca y otra montañosa al occidente Ríos Principales: Cauca	La planta de potabilización es de tipo convencional y funciona a gravedad, la capacidad instalada es de 100 L/s, el caudal promedio de operación es de 52.7 L/s y la red de distribución tiene una longitud total de 54.814 m. Las fuentes de abastecimiento son la Quebrada El Jordán (15L/s), La sonora (25L/s), El salto (25L/s), El rincón (40L/s) y el Embalse SARA-BRUT (50L/s)	Fue construido hace más de 40 años, se diseñó para la evacuación de aguas residuales pero funciona como combinado. Los diámetros de las redes de alcantarillado oscilan entre 8 y 30 pulgadas	El canal ASORUT es la fuente receptora
ROLDANILLO	Altitud : 950 msnm Temperatura : 23-24°C Población (2005): 36337 Hab aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es plano Ríos Principales: Cauca	Abastecido por las quebradas Cáceres y Roldanillo. La planta es de tipo convencional, con una capacidad de 110 L/s y su promedio de abastecimiento es de 85L/s, para un cubrimiento del 98%.	El alcantarillado es de tipo combinado. Existen dos colectores principales uno en concreto con una longitud de 3,5Km y otro en hormigón con una longitud de 3 Km ambos de 24 pulgadas	El canal ASORUT es la fuente receptora
GUACARI	Altitud : 966 msnm Temperatura : 23°C Extensión : 167 Km2 Población (2005): 32.554 Hab aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es plano Ríos Principales: Cauca, Guabas, Sonso y Zabaletas	Tiene un cubrimiento efectivo del 93,5%. La fuente que abastece el acueducto es el río Guabas. La planta de potabilización es de tipo convencional, con una capacidad instalada de 120 L/s, la capacidad de almacenamiento es de 80m.	Es de tipo combinado aunque fue concebido como alcantarillado sanitario, funciona por gravedad y en sus tramos más antiguos funciona hace más de 50 años. El cubrimiento es de aproximadamente un 87,9%	La acequia la Chamba constituye la fuente receptora

Continuación Tabla 4.2. Descripción general de los municipios del Valle del Cauca con planta de tratamiento de aguas residuales

Municipio (PTAR)	Características generales	Servicios públicos domiciliarios		Fuente receptora
		Acueducto	Alcantarillado	
EL CERRITO	Altitud : 987 msnm Temperatura : 24°C Extensión : 549 Km2 Población (2005): 44293 Hab aprox Características Geográficas: tiene zonas planas y montañosas Ríos Principales: Amaime, Zabaletas y Cerrito	En la cabecera municipal la cobertura del servicio de acueducto es del 100%. La planta es de tipo convencional y la fuente que la abastece es el río Cerrito	El sistema de alcantarillado es semicombinado. La cobertura del servicio es de 98% aproximadamente.	El río Zabaleta y el río Cerrito son las dos fuentes de aguas afectadas por los vertimientos de agua residual del municipio
RESTREPO	Extensión total: 237 Km2 Altitud de la cabecera municipal: 1400msnm Temperatura: 16 - 21 ° C Población (2005): 13575 Hab aprox	La cobertura es de aproximadamente 95% en la zona urbana y sólo de 11% en la zona rural, la planta es de tipo convencional y su distribución es a gravedad	El alcantarillado es combinado, la red existente esta conformada por tramos de tubería de diferentes secciones, diámetros que van desde 8 a 24 pulgadas. Alrededor del 30% de la red presenta deterioro por antigüedad; existen dos colectores, uno occidental con diámetros entre 8 y 15" y 1040,85 m de longitud y el otro entre 8 y 18" y 761,11m de longitud	La quebrada Aguamona es la fuente receptora
CALIMA - EL DARIEN	Altitud : 1485 msnm Temperatura : 18 °C – 19°C Extensión : 1154 Km2 Población (2005): 18127 Hab aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es plano Ríos Principales: Calima, Río Azul, Río Bravo Atractivos Turísticos: lago calima, museo arqueológico calima	La planta de tratamiento es convencional, la fuente que la abastece es el río Calima y distribuye por gravedad 110 L/s a la población	El sistema de alcantarillado es de tipo combinado, funciona a gravedad y presenta un cubrimiento de aproximadamente 80%	La fuente receptora de las aguas residuales del casco urbano del municipio de Darién es el Lago Calima
RIOFRIO	Altitud : 969 msnm Temperatura : 23°C Extensión : 303Km2 Población (2005): 9,234 Hab aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es montañoso Ríos Principales: Cauca, Guacas, Cáceres, Riofrío, Cuancua, Limones, Piedras y Volcanes	La planta de tratamiento es de tipo convencional, la fuente que la abastece es el río Riofrío y distribuye por gravedad a la totalidad de la población	El sistema de alcantarillado fue concebido como sanitario, construido hace mas de 30 años, aunque trabaja como alcantarillado combinado. Los diámetros de las tuberías varían entre 8 y 30 pulgadas	La fuente receptora es el río Riofrío
TULUA	Altitud : 966 msnm Temperatura : 26 – 28°C Extensión : 910.55 km2 Población (2005): 190187 Habs aprox Características Geográficas: la mayor parte del territorio es plano Ríos Principales: Tuluá y Morales	El sistema de acueducto esta integrado por dos tipos de fuentes, una superficial constituida por el río Tuluá, de la que se alimentan las plantas convencional y compacta de la Rivera, las cuales producen en promedio 823.800m3/mes. La otra fuente de agua es subterránea, esta conformada en la actualidad por 5 pozos profundos que producen en promedio 570.000 m3/mes	El sistema en su mayoría es combinado, con estructuras de separación que drenan hacia los ríos que atraviesan la ciudad, el río Tuluá y el río Morales. Cuenta con tres colectores de aguas lluvias y otros de tipo combinado	El río Tuluá es la fuente receptora
YUMBO	Altitud : 1000 msnm Temperatura : 23°C Extensión : 184 Km2 Población (2005): 77369 Hab aprox Características Geográficas: tiene una zona plana al oriente y zona montañosa al occidente Ríos Principales: Cauca y Yumbo	la Planta es de tipo convencional y abastece el 20% del casco urbano de Yumbo y el 80% restante es abastecido por las Empresas Municipales de Cali - EMCALI.	El sistema de alcantarillado se diseño como sanitario pero en su mayoría es de tipo combinado, tiene una longitud aproximada de 100 Km, posee como emisores y colectores sanitarios principales a el Colector Margen Izquierda (CMI) por el cual drena sus aguas residuales combinadas la zona tributaria del margen del Río Yumbo	La PTAR descargaba al río Yumbo y este al río Cauca, en la actualidad las aguas residuales sin tratar son vertidas al río Yumbo

De acuerdo con la información obtenida, se observa que en los municipios estudiados el número de habitantes oscila entre los 12.000 y 200.000, corroborando que la concentración poblacional se da generalmente en las cabeceras municipales. Entre los municipios con menor número de habitantes se encuentran Riofrío y Ulloa ubicados al centro y norte del Valle respectivamente. Con relación a las temperaturas reportadas, ésta varía entre 16 y 28°C.

Respecto al sistema de alcantarillado, todos funcionan a gravedad y adicionalmente, se observa que aunque estos fueron diseñados como alcantarillados sanitarios, en la actualidad todos funcionan como alcantarillados combinados situación que se considera una limitante por los aumentos del caudal a causa de las elevadas precipitaciones.

Aunado a esto, está el hecho que las redes de alcantarillado son muy antiguas; en su mayoría superan los 40 años, dicho escenario generaría problemas en caso de requerir reparación o mantenimiento ya que los materiales de construcción originales han salido del mercado. Bajo este contexto, es necesario fomentar para las nuevas urbanizaciones, la construcción y el uso de alcantarillados sanitarios, con el propósito de evitar diluciones excesivas del agua residual y el uso de paso directo en la PTAR durante las épocas de invierno.

De manera general, los cuerpos receptores de las aguas residuales tratadas son básicamente los ríos, las quebradas y canales de riego, los que a su vez son utilizados (casi en su totalidad) para el riego de cultivos ubicados aguas abajo.

El río Cauca constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo en el país, suministrando a más de 180 municipios. No obstante, éste es considerado el principal cuerpo receptor de la AR generadas por las industrias y por las comunidades asentadas en sus riberas, situación que ha limitado notablemente el uso del agua para consumo, riego y recreación (Corrales, 2003); sin embargo, con la construcción de las PTARs la carga contaminante ha disminuido considerablemente.

Análisis de la selección de tecnologías

La adopción de un sistema inapropiado o insostenible entre otras cosas puede generar la pérdida de recursos y el disgusto de la comunidad. Por lo anterior, la selección de la tecnología es considerada una de las decisiones más importantes cuando se planifica un proyecto de saneamiento. Bajo este contexto, la sostenibilidad en el tiempo de una PTAR o tecnología, depende en gran parte del éxito obtenido en esta etapa; de manera general la selección considera factores tecnológicos, socioeconómicos, ambientales e instituciones.

Las dos entidades que aprueban y/o seleccionan las tecnologías a implementar en el Departamento son Acuavalle y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Acuavalle provee los servicios de acueducto y alcantarillado a más de 500.000 habitantes en 33 municipios del Departamento y la CVC ejerce la autoridad ambiental y promueve el desarrollo sostenible desde la dimensión ambiental.

La Tabla 4.3 presenta los criterios que se tuvieron en cuenta en la selección de las tecnologías para el tratamiento de AR.

Tabla 4.3. Criterios de selección de tecnologías

PTAR	CRITERIO DE SELECCIÓN DE LA TECNOLOGIA
ULLOA	Se analizaron 4 alternativas y se eligió la que cumplió ciertas condiciones como simplicidad, bajo requerimiento de área, bajos costos de operación y mantenimiento , entre otras
TORO	
LA UNION	La tecnología adoptada por la empresa ACUAVALLE fue Laguna de estabilización, su escogencia se basó en la experiencia exitosa reportada por la planta del municipio de Ginebra, en cuanto a eficiencias de reducción de la DBO, DQO y SST; además de la disponibilidad de área y bajo requerimiento de mano de obra calificada dado la facilidad de operación y mantenimiento
ROLDANILLO	
GUACARI	
EL CERRITO	Fue escogida basándose en que las características del AR tratada debía ser apta para el riego de cultivos, ya que la economía del municipio depende en gran medida de esta actividad (cultivo de caña de azúcar). Es por esto, que se pensó en esta tecnología con el fin de reducir la concentración de microorganismos patógenos y el riesgo de exposición tanto al agricultor como al consumidor
RESTREPO	La tecnología adoptada fue la más favorable tanto técnica como económicamente, además de requerir poca área para su construcción y de reportar buenas eficiencias según estudios previos en iguales condiciones
CALIMA - EL DARIEN	La tecnología adoptada por la entidad reguladora (CVC) se escogio principalmente por los buenos desempeños reportados por la PTAR del municipio de Restrepo, relacionados con las buenas eficiencia obtenidas, su bajo requerimiento de área para su construcción y otras bondades del sistema
RIOFRIO	
TULUA	Fue escogida básicamente por requerir mínimos costos de operación y mantenimiento, por tener baja generación de olores, facilidad de mantenimiento y simplicidad, entre otras
YUMBO	La tecnología adoptada para tratar las aguas residuales del municipio, fue escogida por que reportaba buenos desempeños, en lugares con iguales condiciones ambientales (tropicales)

De acuerdo a la Tabla los criterios más importantes que poseen las entidades encargadas de seleccionar, aprobar, construir, controlar y mantener las PTARs son los siguientes: tecnologías que reporten buenos desempeños en términos de eficiencias de reducción de la DBO, DQO y SST; favorables tanto técnica y económicamente; fáciles de mantener y operar, con baja generación de olores; sistemas compactos con poca generación de lodo y experiencias exitosas reportadas por las tecnologías en iguales condiciones.

En el contexto nacional, se observa que las tecnologías aerobias son utilizadas principalmente en los centros urbanos donde existen limitaciones de espacio y el costo de la tierra es mayor. En ciudades intermedias y pequeñas localidades tanto urbanas como rurales, la tendencia es utilizar tecnologías no convencionales (Peña, 2002), como los sistemas naturales (lagunas de estabilización y humedales) y una amplia variedad de tecnologías anaerobias (tanques sépticos, filtros anaerobios y reactores UASB).

A continuación se presenta un análisis de la selección de cada tecnología aplicada en el Valle del Cauca.

Tanque séptico seguido de filtro anaerobio

Esta tecnología, además de ser sencilla, fácil de operar y mantener a un bajo costo, cuenta con un alto grado de aceptación por las entidades de control ambiental, principalmente para sectores de población pequeña y dispersa, donde la mayoría de las veces no existen recursos para construir alcantarillados y sistemas de tratamiento convencionales (Cubillos *et*

al., 2003). Como limitante a la hora de seleccionar la tecnología, se tiene la baja eficiencia que presenta para reducir algunos constituyentes del AR. Por otro lado, aunque los tanques sépticos están diseñados para funcionar indefinidamente cuando son realizadas correctamente las actividades de mantenimiento; la mayoría de las PTARs conformadas por esta tecnología no recibe dicha atención, ocasionando una vida útil menor a 20 años (EPA, 1999).

La tecnología fue construida en el municipio con menor número de habitantes del Departamento (2416 habitantes aproximadamente) y fue seleccionada básicamente por obtener buenas eficiencias de reducción en los parámetros de control prioritario cuando es operada y mantenida adecuadamente y por ser una solución viable para municipios de menor tamaño. Al contrastar los criterios de selección con lo expuesto por EPA (2000), la selección es considerada adecuada.

Lagunas de estabilización

Acorde con la literatura, las tecnologías naturales se presentan como una opción sostenible para las pequeñas y medianas comunidades, debido a su buen desempeño, bajos costos de operación y mantenimiento y fácil construcción. Su selección dependerá de la disponibilidad y características del terreno, de las condiciones climáticas (Bernal *et al.*, 2003) y de los objetivos finales de tratamiento, en este caso de las posibilidades del reuso (Helmer y Español, 1997), lo cual no sólo representa una fuente de agua, sino una fuente de nutrientes (P y N) con beneficios económicos y ambientales.

Con relación a las limitaciones de la tecnología, la principal desventaja corresponde al área requerida para su construcción. Generalmente, en climas tropicales-subtropicales, se puede estimar que se necesitaría entre 2.0 a 2.5 hectáreas para servir a una población de 10.000 habitantes (Carranza, 1997; Mara y Pearson, 1998). Su aplicabilidad ha sido demostrada en América Latina y el Caribe, principalmente en el tratamiento de aguas residuales de origen municipal e industrial, especialmente en sectores donde existe terreno a un costo razonable y prevalecen condiciones ambientales propias de clima tropical (Sánchez *et al.*, 1998; Sánchez *et al.*, 2006).

La selección de la tecnología de lagunas de estabilización en los municipios del Valle, se debió principalmente a la experiencia exitosa con relación a los buenos desempeños obtenidos por la PTAR del municipio de Ginebra, la cual funciona desde el año de 1993, posee una capacidad de tratamiento de 75 L/s y trata las aguas residuales de la cabecera municipal y de las veredas Villa Vanegas y La Cruz. La planta posee rejillas y desarenador como estructuras de tratamiento preliminar y lagunas de estabilización (anaerobia, facultativa y de maduración).

Desde sus inicios y en la actualidad, dicha PTAR ha reportado buenas eficiencias de reducción de la DBO, DQO y SST. Otra razón por la cual fue considerada como solución, es la facilidad de operación y mantenimiento que presenta la tecnología. Cabe resaltar, que la experiencia obtenida en su construcción (parámetros de diseño), operación y mantenimiento sirvieron de soporte para la construcción de las posteriores plantas. De igual manera, a través de la experiencia, fue establecido el manual de operación y mantenimiento (actividades rutinarias) de las posteriores lagunas construidas en el Departamento.

Entre los factores ambientales que se deben tener en cuenta para la selección de la tecnología, la intensidad de la luz solar es considerada un aspecto importante, principalmente en aquellos procesos donde se precisa de la ocurrencia de la fotosíntesis. Esta es una razón por la que se podría considerar adecuada su selección en el Valle del Cauca, ya que las PTARs fueron construidas en sitios con elevada radiación solar y baja

nubosidad, propicio para procesos donde la degradación es realizada por métodos naturales (Sobalvarro y Batista, 1997).

Del mismo modo, la temperatura es un parámetro determinante a la hora de seleccionar las lagunas como tecnología de tratamiento, ya que si bien, altas temperaturas disminuirán el tiempo de retención y por consiguiente el volumen, requiriendo así un área menor. Acorde a lo establecido, las lagunas fueron construidas en sitios de características ambientales óptimas para la ocurrencia de los procesos.

Para el caso particular del municipio de El Cerrito, el diseño de las lagunas fue modificado con el propósito de favorecer el flujo pistón y minimizar la ocurrencia de zonas muertas y cortos circuitos; de manera general, las lagunas anaerobias se diseñaron de alta tasa y las lagunas facultativas fueron mejoradas con baffles. Según diversos autores, la configuración obtiene buenas eficiencias cuando se pretende reutilizar el agua para el riego de cultivos (Shilton y Harrison, 2003).

Por otro lado, aunque el municipio donde fue construida presenta una capacidad económica baja o media la tecnología adoptada se considera aceptable; ya que si bien, su sostenimiento requiere únicamente un operador capacitado (actividades de operación y mantenimiento) y en eventualidades el acompañamiento de un ingeniero.

Reactor UASB seguido de filtro percolador

La selección de esta tecnología se debió principalmente a la experiencia exitosa (porcentajes de reducción por encima del 80%) reportada por la PTAR del municipio de Restrepo, relacionada con el buen desempeño respecto a las eficiencias obtenidas, además del poco requerimiento de área para su construcción y otras bondades como bajos consumos energéticos.

Al comparar las razones de selección con los criterios reportados en la literatura, la tecnología anaerobia del reactor UASB, evidentemente tiene ventajas en cuanto a su bajo requerimiento de área (sistema compacto) y ausencia de equipos electromecánicos (exceptuando un eventual bombeo inicial), lo cual conlleva a bajos o nulos costos de electricidad y bajos costos de operación y mantenimiento en general. Adicionalmente, el proceso genera tres subproductos valiosos; como lodo estabilizado con potencial de mejorador de suelos, biogás y un efluente tratado rico en nutrientes (Rodríguez, 2003).

De acuerdo con los objetivos de tratamiento, la tecnología reporta buenos desempeños con eficiencias que oscilan entre el 80 y el 90% en la reducción de la DBO y SST (van Haandel y Lettinga, 1994). No obstante, las eficiencias dependen entre otros, de la adecuada realización de las actividades de operación y mantenimiento, así como de factores ambientales que favorecen el desarrollo de los procesos anaerobios, como la temperatura. Rodríguez (2003), reporta que temperaturas entre los 30 a 40°C presentan tasas máximas de digestión anaerobia; sin embargo, esta es posible a temperaturas bajas (10°C), aunque la eficiencia y tasa de digestión disminuyen significativamente, implicando mayores tiempos de retención. De acuerdo a esto, su aplicación en los municipios del Departamento es ventajosa y atractiva por que se poseen temperaturas típicas de climas tropical y subtropical (mayor a los 22°C).

Otro factor ambiental a tener en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología y su ubicación es el régimen de vientos, debido a que los procesos anaerobios son susceptibles a la producción de olores (CH_4 y H_2S); razón por la cual se recomienda cubrir adecuadamente las unidades de tratamiento y ubicarlas en lugares donde las corrientes de vientos no

afecten a la comunidad. Conforme a las recomendaciones, el análisis de la selección de la tecnología indica que la PTARs fueron construidas a más de 500 metros de la población y en dirección contraria a los vientos predominantes.

Respecto al tipo o características de las aguas residuales que pueden ser tratadas por esta tecnología, la literatura reporta que los reactores anaerobios presentan mayores eficiencias cuando tratan aguas residuales concentradas; sin embargo, se ha demostrado su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales diluidas, como es el caso de las aguas residuales domesticas que se tratan en las PTARs estudiadas.

A pesar de que las comunidades donde se ha construido esta tecnología pueden catalogarse como de baja o media capacidad adquisitiva, se considera que la capacidad de pago para su sostenimiento es aceptable; por ser una tecnología que demanda poca área para su construcción, con consumos de electricidad nulos o bajos y para las actividades de operación y mantenimiento, sólo se requiere un operador de turno (capacitado) y en eventualidades, el acompañamiento de un ingeniero.

Otras tecnologías

Otra tecnología escogida y construida en el Valle es el filtro percolador de alta tasa; los criterios de selección tenidos en cuenta por la empresa encargada fueron los siguientes (CENTROAGUAS S.A. E.S.P, 2008): cumplimiento de la legislación ambiental vigente; mínimo costo de inversión (equipos, construcción); mínimo costo de operación y mantenimiento (manejo de subproductos); poca generación de olores; seguridad laboral; facilidad de mantenimiento y bajos impactos ambientales (bajos consumos de energía, poco ruido).

La planta inició operación en el año de 2009 y fue diseñada para tratar un caudal de 660 L/s, aunque en la actualidad trata 350 L/s. La PTAR esta compuesta por reja gruesa; pozo de bombeo, desarenadores aireados; rejilla fina; filtro percolador de alta tasa; espesador de lodos; digestor de lodos; clarificador secundario y lechos de secado (7).

Las condiciones ambientales (temperatura, precipitaciones, vientos, etc.) del sitio donde fue construida la PTAR, son aptas para la adopción de una tecnología que combine procesos aerobio y anaerobios. No obstante, haciendo referencia al volumen de tratamiento y a las dimensiones de las unidades que conforman la PTAR, para el caudal de aguas residuales producido por aproximadamente 185.000 habitantes (población de diseño), se conoce que demanda construcciones de gran tamaño y en este caso de gran peso (filtro percolador de alta tasa), siendo importante en estas obras, tener en cuenta las características del terreno como la topografía, permeabilidad y nivel freático.

De acuerdo a lo anterior, en la PTAR se evidencia el hundimiento de las estructuras; ya que además de estar construida en terreno poco resistente (ribera de río), las unidades son muy pesadas. Situación que conlleva a establecer que la selección no tuvo en cuenta las propiedades mecánicas del suelo en el sitio de ubicación. Para Sobalvarro y Batista (1997), la resistencia del suelo es fundamental en estos tipos de tratamiento, ya que las estructuras construidas son demasiado pesadas.

Por otro lado, en el manual de operación se refleja el alto nivel tecnológico de la PTAR, ya que si bien, existen zonas consideradas de procedimiento exclusivo donde se requiere operación especial y se tiene acceso restringido, dicha situación permite suponer que para la realidad del municipio donde la economía está representada principalmente por la agricultura y el comercio; la capacidad de pago de la población podría ser baja para sostener un sistema con tal grado de complejidad. En este contexto y de acuerdo con

Noyola (2003), el grado de complejidad o mecanización de las tecnologías, podrían resultar en soluciones inviables o inapropiadas, puesto que procesos tecnificados demandan mano de obra calificada u operación especial.

Otra tecnología seleccionada para tratar las aguas residuales en uno de los municipios del Valle es la unidad KROFTA. La planta fue diseñada por la empresa Suiza Krofta y arrancó en el año de 1995; sin embargo, al poco tiempo de entrar en operación dejó de funcionar. El tratamiento llevado a cabo en la unidad consistía en la adición de un coagulante (FeCl_3) que promovía la desestabilización de las partículas y como consecuencia la formación de flocs. Posteriormente, mediante la adición de aire se producían pequeñas burbujas con un diámetro de 30 micrones; a las cuales se adherían flocs, sólidos finos, materia en suspensión, bacterias, grasas, etc.

En cuanto al criterio de selección para la aplicación de la tecnología, la firma encargada de su construcción y aval en la selección, expresó que fueron tenidas en cuenta las experiencias satisfactorias reportadas en otros países con iguales condiciones ambientales (tropicales), en términos de eficiencias de reducción de la DBO, DQO y SST. Sin embargo, la PTAR presentó inadecuada adaptación al medio y baja capacidad económica para su sostenimiento y manejo, conduciéndola finalmente al cese de operación. Dicha situación se atribuye entre otros factores, a la escasa adaptación de las tecnologías importadas, además la tecnología es considerada compleja por que demanda además grandes inversiones (Noyola, 2003).

De manera general, se puede decir que no existe una solución que cumpla integralmente, con todos los requisitos que deben ser tenidos en cuenta para satisfacer el requerimiento de sistemas de tratamientos simples y adecuados para la realidad local. Noyola (2003), considera que el mejor tren de tratamiento será el que represente menores costos (construcción, operación y mantenimiento), sea menos complejo y entregue efluentes con la calidad esperada para su descarga o reuso.

Por otro lado, de acuerdo a la literatura la sostenibilidad de la mayoría de las PTARs parece adecuada por el momento. Se cuenta con un relativo apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad y poseen además aceptación por el público. Sin embargo, se evidencian problemas inherentes a inadecuadas selecciones, donde se obviaron factores determinantes como adaptación a la realidad del municipio, facilidad de operación y mantenimiento, condiciones ambientales, entre otras.

Stewart (2005), expone que las entidades encargadas de la selección lograrán una tecnología sostenible cuando: son capacitados los operarios, ingenieros municipales y responsables del monitoreo; se desarrollan planes de limpieza de lodos que incluyen financiamiento del trabajo; se realizan planes de expansión (compartimentación o modulación) y son desarrollados planes de tarifas que cubran costos de operación (incluyendo la remoción y disposición final de lodos).

De acuerdo con los autores estudiados, los criterios de selección comunes para la mayoría de las tecnologías pueden ser clasificados dentro de los siguientes factores: objetivos de tratamiento, aspectos tecnológicos, costos, operación y mantenimiento, características del agua residual, factores demográficos y socioculturales, características del terreno, factores climáticos, capacidad y disponibilidad de pago (Galvis *et al.*, 2005). Por otro lado, es imperante el desarrollo e implementación de sistemas administrativos, financieros y tecnológicos que realmente correspondan a las necesidades y limitaciones de la realidad de los países de América latina y en este caso del Departamento. Por lo tanto, el diseño de las PTARs en países en desarrollo no debe ser similar al diseño de los países industrializados, ya que los últimos hacen especial énfasis en la reducción de la materia orgánica (DBO, SST, etc.) y de nutrientes (N, P), mientras que en los países de América Latina los diseños se

enfocan fundamentalmente en la reducción de la materia orgánica y patógenos, conservando los nutrientes para realizar el reuso de los efluentes (Stewart, 2005). Es por esto que los procedimientos de diseño de los países industrializados no se consideran adecuados para otro tipo de realidades, entre las que se podría citar la demanda de agua para riego y las enfermedades transmitidas por las AR (patógenos) las cuales se encuentran como las principales causas de mortalidad y morbilidad en América latina.

4.2. Análisis del diseño, construcción y operación

En esta etapa se realizó la revisión de la información disponible sobre las características de las PTARs (parámetros de diseño, unidades de tratamiento), la existencia de registros históricos de operación (% de reducción de DBO₅, DQO y SST) y mantenimiento (cronogramas y actividades). No obstante, una vez realizada la identificación de las PTARs, se encontró que existía escasa información acerca de los desempeños, los cuales limitaban considerablemente su análisis; debido a esto sólo fueron escogidas las tecnologías que poseían la información requerida, como las lagunas de estabilización y la configuración de reactor UASB seguida de filtro percolador, además de ser las tecnologías mayormente aplicadas en el Departamento con porcentajes de 46 y 23% respectivamente.

4.2.1. Lagunas de estabilización

Diseño y construcción

Los municipios de Toro, La unión, Roldanillo, Guacarí y El Cerrito, como solución para el tratamiento de las aguas residuales seleccionaron y construyeron la tecnología de lagunas de estabilización; la configuración utilizada consiste en lagunas operando en serie, específicamente laguna anaerobia seguida de laguna facultativa. Para el caso particular del municipio de El Cerrito, la configuración corresponde a lagunas anaerobias de alta tasa seguidas por lagunas facultativas mejoradas con baffles.

Los terrenos seleccionados para la construcción de las lagunas están ubicados a una distancia de la población mayor a 500m, la topografía es plana y el funcionamiento hidráulico del proceso es a gravedad (exceptuado un bombeo inicial en El Cerrito). Con relación a la permeabilidad del suelo, la mayoría fueron impermeabilizadas con arcilla compactada y sólo una laguna facultativa con membrana sintética (municipio de Toro).

Las rejillas instaladas en las lagunas estudiadas son de hierro y no poseen plataformas de drenaje; aunque autores como Mendonça (2000) y Stewart (2005), recomienden instalarlas en materiales resistentes a la corrosión; como el acero inoxidable y el aluminio. Sin embargo, en las PTARs evaluadas la carencia de la plataforma no ha representado inconvenientes. Las rejillas poseen anchos y aberturas entre las barras de aproximadamente 10mm y 40mm respectivamente, criterios de diseño que coinciden con las recomendaciones de la literatura. No obstante, la mayoría de las rejillas se encuentran deterioradas y rotas, situación que se ve agravada cuando la limpieza no es realizada de manera continua durante el día, ocasionando el paso de material suspendido y con ello problemas operacionales en las lagunas como formación de natas, malos olores y disminución del volumen útil, entre otros.

Posterior a las rejillas se encuentran los desarenadores contruidos en concreto. Con relación a los parámetros de diseño se puede decir que son acordes a los establecidos por diversos autores, los tiempos de retención están entre los 45 y 60s, las longitudes entre 12 y 18m y las velocidades horizontales máximas alcanzadas son de aproximadamente 0.3 m/s, cabe resaltar que velocidades menores podrían generar problemas asociados con la

sedimentación de la materia orgánica (olores, roedores, etc.); mientras que velocidades mayores no permitirían la sedimentación de las arenas (Marais y van Haandel, 1996; Reynolds y Richards, 1996; Mendonça, 2000). En la Fotografía 4.1 se presentan los desarenadores.



Fotografía 4.1. Desarenadores de las lagunas de estabilización evaluadas

Como factor de cuidado, en ninguna de las lagunas evaluadas (exceptuando la ubicada en el municipio de El Cerrito) existen compuertas de sellado, dificultando las labores de mantenimiento. Estos problemas se producen en parte por la falta o poca supervisión en la construcción.

Dentro del diseño de la PTAR se debe incluir un área destinada para la manipulación y si es posible para la disposición de los sólidos arenosos y gruesos provenientes del tratamiento preliminar; lo anterior con el propósito de disminuir el riesgo por exposición, además de mitigar los olores y conservar el apariencia del área (estética). En las PTARs evaluadas existe la recolección frecuente (dos veces por semana) de los residuos sólidos por parte de los carros recolectores del municipio y adicionalmente, acorde con las recomendaciones, las plantas también poseen espacio para su disposición.

Cabe resaltar que en la tecnología de lagunas no fueron construidas trampas de grasas; esta unidad no fue considerada a la hora de diseñar, ya que las grasas y los aceites transportados en el agua residual favorecen la formación de una película en la superficie de la laguna anaerobia y con ello el proceso llevado a cabo en la misma.

En cuanto a la medición de caudales, ésta es fundamental para determinar la carga hidráulica y orgánica en el proceso. Un registro de caudales permite la evaluación de la eficiencia del tratamiento, la determinación de las infiltraciones y un cálculo aproximado de cuándo la PTAR llegará a su capacidad máxima de tratamiento. De acuerdo con las observaciones realizadas, se encontró que la canaleta Parshall es el medidor utilizado en la totalidad de las PTARs; en la mayoría de los casos sus bordes son irregulares y presentan problemas de calibración, además las regletas de lectura se hallan en mal estado de conservación (lo que no permite determinar el nivel de agua ni su respectivo valor de caudal) o no existen. Por lo tanto, en ninguna planta son llevados registros de caudal. Aunque diversos autores recomiendan la canaleta Parshall prefabricada como el medidor más apropiado (Yáñez, 2000; Stewart, 2005) la experiencia muestra que no son las más adecuadas para ser utilizadas en la medición de caudales de aguas residuales, ya que presentan problemas de calibración, los cuales están asociados básicamente con la construcción y fallas operacionales por la acumulación de sólidos en el fondo. En la

Fotografía 4.2 se presentan las canaletas y algunos problemas relacionados a su construcción y mantenimiento.



Fotografía 4.2. Medidor de caudal tipo canaleta Parshall con problemas de construcción

Respecto a los canales de desvío, en algunas de las plantas evaluadas no existen o su funcionamiento no es el adecuado ya sea por falta de mantenimiento o por mal diseño; su construcción es importante, ya que en temporadas de lluvia intensa, se pueden afectar los procesos biológicos por el aumento de la carga hidráulica y la disminución del tiempo de retención. De igual manera, se disminuye el volumen útil de la laguna por la entrada de aguas lluvias con gran cantidad de sedimentos producto del escurrimiento superficial (INAA, 1996).

Por otro lado, las estructuras de entrada y salida de las lagunas (anaerobias y facultativas) se presentan como uno de los puntos críticos más relevantes hallados en la tecnología (obviando la PTAR de El Cerrito), ya que las entradas fueron situadas de frente con relación a las salidas, ubicación que propicia la formación de zonas muertas (con la posible generación de olores en las áreas sobrecargadas) generalmente en las esquinas de las lagunas y como resultado de la presencia de cortos circuitos, disminución del volumen útil y de las eficiencias de reducción. Además; las salidas fueron construidas en concreto con vertederos no ajustables en acrílico y/o asbesto cemento sin la posibilidad de controlar el nivel del agua (Arceivala, 1981; CETESB, 1989; Mendonça, 2000). En la Fotografía 4.3 se observan las entradas y las salidas.

Diversos autores establecen que las estructuras de entrada y salida deben contar con canales que faciliten el mantenimiento y que estén debidamente cubiertos, así mismo, el agua en el canal de entrada debe estar al mismo nivel que en la laguna para mitigar la turbulencia; cabe resaltar que sólo esta última recomendación fue tenida en cuenta en las lagunas evaluadas. Para autores como Yáñez (1992), Mara *et al.* (1996), Mendonça (2000) y Stewart (2005), cada salida debe contar con una compuerta de fondo ajustable seguido por un vertedero rectangular ajustable también con compuertas. La compuerta de fondo sirve para prevenir la salida de nata flotante y para controlar la profundidad de la descarga; no obstante, los vertederos de salida de las lagunas estudiadas no ofrecen esta posibilidad por no ser graduables. Finalmente, su ubicación con relación a la dirección de los vientos no es adecuada puesto que se notó gran cantidad de sobrenadantes. La Fotografía 4.4 presenta las natas o sobrenadantes.



Fotografía 4.3. Entradas y salidas de las lagunas de estabilización



Fotografía 4.4. Sobrenadantes o natas en las lagunas facultativas

En el caso de las lagunas anaerobias de alta tasa (dos) y las mejoradas con baffles (dos), las estructuras de entrada y salida obedecen a las recomendaciones expuestas en la literatura; en la laguna facultativa se instalaron baffles para favorecer el flujo pistón y minimizar la ocurrencia de zonas muertas y cortos circuitos. Cada entrada y salida cuenta con canales abiertos y la entrada fue construida al mismo nivel de agua de la laguna, para disminuir la generación de turbulencias. La Fotografía 4.5 enseña los baffles y las entradas y salidas de las lagunas.



Fotografía 4.5. Entradas y salidas de la laguna anaerobia de alta tasa y la facultativa mejorada con baffles

Con relación a la salida en una de las lagunas facultativas evaluadas, se encontró que el efluente tiende a devolverse, situación que se presenta básicamente por los ángulos (90°) que posee la tubería de descarga al cuerpo receptor, ángulos que además de propiciar la sedimentación del material suspendido (choque de AR con la tubería), causa represamiento, retorno del agua residual tratada y finalmente aumento del nivel del agua en la laguna y disminución del tiempo de retención. En la Fotografía 4.6 se observa el nivel de agua de la laguna.



Fotografía 46. Salida con inadecuado diseño

Por otro lado, en ninguna de las lagunas fueron construidas rampas de acceso en sus laderas; la importancia de su construcción radica en la facilidad y practicidad para efectuar las labores de remoción de lodos, al permitir el acceso de camiones y maquinaria para el mantenimiento. Las rampas de acceso deben ser preferiblemente pavimentadas en concreto para que la maquinaria tenga tracción al bajar y subir sin dañar la impermeabilización y taludes de la laguna (Stewart, 2005).

De manera general, todas las tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales requieren una caseta de operación. El propósito de su construcción es contar con un sitio para depositar herramientas, equipos básicos de laboratorio, botiquín de primeros auxilios, baño con ducha y vestidores. Esta debe estar provista de agua potable, un teléfono y preferiblemente una fuente de electricidad para encender las luces en la noche; aunque como se expuso con anterioridad ninguna PTAR evaluada (excepto El Cerrito y Roldanillo) ofrece dicha facilidad al personal. De igual manera, los operarios no poseen los implementos de seguridad necesarios (guantes, botas, gafas, etc.) y como agravante, no hay evidencia de que hayan sido vacunados.

Otro punto crítico con relación al diseño hallado en la mayoría de las lagunas, es la ausencia de cercas que limiten el paso de animales y personas no autorizadas. El área que comprende la instalación de las lagunas debe estar cerrada preferiblemente con alambre de púas, con el propósito de prevenir la entrada de animales que pueden dañar los taludes y servir como focos infecciosos. En las lagunas estudiadas se encontraron animales al interior de las instalaciones. En la Fotografía 4.7 se observan.



Fotografía 4.7. Caballos en las instalaciones de las lagunas de estabilización

Se encontraron además taludes sin revestir (obviando Guacarí, Roldanillo), la ausencia de revestimiento favorece el crecimiento de plantas, la aparición de erosión a causa de las olas generadas por el viento y como agravante, el material erosionado y podado es arrastrado a la laguna por la lluvia o el viento, aportando sólidos y material orgánico (DBO). La Fotografía 4.8 presenta las lagunas sin revestimiento en los taludes y el material podado en su interior.



Fotografía 4.8. Lagunas sin taludes revestidos

Con relación al punto de descarga al cuerpo receptor, en la totalidad de las lagunas evaluadas se observó la presencia de espumas, las que aparecen principalmente por la presencia de agentes surfactantes característicos de las aguas residuales municipales y por la turbulencia ejercida por la caída del efluente; aunque la espuma no es considerada un precursor de contaminación, genera confusión en la comunidad relacionada principalmente con su aspecto (estético). Para Stewart (2005), cuando se pretende reutilizar el efluente para el riego de cultivos la producción de espuma debe ser controlada; sin embargo, en las PTARs estudiadas no se realiza ningún tipo de control. En la Fotografía 4.9 se observa la presencia de espuma en el canal de entrega y en el cuerpo receptor.



Fotografía 4.9. Espuma en la salida de las lagunas facultativas y en el cuerpo receptor

De manera general, existe una falla significativa en la supervisión de la construcción de las PTARs, las obras deben ser acorde con los diseños; se presume que en la mayoría de los casos los inconvenientes de este tipo obedecen a las condiciones del terreno (nivel, ondulaciones, tipo de suelo). Con relación a las dimensiones de las lagunas de estabilización, es presentada la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Dimensiones de las lagunas de estabilización

DIMENSIONES	LAGUNAS DE ESTABILIZACION				
	TORO	LA UNION	ROLDANILLO	GUACARI	EL CERRITO
Caudal de diseño (L/s)	25,6	63	55	56,35	90
LAGUNA ANAEROBIA					
Volumen (m3)	4468	5424	7621	7803	
Profundidad (m)	3,45	3,5	3,5	3,5	
Area superficial (m2)	1628,12	1980,25	2525,25	2230	
Largo (m)	40,35	44,5	55,5	49	
Ancho (m)	40,35	44,5	45,5	45,51	
Relación largo/ancho	1	1	1,2	1,08	
Profundidad zona de mezcla (m)					4,5
Ancho zona de mezcla (m)					29,2
Largo zona de mezcla (m)					14,5
Profundidad zona de sedimentación (m)					1,3
Ancho zona de sedimentación (m)					29,2
Largo zona de sedimentación (m)					30
Borde libre (m)	0,2	0,2	0,2	0,6	
Talud interior	1 = 1,5	1 = 1,5	1 = 1,5	1 = 2,0	
LAGUNA FACULTATIVA					
Volumen (m3)	5539	13594	11863,8	6557,25	4937,4
Profundidad (m)	1,5	1,5	1,5	1,6	2,05
Area superficial (m2)	3761,5	9096,3	6272	4545	2816,8
Largo (m)	86,73	134,8	112	101	63,3
Ancho (m)	43,37	67,48	56	45	44,5
Relación largo/ancho	2	2	2	2,24	1,42
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7
Talud interior	1 = 1,5	1 = 1,5	1 = 1,5	1 = 2,0	1 = 2,0
Area total del lote (Ha)	1,7	4,4	3,7	2	6,24

Las profundidades con las que fueron diseñadas las lagunas anaerobias (3 a 5 m) y las lagunas facultativas (1.5 a 2 m) presentan afinidad con las establecidas como adecuadas por diversos autores (Yáñez, 1992; Mara *et al.*, 1996; Mara y Pearson, 1998; Metcalf y Eddy, 2003). Aunque para las lagunas facultativas, Stewart (2005), recomienda una profundidad de 1.8 a 2.0 metros para mantener las condiciones aerobias en el primer metro de profundidad y tener espacio para la acumulación de lodos.

Respecto a los taludes interiores en las lagunas, estos se encuentran entre 1:1.5 y 1:2m; al realizar el contraste con lo publicado en la literatura, la relación se halla dentro del rango establecido como aceptable (Mendonça, 2000; Stewart, 2005). Sin embargo, contrario a lo recomendado, los taludes en la mayoría de las lagunas no fueron revestidos.

De manera general, las lagunas facultativas poseen una relación largo ancho de 2:1, presentando semejanza a la establecida por Stewart (2005); aunque el autor recomienda una relación preferiblemente de 3:1 para modelar un flujo de tipo pistón. Los dispositivos que favorecen el flujo pistón (lagunas facultativas mejoradas con baffles en El Cerrito), mejoran el comportamiento hidrodinámico, disminuyendo la aparición de cortos circuitos y las zonas muertas; incrementando el tiempo de retención y con esto las eficiencias de la laguna (Shilton, 2001; Peña, 2002). Los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización evaluadas, se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Parámetros de las lagunas de estabilización en el Valle del Cauca

PARAMETRO	RECOMENDACIONES DE LA LITERATURA				LAGUNAS DE ESTABILIZACION				
	Mara et al, 1992, 1996;	Yáñez, 1992	Sobalvarro, 1997	Rolim, 2000	TORO	LA UNION	ROLDANILLO	GUACARI	CERRITO
Población de diseño (hab)					9.635	23.455	19.831	19.008	50.919
Caudal de diseño (L/s)					25,6	63	55	56,35	90
Periodo de diseño (años)					15	15	15	15	20
Temperatura (°C)	20-30	18-30	20-35	20-25	20	16	16	22	24
LAGUNA ANAEROBIA									
CA * (kgDBO/d)					670	1632	1380	1315	
COV ** (grDBO/m ³ /d)	100-400	100-480			108	150	181	150	800
Tiempo de retención (d)	1-5	1-5	1-8	1-5	2,0	2,0	1,5	1,6	1
LAGUNA FACULTATIVA									
CA (kgDBO/d)					268	652	552	299,82	226,18
CS *** (kg/Ha/d)	275-350	275-350		150-400	362	363	345	659,67	802,96
Tiempo de retención (d)	10-16	10-16	15-35	6-20	5,0	5,0	5,0	2,36	2,36

* CA: carga afluente; **COV: carga orgánica volumétrica; ***CS: carga superficial

Aunque las lagunas de estabilización fueron concebidas para un periodo de 15 años (exceptuando la PTAR de El Cerrito), éstas operan desde hace aproximadamente 19 años. Inicialmente, se propuso la construcción por etapas, pero en la actualidad las lagunas no han sido rediseñadas ni ampliadas.

Con relación a las temperaturas en los municipios, éstas van desde los 16°C hasta los 24°C; según Peña *et al.* (2003), en estas condiciones de temperatura, tiempos de retención hidráulicos de 12 a 15 horas son suficientes para alcanzar reducciones promedios de DBO del 70%; por lo que se podría esperar en las lagunas anaerobias evaluadas, eficiencias que superen este porcentaje, ya que las temperaturas y los tiempos de retención (1 – 5d) se hallan en el rango recomendado; para el caso de las lagunas ubicadas en el municipio de El Cerrito, por su condición de alta tasa sólo requieren 1 día para lograr buenos desempeños en términos de reducción de la materia orgánica.

En cuanto a las cargas volumétricas con las que operan las lagunas anaerobias convencionales, éstas oscilan entre 108 y 180 gDBO/m³.d. Autores como Mara y Pearson (1998), argumentan que las cargas deben estar por encima de 100 gDBO/m³.d para mantener las condiciones anaerobias y por debajo de 400 gDBO/m³.d para evitar malos olores causados por la conversión de sulfatos a sulfuro de hidrógeno; de acuerdo a lo expuesto, las cargas aplicadas a las lagunas anaerobias se consideran aceptables.

Para el caso particular de la laguna anaerobia de alta tasa (municipio de El Cerrito), la carga volumétrica de diseño es de aproximadamente 800 gDBO/m³.d; para Peña *et al.* (2003), este tipo de laguna puede operar con cargas que oscilan entre los 600 y 800 gDBO/m³.d, indicando que la laguna objeto de análisis se encuentra dentro de lo establecido por el autor. Por otro lado, la modificación realizada a las lagunas anaerobias de alta tasa, mejora la hidrodinámica, desarrollando una zona muy definida de mezcla favoreciendo el contacto entre la biomasa y el sustrato.

En las lagunas facultativas, las cargas superficiales se encuentran entre los 300 y 800 kg DBO/ha.d; sin embargo, la literatura expone que cargas superficiales que excedan los 250 kg DBO/ha.d pueden ocasionar la aparición de malos olores; mientras que cargas que excedan los 400 kgDBO/ha.d llevan probablemente a la anaerobiosis y como resultado bajas eficiencias o desempeños (Mendonça, 2000). Esto último conlleva a suponer que una de las lagunas facultativas estudiadas podría estar presentando problemas operacionales causados por sus altas cargas, las cuales oscilan entre los 600 y 800 kgDBO/ha.d.

Con relación a los lodos, al ser retirados de las lagunas son dispuestos en lechos de secado por aproximadamente 4 semanas; los cuales una vez secos, son entregados a los agricultores del municipio o dispuestos en terrenos aledaños. La Fotografía 4.10 muestra los lechos de secado de lodos en las PTARs estudiadas.



Fotografía 4.10. Lechos de secado

El lecho de secado de lodos es generalmente el método más simple y económico de deshidratar los lodos; los mecanismos de secado son principalmente la evaporación y la percolación. En las PTARs estudiadas, fueron construidos en concreto y el medio de drenaje esta constituido por ladrillo, arena y grava. La profundidad de los lechos varía entre 60 y 80cm, con anchos y largos que van desde los 3 a 4m y desde los 6 a 8m respectivamente. Parámetros que se hallan acordes a los establecidos por la literatura (Mendonça, 2000; Stewart, 2005)

Operación y Mantenimiento

Independiente del tipo de tecnologías que se utilicen para el tratamiento de las AR, el mantenimiento rutinario de las instalaciones debe ser el objetivo fundamental del operador. Si éste no es realizado frecuentemente, en poco tiempo la planta se deteriorará causando graves consecuencias en el desempeño. En la Tabla 4.6 se presentan las labores que se realizan en la tecnología de lagunas de estabilización.

Tabla 4.6. Actividades de operación y mantenimiento para la tecnología de Lagunas de estabilización

Actividades a realizar	Realizadas por el Operario
Dos aforos diarios en las estructuras de medición a la entrada y salida de las lagunas anaerobia y facultativas, uno a las 8:00 am o a la 1:00 pm y el otro a las 12:00m o a las 5:00 pm, para tener datos estadísticos sobre el comportamiento del caudal de aguas residuales	No coincide
Conservar los diques libres de hierbas y malezas que puedan estimular la presencia de mosquitos u otra clase de insectos	Coincide
Mantener los terrenos adyacentes a la laguna sin hierbas no solo por lo anterior, si no por mantener el buen aspecto	Coincide
Limpieza diaria de las rejillas de entrada al desarenador consistente en la reducción de material flotante y sedimentos adheridos a las rejillas	Coincide
No permitir el ingreso de personas, animales y maquinaria pesada no autorizada por ACUAVALLE S.A. E.S.P	Coincide
Retiro, acarreo, cargue, transporte y descargue diario, en los lechos o lagunas de disposición de lodos del material removido de las rejillas	Coincide
Retiro, acarreo, cargue, transporte y descargue en los lechos o lagunas de disposición de lodos, del material húmedo, sedimentado en el desarenador y en las cámaras de entrada, interconexión y salida, una vez por semana	Retiro, acarreo, cargue, transporte y descargue en los lechos o lagunas de disposición de lodos, del material húmedo, sedimentado en el desarenador y en las cámaras de entrada, interconexión y salida (no tienen frecuencia estable)
Control el nivel de operación de las lagunas con el propósito de disminuir la proliferación de mosquitos	No coincide
Limpieza diaria de estructuras de separación y cámaras de inspección más cercanas a las instalaciones de la planta, incluyendo retiro, acarreo, cargue, transporte y descargue del material en los lechos de secado	Coincide
Aplicar insecticidas de ser necesario	No coincide
Retiro, acarreo, cargue, transporte y descargue en los lechos o lagunas de disposición de lodos, del material flotante, algas y natas presentes en las superficies de las lagunas anaerobia y facultativas	Coincide
Cuidar las estructuras de entrada y salida para evitar obstrucciones	Coincide
Recubrimiento con cal viva del material dispuesto en los lechos, en las lagunas de disposición de lodos y en las losas de concreto, retirado de las: rejillas, desarenador, estructuras de separación, cámaras de entrada, interconexión y salida, pozo de bombeo, cámaras de inspección y de las lagunas anaerobia y facultativas, para evitar la proliferación de insectos y olores. La cal es suministrada por la entidad contratante	Coincide
Medir el caudal que llega a la laguna y determinar la carga orgánica aplicada, igual que la remoción en la DBO y en NMP (esto se efectúa cuando se considera necesario)	No coincide
Avisar oportunamente al Coordinador de Mantenimiento de ACUAVALLE S.A E.S.P sobre los daños y novedades ocurridas dentro de las instalaciones y las molestias que ello pueda ocasionar a propiedades vecinas, tales como agrietamiento de taludes, filtraciones, estabilidad cabezales de entrega, inundaciones y suspensión de la llegada del agua residual al sistema de tratamiento de aguas residuales	Coincide
Llevar una bitácora o registro de actividades y novedades presentadas durante la jornada de trabajo, tales como, deterioro de elementos, accesorios e instalaciones en general, aforos realizados, consumos de cal viva, visitas y demás que se consideren de interés para el control, y buena operación del sistema de tratamiento de aguas residuales. La bitácora debe reposar en la Oficina Local de ACUAVALLE S.A. E.S.P	No coincide
Llevar un registro del número de paladas que a diario se retira por efectos de la reducción de material sedimentado en el desarenador y material flotante (nata en las lagunas anaerobia y facultativas)	No coincide

Las diferencias que existen entre las actividades realizadas por el operario y las establecidas en el manual, se deben principalmente a la poca capacitación que reciben los operarios a la hora de ser contratados, además del escaso seguimiento por parte de la entidad encargada. El mantenimiento del proceso biológico en las lagunas en teoría es fácil, pero en las PTARs evaluadas es prácticamente inexistente, ya que se dedica más atención a la limpieza de las malezas que al funcionamiento del proceso.

De manera general, para poder anticipar problemas operacionales, el operador debe registrar los caudales diariamente; sin embargo, en ninguna PTAR es monitoreado ni controlado el caudal, se presume que entre las razones se encuentra la ausencia de estructuras adecuadas para su lectura (canaletas Parshall con problemas de calibración) e inadecuadas actividades de mantenimiento que garanticen su conservación a través del tiempo. La no lectura del caudal genera inconvenientes al interior de las lagunas como

disminución del TRH, aumento de la carga hidráulica y orgánica (olores, anaerobiosis, proliferación de roedores), entre otros.

En la mayoría de las lagunas (anaerobias y facultativas) existen problemas por la presencia de sobrenadantes, su aparición se debe principalmente a la ausencia y/o mal estado de las rejillas (deterioradas y/o rotas) o a las inadecuadas labores de operación y mantenimiento (frecuencia) en las mismas. Los sólidos flotantes y gruesos no retenidos en las rejillas (toallas, preservativos, plásticos, etc.), favorecen la formación de natas, las que a su vez producen malos olores, impiden la transferencia de oxígeno a la laguna (facultativa) y sirven como foco para la reproducción de insectos y organismos vectores. Para Stewart (2005), la aparición de sobrenadantes puede ser causada por los siguientes factores:

- Poca o falta eliminación de sólidos gruesos en la rejilla
- Flotación de lodos por el burbujeo en la laguna anaerobia o por acumulación de lodos en el fondo
- Mantenimiento inadecuado

De las lagunas evaluadas, sólo una ostenta problemas asociados a la presencia de gallinazos y roedores permanentemente en sus instalaciones; entre las razones se presume que podrían estar relacionados con la presencia de:

- Sobrecargas de DBO que causa condiciones anaerobias. La sobrecarga puede ser causada por exceso de caudal, inadecuado diseño o por períodos de retención hidráulica demasiado bajos (cortocircuitos hidráulicos)
- Cargas orgánicas bajas (también causan olores indeseables)
- Residuos putrescibles en el agua residual (además del AR llegan a la PTAR residuos provenientes del matadero municipal como rumen, pelo y partes de aves como vísceras, cabezas y plumas). En la Fotografía 4.11 se observa la presencia de residuos que propician la llegada de aves y roedores a la laguna
- Caída repentina de la temperatura ambiental, dando lugar a la disminución de los procesos de depuración
- Exceso de lodos
- Residuos tóxicos de efluentes industriales que afectan el proceso biológico y que posteriormente alteren el pH
- Descomposición de natas y material flotante no removida de la superficie de la laguna
- Bloqueo de árboles o estructuras que causa una reducción de transferencia de oxígeno inducida por el viento



Fotografía 4.11. Presencia de gallinazos en una de las lagunas evaluadas

Con relación a los problemas operacionales producidos por las cargas orgánicas aplicadas, se encontró en una de las lagunas facultativas evaluadas un punto crítico respecto a la carga superficial con la que se encuentra operando; esta excede los 600 kg DBO₅/ha.d pese a que la literatura expone que cargas superficiales que superen los 300 kg DBO₅/ha.d ocasionan la aparición de malos olores y cuando exceden los 400 kg DBO₅/ha.d conducen el sistema a la anaerobiosis y finalmente a bajos desempeños (Mara *et al.*, 1992; Mendonça, 2000); indicando que la laguna podría estar presentando problemas operacionales, los que a su vez atraen aves indeseables.

Por otro lado, como consecuencia de no realizar deslode durante un período de aproximadamente de 2 a 5 años, se halló que la mayoría de las lagunas anaerobias (obviando la construida en el municipio de El Cerrito) están llegando a su límite de acumulación de lodos (es posible observar islotes en su interior), en la Fotografía 4.12 se presenta lo expuesto.

La acumulación de lodo genera la disminución del volumen útil y como consecuencia la reducción del tiempo de retención (cortos circuitos) y finalmente deficiencias en el desempeño. Se presume que su ocurrencia se debe además de la ausencia de paso directo en las entradas (sobrecarga de caudal y entrada excesiva de material sedimentable), a las escasas labores de mantenimiento en el desarenador aunado a los problemas de diseño hallados en la estructura y a la falta de deslode; cabe resaltar que para este último se precisa capacitación (frecuencias y mediciones de cantidad de lodo), herramientas y equipos (bombas, vactor, etc.) para efectuarlo con mayor frecuencia.

Autores como Mara y Pearson (1998), Franci (1999) y Stewart (2005), estiman que los lodos tienen que ser removidos con una frecuencia de 5 a 10 años en las lagunas facultativas y de 2 a 5 años en las lagunas anaerobias, sin embargo, esto depende y varía de acuerdo a las características de las aguas residuales a tratar. La remoción de lodos es una tarea significativa y obligatoria y su realización debe ser bien planeada.



Fotografía 4.12. Acumulación de lodos al interior de una de las lagunas evaluadas

Respecto a la remoción de lodos, autores recomiendan que los diseños y manuales de operación deben incluir una estimación de las tasas de acumulación y un método de remoción con una disposición final adecuada (Mendonça, 2000; Stewart, 2005); no obstante, al realizar el contraste con lo literatura, en ninguna de las PTARs evaluadas dicha recomendación es llevada a cabo, ya que además de no ser monitoreada la acumulación de lodos, no se posee un plan para su remoción.

Las labores de operación y mantenimiento en la mayoría de las lagunas se concentran en la poda de las plantas; sin embargo, una vez realizada la actividad, el material podado no es retirado en su totalidad y al ser arrastrado por el viento o la lluvia hacia la laguna, aporta carga orgánica al sistema.

El lodo una vez retirado es dispuesto en lechos de secado y finalmente es entregado a los agricultores para su posterior reuso. No obstante, contrario a lo recomendado (OMS, 2006), a este subproducto no es realizado ningún tipo de análisis que permita determinar si es apto o no para ser reutilizado (Egocheaga y Moscoso, 2004). Para Mara y Cairncross (1989), los lodos deben ser almacenados por un periodo mínimo de un año y antes de cualquier uso o disposición final, deben ser analizados en búsqueda de huevos viables (con capacidad patogénica).

4.2.2. Reactor UASB seguido de Filtro percolador

Diseño y construcción

Los municipios de Restrepo, Calima - El Darién y Riofrío, como solución para el tratamiento de las aguas residuales seleccionaron y construyeron la tecnología anaerobia de Reactor UASB seguida de filtro percolador y sedimentadores secundarios.

Los terrenos seleccionados para la construcción de las tecnologías, están ubicados a una distancia mayor a 500m de la población, presentando afinidad a lo reportado por Wildschut (1987); aunque la PTAR construida en el municipio de Restrepo está localizada a una distancia menor a 100m. Por su cercanía al cuerpo receptor y por su ubicación con respecto al nivel del agua, en épocas de invierno en una de las plantas se presentan inundaciones, situación que además de generar molestias e incomodidad a los operarios, comprometen el tiempo de secado de lodos al introducirse el agua en los lechos.

Con relación a las entradas, se halló que una de las PTARs no posee suficiente área para el ingreso de volquetas o vehículos, escenario que podría ocasionar la acumulación de sólidos (lodos) y en caso de fallas o sucesos que demanden algún tipo de reparación se tendrían inconvenientes para el acceso de equipos o maquinaria.

Con el propósito de proteger las instalaciones y el proceso (disminución del TRH, cortos circuitos, etc.) contra la introducción de sobrecargas hidráulicas producidas por el aumento del caudal (aguas lluvia) y sobrecargas orgánicas, el tratamiento de las aguas residuales en las PTARs inicia con una estructura de alivio o paso directo. Su instalación corresponde las recomendaciones de la literatura (Chernicharo, 2007), la cual establece que esta unidad debe ubicarse a la entrada de la planta y así desviar el caudal de exceso a los cuerpos receptores. En la Fotografía 4.13 se enseñan los pasos directos de las PTARs.



Fotografía 4.13. Paso directo

En las plantas evaluadas, algunas de las unidades que conforman el sistema de tratamiento fueron construidas por encima del nivel del suelo, por lo que se presenta bombeo en algún punto del sistema. Para el caso de las PTARs de Riofrío y de Calima – El Darién, el agua residual es bombeada a las estructuras preliminares, para luego ser conducida por gravedad a las siguientes unidades; la PTAR ubicada en el municipio de Restrepo, fue construida a nivel del suelo, existiendo además del bombeo inicial (a los preliminares) otro bombeo que impulsa el agua residual a los reactores. La Fotografía 4.14 presenta las unidades preliminares elevadas.



Fotografía 4.14. Elevación de preliminares

Como estructura para la protección de las bombas, se han instalado en la entrada del pozo de succión rejas gruesas constituidas por barras rectangulares en acero inoxidable, con separaciones entre barras de 50mm y espesores de aproximadamente 25mm; dimensiones que se hallan acorde con las establecidas por Wildschut (1987) y Stewart (2005). Como particularidad, en las PTARs de los municipios de Riofrío y Calima – El Darién las rejas fueron construidas en forma de canasta, estructura que además de retener el material grueso favorece su almacenamiento mientras se realizan las labores de operación y mantenimiento; no obstante, por ser la estructura de limpieza manual, mientras se realiza la recolección del material retenido existe el riesgo que cierta cantidad de afluente entre al sistema con material suspendido pudiendo causar obstrucciones en las siguientes estructuras o unidades de tratamiento. Las rejas se observan en la Fotografía 4.15.



Fotografía 4.15. Rejas

En unas de las PTARs la reja fue ubicada al interior del pozo de succión, construcción considerada insegura por la dificultad en el acceso para realizar las actividades de operación y mantenimiento (Fotografía 4.16).



Fotografía 4.16. Ubicación de la reja (dificultad en el acceso)

Uno de los principales objetivos de utilizar rejillas en el tren de tratamiento es el proteger las válvulas, bombas y tuberías contra obstrucciones. De acuerdo a lo anterior, en las PTARs estudiadas fueron instaladas rejillas finas y conforme a las recomendaciones fueron construidas en acero inoxidable con separaciones inferiores a 20mm entre las barras (Chernicharo, 2007). En la PTAR de Restrepo, además de la rejilla fina fue instalado un tamiz que mejora la retención del material suspendido. El tamiz y las rejillas son presentados en la Fotografía 4.17.



Fotografía 4.17. Tamiz y rejillas

Para el secado del material retenido en las rejillas y de acuerdo a lo establecido en la literatura, en las PTARs fueron instaladas plataformas de drenaje, donde una vez retirado el material, es dispuesto para su deshidratación y posterior recolección. La Fotografía 4.18 muestra las plataformas.



Fotografía 4.18. Plataformas de drenaje

La siguiente unidad la constituyen los desarenadores de flujo horizontal, construidos en concreto y diseñados con una velocidad horizontal de aproximadamente 0.30 m/s, la cual coincide con la recomendada por diversos autores (Marais y van Haandel, 1996; Reynolds y Richards, 1996; Mendonça, 2000). Estas unidades evitan la acumulación de arenas y demás material inerte en el reactor biológico. En cada PTAR fueron construidos dos desarenadores en paralelo, con funcionamiento alterno, de manera que uno funcione mientras se realiza el mantenimiento a la otra unidad.

Los desarenadores son limpiados diariamente y cada 6 meses es realizado el mantenimiento general; frecuencia que se halla acorde con la establecida por Stewart (2005), el cual expone que un desarenador, de acuerdo a la cantidad de arena acumulada y los límites estipulados en el diseño hidráulico, implica limpiezas cada 1 o 2 días. Los desarenadores poseen compuertas para facilitar las actividades de mantenimiento y fueron cubiertos además con láminas metálicas livianas (pueden ser levantadas fácilmente por el operador) que mitigan los problemas causados por los olores. Los desarenadores se observan en la Fotografía 4.19.



Fotografía 4.19. Desarenadores

Para controlar la velocidad horizontal en los desarenadores es utilizado el vertedero proporcional o sutro, dispositivo que reduce la velocidad del agua hasta valores que permitan la deposición de las partículas. Además de controlar y mantener la velocidad del flujo alrededor de 0.30m/s es utilizado para la medición de caudal; no obstante, como se mencionó con anterioridad en ninguna PTAR es llevado un registro de mediciones. La Fotografía 4.20 presenta el vertedero.



Fotografía 4.20. Vertederos sutro

Posterior a los desarenadores se encuentran las trampas de grasas, esta unidad tiene especial relevancia en el tratamiento, ya que impide el paso del material flotante que ocasiona problemas en el proceso biológico (grasas y aceites). El AR entra por una tubería de PVC con un diámetro de 8" y sale para distribuir al interior de los reactores a través de una tubería ubicada en el fondo con un diámetro de aproximadamente 6" (Riofrío y Calima – El Darién), el tiempo de retención hidráulica en las estructuras es de 3 min, con profundidades mayores a los 0.8 m y la diferencia de nivel entre la tubería de ingreso y la de salida es de 0,05 m. En la trampa de grasa ubicada en la PTAR de Restrepo, la salida fue provista de una pantalla o tabique metálico que retiene las grasas y a su vez direcciona el agua residual a la siguiente unidad de tratamiento; las trampas de grasa y el compartimento de almacenamiento están conectados a través de un vertedor de rebose, el cual está aproximadamente a 0,05m por encima del nivel de agua, así mismo, el espacio sobre el nivel del agua residual y la parte inferior de la tapa esta alrededor de 0,30m. De manera general, los parámetros de diseño presentan similitud con lo reportado por la literatura (Ministerio de desarrollo económico RAS, 2000; CEPIS, 2005). En la Fotografía 4.21 se observan las trampas de grasa.



Fotografía 4.21. Trampa de grasas

Según la literatura, en el tratamiento preliminar se debe incluir la recolección, transporte y disposición inmediata de los residuos sólidos arenosos, gruesos y flotantes, con el fin de

reducir el riesgo por exposición (Stewart, 2005); esta recomendación es llevada a cabalidad en las plantas, para lo cual se dispone de un área específica para ser enterrados.

El tratamiento biológico es llevado a cabo en los reactores UASB (Fotografía 4.22), cuyos parámetros de diseño y dimensiones son presentados en la Tabla 4.7 y Tabla 4.8.



Fotografía 4.22. Reactores UASB

Tabla 4.7. Parámetros de diseño de los reactores UASB

PARAMETRO	RECOMENDACIONES DE LA LITERATURA			REACTORES UASB		
	van Haandel y Lettinga, 1994	von Sperling y Chernicharo, 2005	Chernicharo, 2007	RESTREPO	CALIMA - EL DARIEN	RIOFRIO
Población de diseño (hab)				8.960	17.284	11.975
Caudal de diseño (L/s)				40.2	96	43.5
Periodo de diseño (años)				10	20	20
Temperatura (°C)	18-24	20-25	20-25	20	20	22
Profundidad total (m)	4-6	4-6	4-6	4	6	6
Tiempo de retención hidráulico (h)	4-6	8-10	8-10	8,5	8,5	8,5
*VAF (m/h)	≤ 1	0,5-0,7	0,5-0,7		0,5-0,7	0,5-0,7
**IPS (°)		50-60	≤ 50	45,0	45,0	45,0
Distribución del afluente	Tubos distribuidores	Tubos distribuidores	Tubos distribuidores	Tubería perforada	Tubería perforada	Tubería perforada
Recolección del efluente	Vertederos triangulares	Vertederos triangulares	Vertederos triangulares	Vertederos triangulares	Tubería perforada	Tubería perforada

*VAF: velocidad ascensional del flujo; **IPS: inclinación de la pantalla del separador trifásico

Tabla 4.8. Dimensiones de los Reactores UASB

Parámetro	RESTREPO	CALIMA-EL DARIEN	RIOFRIO
Altura útil (m)	4	6	6
Geometría	Rectangular	Rectangular	Rectangular
Diámetro de la tubería principal (")	4	8	8
Material de las cubiertas	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio
Largo de la zona de sedimentación (m)	10	12.10	12
Ancho de la zona de sedimentación (m)	4	4.84	4.84
Angulo de inclinación de los separadores (°)	45	45	45
Área de paso deflector - separador (m2)	7.44		
Separación entre placas (cm)		6.0	6.0
Calibre de las placas (mm)		10	10
Inclinación de las placas		60°	60°
Número de canaletas de recolección del efluente	8		
Número de vertederos triangular por canaleta	36		
Número de tuberías de recolección del efluente		10	10
Número total de orificios de recolección		200	200
Diámetro de los orificios de recolección (")		0.5	0.5

Según van Haandel y Lettinga, (1994), para el diseño de un reactor UASB que trata agua residual doméstica, el primer parámetro a tener en cuenta es el tiempo de retención hidráulico (TRH). Para el caso de los reactores objeto de estudio, los TRH son de aproximadamente 8.5 h para caudal medio, parámetro que se encuentra dentro del rango óptimo establecido para obtener buenos desempeños. Dicho rango (8 y 10 h) ha sido determinado a partir de estudios y experiencias a escala real en reactores que tratan aguas residuales domésticas a temperaturas mayores de 20°C; aunque, observaciones experimentales de reactores operando en clima tropical y subtropical (temperaturas > 22 °C) indican que un TRH de 6 h es suficiente para obtener alta eficiencia de reducción (Hulshoff y Lettinga, 1984; Vieira, 1988).

La altura de los reactores oscila entre 4 y 6 m, presentando similitud con las reportadas por diversos autores como ideales (van Haandel y Lettinga, 1994; Chernicharo, 2007). Para Hulshoff y Lettinga (1984), la altura tiene especial relevancia en la eficiencia del reactor, ya que determina la velocidad ascensional del agua residual en el reactor, además de que influye considerablemente en la solubilidad del dióxido de carbono, el cual disminuye el pH, alterando significativamente el proceso anaerobio. De manera general, la altura de un reactor se determina principalmente, por la velocidad superficial máxima admisible y por razones económicas.

La velocidad ascensional con la que fueron diseñados los reactores (0.5 a 0.7m/h), se encuentran dentro del rango recomendado, garantizando con esto que las velocidades sean las adecuadas con el fin de evitar la pérdida de lodo por arrastre y la turbulencia en la zona de sedimentación.

En las PTARs estudiadas, la alimentación de los reactores es realizada a través de tuberías perforadas. La experiencia práctica ha demostrado que este tipo de alimentación presenta diversos inconvenientes asociados principalmente con obstrucciones frecuentes de las tuberías, generadas en parte, por residuos que trae el agua residual, como resultado de las deficiencias en la operación y el mantenimiento de las estructuras preliminares; así como, por la compactación del manto de lodo sobre las tuberías como consecuencia de la disminución del caudal. Este tipo de inconvenientes se presenta con mayor frecuencia cuando el flujo hidráulico es a gravedad; aunque cuando es realizado por bombeo puede ser menos recurrente, pero el nivel de exigencia de las bombas es mayor, pudiendo ocasionar el desgaste de equipos y como agravante problemas de desempeño por el aumento repentino de caudal (disminución del TRH).

Las obstrucciones en la alimentación propician una distribución inadecuada del afluente debido a la formación de zonas muertas, caminos preferenciales y disminución del volumen de la biomasa (el inesperado aumento de caudal puede ocasionar el arrastre del lodo activo) afectando significativamente la eficiencia del reactor, al no garantizarse un adecuado contacto entre la biomasa y el agua residual. Por lo anterior, se concluye que las PTARs estudiadas presentan problemas de obstrucción, asociados al tipo de alimentación y otros problemas operacionales inherentes a una inadecuada alimentación.

Autores como van Haandel y Lettinga (1994), Noyola (2003) y Chernicharo (2007), recomiendan como la forma más adecuada para distribuir el afluente, la construcción de dispositivos de distribución compuestos por vertederos, cada uno conduciendo a un tubo o tubería, por medio de la cual se dirige el agua residual hasta el fondo del reactor. Con el fin de evitar el arrastre de aire hacia el interior del reactor es necesario garantizar unas velocidades descendentes adecuadas ($\leq 0.2 \text{ m.s}^{-1}$) y con el propósito de impedir obstrucciones a la salida, se deben propiciar ciertas velocidades ($\geq 0.4 \text{ m.s}^{-1}$).

Con relación a la recolección de los efluentes, se tiene que en una de las PTARs estudiadas, la recolección del efluente del reactor UASB es realizada a través de canaletas con vertederos triangulares en concreto, diseño que se considera inadecuado, ya que este tipo de estructura es propensa a presentar problemas de obstrucciones; además, con el paso del tiempo el concreto se deteriora generando inconvenientes en la recolección (no homogénea por todos los vertederos). En las otras PTARs la recolección en los reactores es realizada mediante tuberías perforadas sumergidas, ubicadas a lo largo de la zona de sedimentación. El diámetro de las tuberías es de aproximadamente 6" y están provistas de orificios con diámetros de $\frac{1}{2}$ "; diseño que presenta similitud con lo recomendado en la literatura, la cual determina que su uso favorece la recolección uniforme y son menos propensos a las obstrucciones (van Haandel y Lettinga, 1994; Chernicharo, 2007). El tipo de recolección utilizado en las PTARs se observa en la Fotografía 4.23.

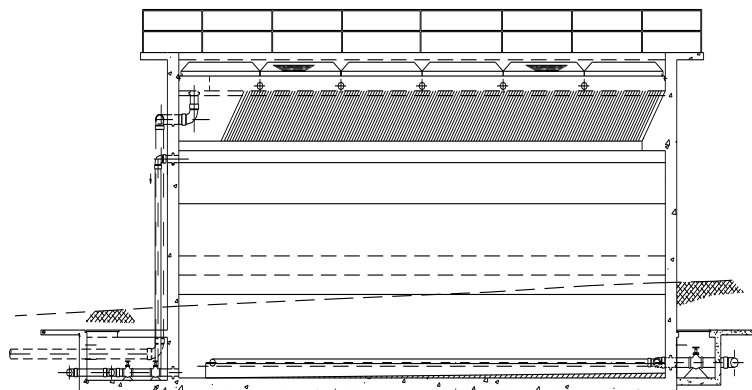


Fotografía 4.23. Recolección de los efluentes de los reactores

En cuanto a la geometría, todos los reactores fueron construidos de forma rectangular; aunque la literatura expone que reactores circulares, tienen la ventaja de presentar una estabilidad estructural mayor y ser más económicos en su etapa de construcción, aunque la construcción del separador GSL es más complicada que en uno rectangular (Chernicharo, 2007); adicionalmente, para reactores con volúmenes significativos (PTARs evaluadas), la forma rectangular ha sido la más utilizada.

El separador de fases GSL es el dispositivo más característico e importante en el diseño y funcionamiento del reactor UASB. Este dispositivo permite la recolección del biogás producido en la zona de digestión y la sedimentación de los sólidos en suspensión en la parte superior del reactor. Los separadores GSL están constituidos por tres elementos, una

campana superior, pantallas inclinadas y deflectores en forma de V invertida. Sin embargo, como particularidad en los reactores construidos en dos de las PTARs estudiadas, además del separador de fases GSL, la zona de sedimentación del reactor fue provista de placas paralelas inclinadas (60°) (sedimentación de alta tasa), construidas en fibra de vidrio con dimensiones de $2.25 \times 1.05 \times 0.01$ m y un ángulo separador en fibra de vidrio con un calibre de 10 mm, con el objetivo de mejorar la separación de los sólidos. Las placas paralelas se observan en la Figura 4.3.



Fuente: Manual de operación y mantenimiento PTARs de Riofrío y Calima – El Darién

Figura 4.3. Zona de sedimentación de alta tasa

Las pantallas inclinadas que hacen parte del separador GSL tienen un ángulo de inclinación de 45° y al realizar el contraste con lo reportado en la literatura, presenta similitud con lo establecido por van Haandel y Lettinga (1994) y Chernicharo (2004).

Como factor crítico respecto a este dispositivo, se tienen diseños poco claros y confusos (principalmente en dos de las PTARs), por lo que se podrían estar presentando problemas operacionales inherentes a su diseño y construcción; como pérdida de biogás, contaminación atmosférica por escape de CH_4 , H_2S y CO_2 , deterioro de la capa de ozono, corrosión y olores; arrastre de lodo activo o con alta capacidad metanogénica (burbujeo propio del proceso anaerobio) y finalmente, bajos desempeños.

Por otro lado, para el biogás producido se cuenta con un sistema compuesto por una conducción, medidor y una tea provista de una llama piloto de quemado continuo de biogás. En las Fotografías 4.24, 4.25 y 4.26 se observan las tuberías de conducción, los medidores y las teas.



Fotografía 4.24. Tuberías de conducción**Fotografía 4.25. Medidores****Fotografía 4.26. Teas**

Como particularidad, se observó que en las tuberías de conducción de biogás de uno de los reactores estudiados, hay presencia de agua residual tratada; indicando diseños inapropiados. Por otro lado, en las PTARs evaluadas, los medidores no se encuentran operando (deteriorados), se presume que el material en el que fueron construidos es inadecuado para la conducción del biogás, ya que posee alto poder corrosivo.

Existen otros gases que se encuentran disueltos en el agua residual y que una vez liberados por las turbulencias y resaltos hidráulicos, generan problemas de olores y corrosión. De acuerdo con la experiencia práctica y acorde con lo recomendado por Chernicharo (2007), para mitigar inconvenientes de este tipo, las PTARs evaluadas fueron construidas en sitios alejados de la comunidad (obviando una), poseen barreras vivas a su alrededor, conducciones a través de tuberías, cajas de distribución-recolección, canales y reactores cubiertos.

Las cubiertas de los reactores son de fibra de vidrio, material liviano que facilita las actividades de mantenimiento; sin embargo, algunas cubiertas se hallan en mal estado de conservación, debido principalmente a la carencia de actividades de mantenimiento (limpieza, pintura revestida, etc.), ya que además de estar expuestas constantemente a

factores ambientales (sol, agua, viento), el gas acumulado en su interior es corrosivo (contribuye con su deterioro).

Para controlar el proceso, determinar la calidad del lodo producido y decidir sobre la purga del lodo de exceso, se debe contar con un sistema de muestreo, que en las PTARs estudiadas está compuesto por un dispositivo de flautas a cinco alturas diferentes; en Restrepo (0.25, 0.50, 0.75, 1.25 y 1.75m) y en Riofrío y Calima – El Darién a 4 alturas diferentes (0.75, 1.75, 2.75 y 3.75m). El sistema de muestreo se presenta en la Fotografía 4.27.



Fotografía 4.27. Tuberías de muestreo

La purga del lodo es realizada a una altura de 0.75 (Restrepo) y 1.75m (Riofrío y Calima el Darién) y sólo en estas últimas se coincide con lo expuesto por van Haandel y Lettinga (1994) y Chernicharo (2007), quienes recomiendan un punto de purga, donde el lodo presente características de menor densidad y menor actividad metanogénica. La práctica ha enseñado que las flautas que conforman el sistema de muestreo y la tubería del sistema de purga, poseen una tendencia a obstruirse después de un tiempo de no ser utilizadas, sobre todo en el punto más bajo, esto se presenta por la longitud de la tubería y por la densidad del lodo (más espeso). El mantenimiento general de los reactores es realizado cada 5 años y la purga de lodo sucede aproximadamente cada dos meses (la purga se determina a partir del perfil de lodos, el cual se realiza quincenalmente).

Aunque existe espacio para la instalación de un laboratorio, no se poseen equipos ni instrumentos para realizar análisis de rutina (T° , pH, alcalinidad, etc.); en términos de operación, en ninguna planta es llevado el control del proceso (%DBO, %DQO, %SST, etc.). Los análisis son efectuados por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca con una frecuencia semestral o anual; no obstante, según diversos autores (Vieira, 1988; van Haandel y Lettinga, 1994; Field *et al.*, 1995 y Chernicharo, 2007) la evaluación de un reactor UASB requiere la determinación y seguimiento de los parámetros considerados de control, en función de los cuales se puede establecer las eficiencias de reducción. Para los autores, los parámetros utilizados, se pueden dividir en dos tipos: principales y auxiliares. Los considerados principales son la DQO (total y filtrable), DBO, pH, Alcalinidad bicarbonática, AOV y los SST. Los parámetros auxiliares pueden ser: parámetros de cuantificación de microorganismos (coliformes fecales y colifagos) y parámetros que indiquen la presencia y cantidad de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y fósforo).

Otro factor a tener en cuenta para controlar la calidad del efluente y eficiencia del proceso es la observación directa; cuando el funcionamiento es adecuado, el efluente debe tener un aspecto claro y debe contener poco lodo (Wildschut, 1987); una sobrecarga al reactor se

manifiesta en una alta turbiedad en el efluente y la presencia de sólidos sin digerir (gris). Aunque, como sucede con los parámetros de control prioritario, este tipo de evaluación tampoco es efectuada.

La unidad de tratamiento ubicada después del reactor UASB es el filtro percolador, cuyas dimensiones son presentadas en la Tabla 4.9; en la Fotografía 4.28 se observan las unidades.



Fotografía 4.28. Filtros percoladores

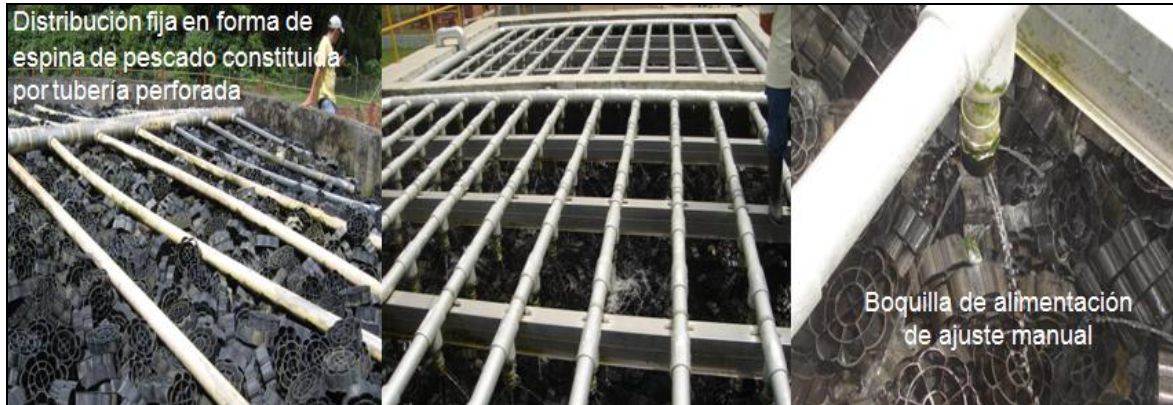
Tabla 4.9. Dimensiones de los filtros percoladores

Parámetro	RESTREPO	CALIMA-EL DARIEN	RIOFRIO
Número de unidades	1	2	2
Geometría	Circular	Rectangular	Rectangular
Altura útil (m)	4	4	3,5
Caudales (L/s)	13	30,5	13,5
Material	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo
Medio soporte	Rosetas	Rosetas	Rosetas
Alimentación	Tubería perforada fija	Tubería perforada fija	Tubería perforada fija

Los filtros fueron diseñados utilizando un modelo de eficiencia propuesto por Schulze (1960 citado por Metcalf y Eddy, 2003). Considerando que el modelo fue probado en países estacionales con marcadas diferencias climáticas (temperatura, pluviosidad, humedad, etc.); pueden existir limitaciones que afectan significativamente el desempeño de los filtros diseñados con este modelo en países tropicales; adicionalmente, el modelo aplica para filtros utilizados como única unidad de tratamiento y no para filtros de pulimiento o con fines de postratamiento (filtros estudiados).

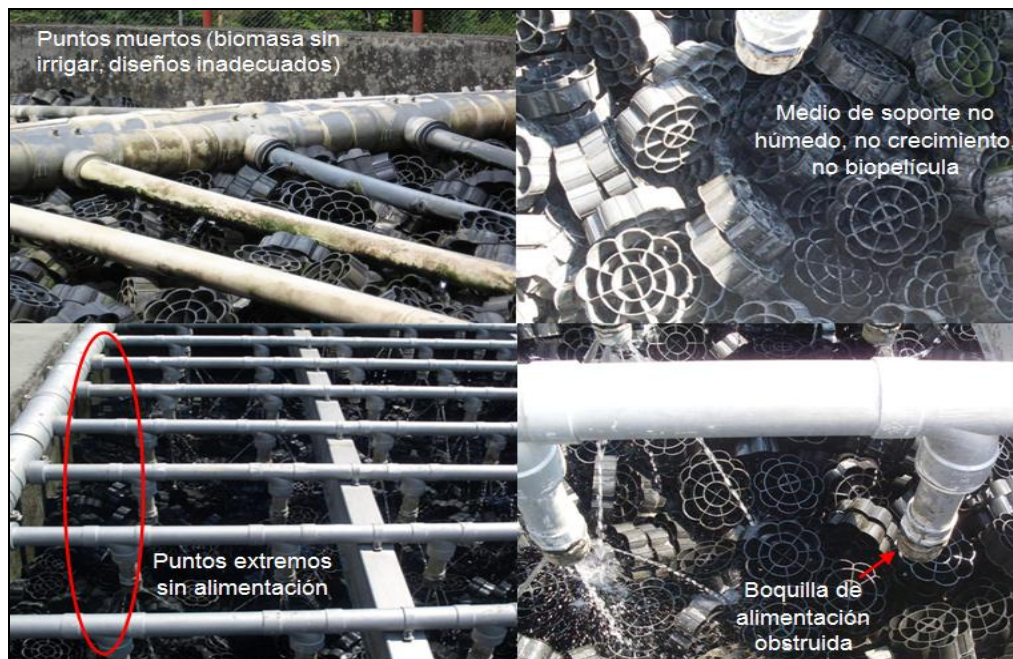
De manera general, en países tropicales los diseños deben ser acordes a las condiciones ambientales, por lo que a través de la experiencia práctica, en la actualidad existen criterios de diseño para filtros percoladores usados como postratamiento (Chernicharo, 2007).

La distribución del caudal es realizada a través de tubería perforada fija, con boquillas de alimentación de ajuste manual. En la Fotografía 4.29 se observa la distribución del caudal.



Fotografía 4.29. Distribución del caudal en el filtro percolador

De acuerdo con la literatura, este tipo de alimentación es considerado inadecuado puesto que no favorece la repartición homogénea del afluente en la superficie filtrante, requiere grandes extensiones de tubos de distribución y los aspersores o boquillas se obstruyen fácilmente, requiriendo mayor cuidado en el mantenimiento y operación (Chernicharo, 2007). En contraste se recomienda alimentación a través de brazos móviles que garantizan un medio filtrante irrigado uniformemente y de manera permanente (Crites y Tchobanoglous, 2000; Metcalf y Eddy, 2003); al no ser tenidas en cuenta estas recomendaciones de diseño respecto a la alimentación, en los filtros evaluados existen zonas secas donde no hay crecimiento de biomasa ó zonas donde la biomasa permanece sin irrigar, la que posteriormente se desprende, ocasionando finalmente bajas eficiencias de reducción. Los problemas observados en la alimentación se presentan la Fotografía 4.30.



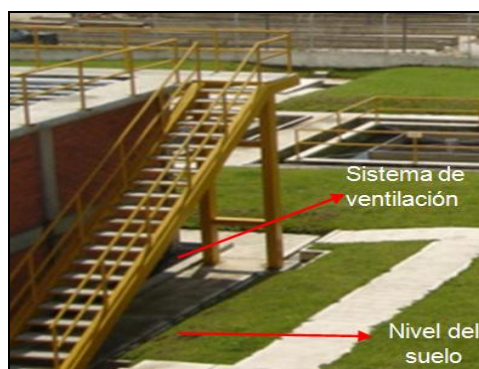
Fotografía 4.30. Problemas operacionales en la alimentación

Los filtros cuentan con un sistema de ventilación natural para garantizar las condiciones necesarias para la ocurrencia del proceso biológico aerobio. La ventilación está conformada por unas ventanas ubicadas en el perímetro inferior de las unidades que permiten el paso del aire a través del lecho filtrante (Fotografía 4.31).



Fotografía 4.31. Sistema de ventilación

Diversos autores recomiendan que las ventanas deben tener por lo menos 1m^2 de área libre preferiblemente por cada 250m^2 de área superficial del filtro y estar ubicada por encima del nivel del suelo, de manera que se garantice el paso del aire sin ningún tipo de obstrucción (Crites y Tchobanoglous, 2000; Chernicharo, 2007). De acuerdo con las recomendaciones, sólo uno de los filtros construidos presenta similitud con lo expuesto, ya que además de las ventanas ubicadas en la parte inferior, posee otras ubicadas en una plataforma desde la que se realizan labores de mantenimiento; mientras, que los otros filtros poseen problemas de ventilación por la inadecuada ubicación de las ventanas, las cuales fueron construidas por debajo del nivel suelo, por lo que el paso del aire se ve limitado. Entre los inconvenientes de una escasa o inadecuada ventilación se encuentra la aparición de insectos, organismos vectores, malos olores, muerte y desprendimiento de la biomasa y finalmente, bajos desempeños en términos de reducción de la materia orgánica. La Fotografía 4.32 presenta los problemas encontrados en la ventilación.



Fotografía 4.32. Problemas en el sistema de ventilación en el filtro percolador

El medio soporte utilizado en las PTARs evaluadas es un material comercializado internacionalmente con el nombre de Cascade filterpak YTH 1140 ó conocido nacionalmente como Rosetas; poseen un área superficial de $100\text{m}^2/\text{m}^3$. Por su porosidad favorece la fijación de las colonias de bacterias, permite la libre circulación del líquido y del aire, sin producir obstrucciones, es de fácil manipulación y muy resistente (polipropileno reciclable). El cascade filterpak ha sido evaluado por más de 10 años en el tratamiento de aguas

residuales en ambientes aerobios y anaerobios dando resultados satisfactorios; como ventaja adicional, el medio soporte esta siendo fabricando en el país, por lo que los costos de adquisición disminuyen significativamente. En la Fotografía 4.33 se enseña el medio soporte.



Fotografía 4.33. Medio filtrante o soporte

Los filtros poseen un sistema de drenaje, el cual recoge el agua tratada y los sólidos que se han separado del medio (biomasa), este sistema es importante en la recogida del efluente así, como en el paso del aire (Metcalf y Eddy, 2003), de acuerdo con la literatura para garantizar el flujo a gravedad, los sistemas de drenaje de los filtros evaluados se diseñaron con pendientes que se encuentran entre el 1 y el 2%. La Fotografía 4.34 muestra el sistema de drenaje.



Fotografía 4.34. Sistema de drenaje

La forma geométrica de los filtros de las plantas estudiadas corresponde a dos rectangulares y uno circular; acorde con lo establecido por diferentes autores, éste último es el más recomendado, ya que disminuye la formación de zonas muertas (Metcalf y Eddy, 2003; Chernicharo, 2007).

Respecto a la altura del medio soporte, se encontró que coincide con la reportada por la literatura, la cual establece como altura ideal la comprendida entre 2 y 3m (Chernicharo, 2007).

De manera general, la biomasa que se desarrolla en el medio de soporte crece y aumenta su espesor, hasta un punto donde el oxígeno y los nutrientes no llegan a las capas interiores, lo anterior ocasiona la pérdida de su capacidad de adherencia y su desprendimiento periódico, haciendo necesario la instalación de un sedimentador secundario, donde se garantiza un TRH suficiente para la sedimentación del material en suspensión (biomasa muerta). Mediante tuberías de PVC de 6" los efluentes de los filtros percoladores son descargados a unas cajas distribuidoras, para luego ser dirigidos a los sedimentadores.

En una de las PTARs fueron construidos dos sedimentadores circulares y en las otras, dos cuadrados, todos con fondo cónico. Al comparar con las recomendaciones de diversos autores (Crites y Tchobanoglous, 2000; Metcalf y Eddy, 2003), el sedimentador circular presenta afinidad con lo establecido en la literatura, la cual expone que el uso de sedimentadores circulares minimiza la aparición de zonas muertas, que generalmente se presentan en las esquinas de la estructura; por lo tanto, los de tipo cuadrado presentan éste punto crítico que demanda mayor cuidado y mantenimiento. Los sedimentadores se observan en la Fotografía 4.35.



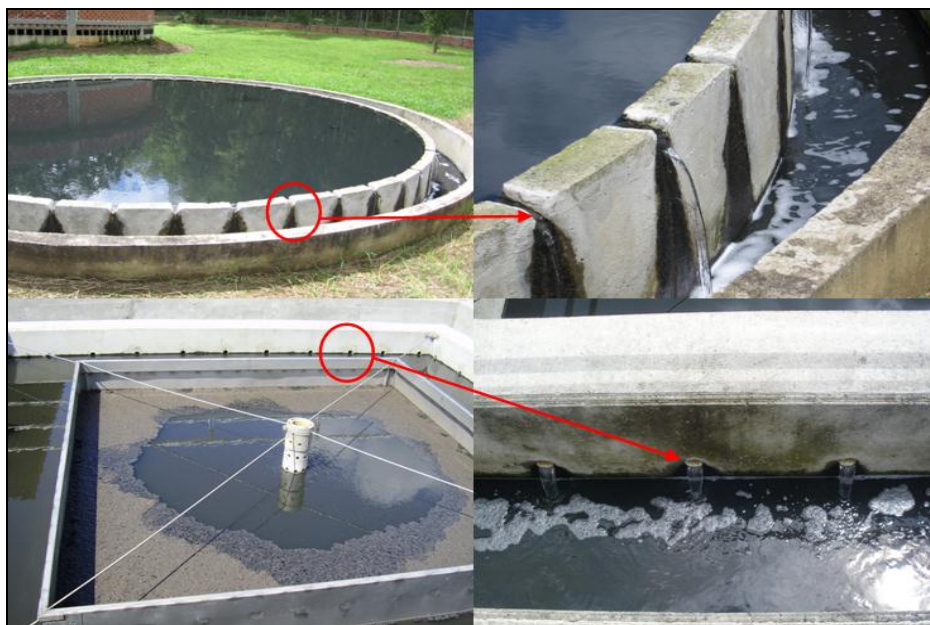
Fotografía 4.35. Sedimentadores secundarios

La alimentación a los sedimentadores se realiza por el eje central del tanque, mediante un tubo con perforaciones en la parte superior, el cual favorece una distribución radial del flujo. En la Fotografía 4.36 se presenta la estructura de entrada del caudal.



Fotografía 4.36. Alimentación de los sedimentadores

El efluente de los sedimentadores cuadrados sale por una canaleta perimetral provista de orificios con diámetros de 0.75", con un total de 80 orificios por sedimentador; mientras que el sedimentador circular recoge el efluente a través vertederos construidos en concreto. Al realizar el contraste con la literatura, la recolección mediante la utilización de vertederos es poco recomendable, ya que estos presentan particular tendencia a obstruirse básicamente por la aparición de biopelícula (Crites y Tchobanoglous, 2000). La Fotografía 4.37 enseña la recolección del efluente de los sedimentadores.



Fotografía 4.37. Recolección del efluente de los sedimentadores

Con relación a los problemas asociados a la recolección se presenta la Fotografía 4.38 en donde se observan las obstrucciones tanto en los orificios como en los vertederos, en estos últimos sucede con mayor frecuencia.



Fotografía 4.38. Obstrucciones en el sistema de recolección

Los sedimentadores fueron diseñados con TRH y alturas de aproximadamente 3h y 3m respectivamente; valores que coinciden con los reportados por Metcalf y Eddy (2003) y Chernicharo (2007). Para los autores, los diseños se definen a partir de la carga hidráulica superficial, tiempo de retención hidráulico y profundidad. La forma, la hidrodinámica (distribución del caudal) y el mantenimiento definen su desempeño. Siendo éste último otro factor de cuidado, ya que la formación de la biopelícula en los vertederos ocurre a un ritmo acelerado (limitando el paso del efluente) por lo que las actividades de mantenimiento

realizadas en las PTARs estudiadas son poco frecuentes o bajas para contrarrestar este crecimiento. Con relación a las actividades de purga de lodos en esta unidad, una vez por semana son bombeados los lodos a los lechos de secado; no obstante, según la literatura se requieren purgas frecuentes de manera que se garantice el TRH para el cual fue concebido, recomendando una purga diaria. Por lo anterior, se podrían esperar bajas eficiencias en esta unidad de tratamiento.

Los efluentes de los sedimentadores salen por una tubería con un diámetro de aproximadamente 6" y llegan a una cámara común acondicionada con un vertedero triangular con un ángulo de 90°. En las cajas recolectoras permanentemente se observan espumas, su aparición obedece principalmente a la presencia de detergentes en las aguas residuales, así como, al resalto ocurrido en la estructura. La Fotografía 4.39 presenta la cámara de salida al cuerpo receptor.



Fotografía 4.39. Cámara de salida al cuerpo receptor

Para la disposición de los lodos, fueron construidos lechos de secado y como particularidad, fueron provistos de techo y una rampa de acceso. Según van Haandel *et al.* (1999), en países tropicales el empleo de lechos de secado es la solución más factible y económica para su manejo y disposición. Fueron construidos en concreto con una profundidad útil entre los 60 y 80cm, con anchos y longitudes que oscilan entre los 3 a 6m y entre los 6 a 8m respectivamente. Los medios de drenaje están constituidos por una capa de 15 cm de ladrillo con una separación de 2 a 3cm (llena de arena); una capa de grava graduada entre 1,6 y 51mm (1/6" y 2") y los drenes generalmente están constituidos por tubos de 100mm de diámetro instalados debajo de la grava; parámetros que coinciden con los reportados por Mendonça (2000). Los períodos de secado de lodos son de aproximadamente 3 o 4 semanas, los cuales una vez deshidratados, son entregados a los agricultores o dispuestos en terrenos aledaños. En la Fotografía 4.40 se observan los lechos de secado.



Fotografía 4.40. Lechos de secado de lodos

Operación y Mantenimiento

A pesar que el reactor UASB en acompañamiento de filtros percoladores son considerados tecnologías relativamente sencillas de operar, su simplicidad no implica que no se requiera de atención en la operación y el mantenimiento. La Tabla 4.10 presenta las actividades realizadas a este tipo de tecnología.

Tabla 4.10. Actividades de mantenimiento a la tecnología de Reactor UASB seguido por filtro percolador

Reactor UASB y Filtro percolador	
Actividades a realizar	Realizadas por el Operario
Mediante un rastrillo, limpiar de manera continua las rejillas, retirando el material retenido en ellas (bolsas, papel, preservativos, tapas, trapos, etc.)	Coincide
En los desarenadores verificar su correcto funcionamiento y nivelar los vertederos de salida	Coincide
Verificar que las válvulas de las compuertas de distribución a los reactores abran y cierren completamente en las trampas de grasa	Coincide
Aproximadamente cada 2 meses se debe revisar la pintura externa del reactor, en caso de existir puntos de pérdida del revestimiento este debe ser retocado. El revestimiento interno debe ser verificado cada 2 años	Coincide
En los filtros percoladores deben ser limpiadas varias veces al día las boquillas difusoras y lavar a presión el medio filtrante cada que se requiera	Coincide (pero no con la frecuencia suficiente)
Se deben limpiar los orificios de repartición del caudal, lavar a presión la tubería de llegada y drenar el lodo acumulado en el sedimentador	Coincide
Desocupar el lecho de secado de lodo que presente taponamiento y lavar	Coincide
Llevar registros adecuados del comportamiento del proceso, el operario anota las observaciones a que se den lugar, como cambios en la temperatura, pH, presencia de olores, entre otros	No coincide
El operario o personal encargado debe mantener repuestos claves (aceite, fusibles, elementos de aseo, etc.) en cantidades tales que no se vea afectada la operación del sistema por la ausencia de estos	No coincide
Otra labor importante del funcionario es la de informar a sus superiores sobre fallas y problemas varios que se presenten en el sistema	Coincide

La mayoría de las labores de mantenimiento coinciden con las reportadas en el manual, situación que se presenta básicamente por las frecuentes capacitaciones que recibe el personal de operarios, tanto en conceptos claves, como en adiestramientos que no sólo abarcan la operación de la PTAR en condiciones normales, sino en sucesos extraordinarios. La situación descrita aplica para las PTARs de los municipios de Calima - El Darién y Riofrío; exceptuando la PTAR del municipio de Restrepo donde se encontró poco o inadecuado cuidado (mantenimiento). La ventaja que representa la coordinación de las actividades con lo expuesto en el manual, podría verse reflejado en las eficiencias que reporten las tecnologías, siempre y cuando los diseños sean adecuados.

En cuanto a la medición de caudales, se encontró que no es efectuada una medición constante por lo que no se posee un registro histórico; indicando la posible aparición de problemas operacionales relacionados al aumento o disminución de la carga hidráulica y orgánica, situación que a su vez favorece el aumento de la velocidad ascensional ocasionado entre otros arrastre de lodo, disminución del TRH y de las eficiencias de tratamiento.

Un factor crítico hallado en una de las plantas evaluadas lo constituye la variación del pH en el agua residual afluente a la PTAR. El reactor debe operar a un intervalo de pH entre 6.8 y 7.5, por que la población metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH, comparada con las demás poblaciones presentes en el lodo. Sin embargo, el pH se ha situado en valores por debajo del 6.5 disminuyendo significativamente el proceso de metanogénesis y con ello el desempeño del reactor (aumento de AGV). Este punto crítico esta estrechamente relacionado a la carencia de mediciones de rutina y del control del proceso.

Por otro lado, existe un punto que está relacionado principalmente al inadecuado mantenimiento de las redes de alcantarillado; para el caso particular de la planta de Calima-El Darién, el agua residual afluyente es altamente diluida, esto se debe básicamente a que el municipio es atravesado por varias fuentes superficiales (quebradas), que se infiltran al sistema de alcantarillado y son transportadas con el AR. De acuerdo a lo expuesto, se esperarían bajas eficiencias en los reactores y baja producción de gas; ya que si bien, la literatura reporta que los reactores anaerobios presentan mayores eficiencias cuando tratan aguas residuales concentradas.

Con relación a la carencia de mediciones de control del proceso, aunque existe espacio para la instalación de un laboratorio, no se poseen equipos ni instrumentos para realizar ningún tipo de análisis.

Las actividades de operación y mantenimiento en un reactor UASB se deben realizar a las diferentes unidades que conforman la PTAR como; preliminares, tratamiento biológico y deshidratación de lodos (Chernicharo, 2007). El autor recomienda entre las labores, actividades que permitan la estabilidad operacional del reactor, como medición y control del pH, alcalinidad o concentración de ácidos orgánicos volátiles; sin embargo, en ninguna PTAR evaluada esta actividad es realizada, obviando las caracterizaciones realizadas cada 6 meses, la cual según la literatura no es suficiente para controlar el proceso en caso de eventualidades.

De acuerdo a Chernicharo (2007), en las estructuras preliminares como rejillas, desarenador, canaletas y trampas de grasa; deben ser efectuados otro tipo de análisis y mediciones como volumen de sólidos retenidos, volumen de arena, temperatura y pH, pero esta actividad tampoco es realizada en las plantas.

Respecto a la descarga de lodo, conforme a la literatura, en las plantas evaluadas las tuberías de descarga son limpiadas con una manguera (agua a presión) y para la tubería que conduce el lodo hacia los lechos de secado u otro sistema de disposición, es lavada después de cada utilización con el rigor que se recomienda, ya que los lodos al secarse producen obstrucciones.

En ninguna PTAR que posee la tecnología evaluada, ha sido realizado mantenimiento a los lechos de secado; esto se debe principalmente a que son construcciones recientes (obviando Restrepo). El mantenimiento consiste en reemplazar la arena perdida por arena nueva y en caso que el lecho muestre tendencia a colmatarse, toda la capa de arena debe ser reemplazada.

De manera general, el efectivo control operacional de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, debe incluir la verificación de los parámetros operacionales y la optimización de rutinas a través de un programa de monitoreo. El programa debe ser amplio y suficiente que incluya todos los aspectos relevantes de operación, sin perder de vista la realidad local y la disponibilidad de recursos humanos y materiales. Como sucede en las PTARs que poseen la tecnología de lagunas de estabilización, los análisis sobre las características microbiológicas del lodo no son realizados, no se determina la presencia de patógenos como huevos de helminto, quistes de protozoarios, bacterianos y virus (Shuval, 1986; OMS, 2006). Dicho escenario supone un riesgo permanente a la población expuesta (operarios y agricultores) y de igual manera como sucede con los operadores de las lagunas, los operarios de la tecnología anaerobia no están vacunados ni tienen las herramientas necesarias para su seguridad.

4.3. Análisis de la información existente en el órgano ambiental sobre el desempeño

Una vez recopilada y depurada la información disponible, se seleccionaron los parámetros de calidad a considerar, decidiéndose que las tecnologías de lagunas de estabilización y de reactor UASB seguida de filtro percolador serían evaluadas en términos de eficiencia de reducción de DBO₅, DQO y SST.

Mediante un análisis de las variables de control de la contaminación establecidas en el decreto 1594, se comparó el funcionamiento de los sistemas de tratamiento. La Tabla 4.11 enseña lo establecido en el decreto.

Tabla 4.11. Normas de vertimiento a un cuerpo de agua (decreto 1594)

Parámetro	Usuario	
	Nuevo	Existente
pH	5 a 9 Unidades	5 a 9 Unidades
Temperatura	< 40 °C	< 40 °C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	> 80 %	> 80 %
Sólidos suspendidos (SS)	> 50%	> 80%
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	> 30%	> 80%

Los pH de salida en las lagunas evaluadas oscilan entre 6 y 8 unidades y de acuerdo con los parámetros establecidos en el decreto, se puede decir que se encuentran dentro del rango recomendado como aceptable (< 9 unidades) para la existencia del ecosistema en el cuerpo receptor (organismos acuáticos); no obstante, existe un significativo incremento que alcanza las 8 unidades, efecto que puede ser provocado por la actividad fotosintética de las algas, es decir la disociación de iones bicarbonatos del agua que al liberar el dióxido de carbono en el proceso de respiración, también libera iones hidroxilo, responsables del aumento de pH; este fenómeno sucede principalmente entre el medio día y parte de la tarde (Mendonça, 2000; Stewart, 2005).

Del mismo modo, las temperaturas de salida se encuentran acordes, con valores que van desde los 21 °C hasta valores que sobrepasan los 28 °C, con un máximo de 30°C; valor que se debe básicamente a la exposición directa del espejo del agua a los rayos del sol.

Al realizar el contraste de las eficiencias reportadas por la lagunas con las recomendadas en el decreto, se observa que la mayoría operan en condiciones de cargas hidráulicas y orgánicas superiores a las usadas históricamente para su diseño; se presume que existen conexiones erradas y crecimiento poblacional que no fue considerado en su concepción. No obstante, a pesar de las sobrecargas, la reducción de la DBO₅ y los SST es aceptable y típica de lagunas de estabilización en países tropicales (Arceivala, 1970; Mara *et al.*, 1992; Yáñez, 1992; Stewart *et al.*, 2000); concluyendo que la tecnología de lagunas de estabilización es resistente aun cuando carece de actividades adecuadas de operación y mantenimiento.

Con relación a las PTARs que poseen reactor UASB seguido de filtro percolador se observó que los pH de salida se hallan en un rango de 6 a 8 y en contraste con las recomendaciones se encuentra acorde con lo establecido por la legislación, ya que se sitúa por encima de 5 y por debajo de 9 unidades. De igual manera, la temperatura presenta similitud a lo estipulado como aceptable, puesto que oscila entre los 18 y 26°C (<40°C).

La evaluación del desempeño se realizó mediante un análisis estadístico de las variables de control de la contaminación. En la Tabla 4.12 se observa la desviación estándar con respecto a las eficiencias en la DBO₅, DQO y SST obtenidas por las PTARs.

Tabla 4.12. Desviación estándar de las eficiencias de reducción

Tipo de Tecnología	Datos	%DBO		%DQO		%SST	
		Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
<i>Reactor UASB seguido de Filtro percolador</i>	4	90,10	3,09	77,71	7,29	81,73	11,97
	10	90,07	2,38	81,58	5,41	88,37	4,39
	2	88,68	6,12	80,28	3,85	89,14	8,29
	3	89,61	0,81	79,85	1,97	86,41	4,07
<i>Lagunas de Estabilización</i>	13	81,86	9,57	74,93	7,58	83,08	8,42
	14	81,03	5,45	68,67	7,76	81,01	7,63
	11	83,66	4,06	68,79	8,56	80,18	9,08
	8	84,33	9,17	68,18	19,69	77,07	10,00
	4	82,72	1,53	70,14	3,20	80,33	2,50

Los promedios de reducción para la tecnología de reactor UASB seguida de filtro percolador son mayores con respecto a las lagunas de estabilización en todos los parámetros de control. Con el propósito de comparar los desempeños obtenidos por cada una de las tecnologías evaluadas se presentada la Figura 4.4 donde se condensan los datos de eficiencias.

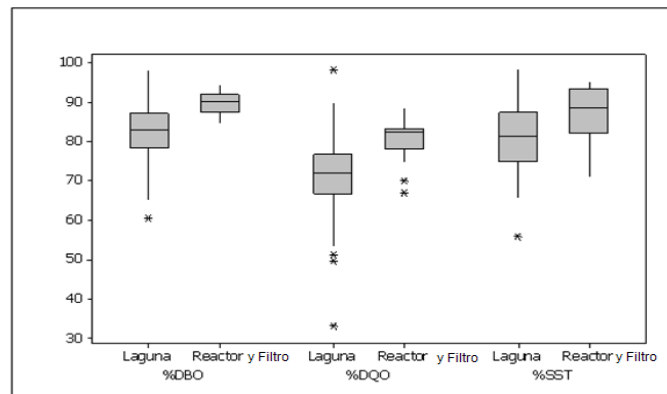


Figura 4.4. Compendio de las eficiencias de reducción en diagrama de cajas y alambres

Respecto a las eficiencias de reducción de DBO₅ y los SST se encuentran por encima del 90%, para la DQO los desempeños están por encima del valor establecido como aceptable.

Las eficiencias reportadas por las PTARs que poseen reactor UASB y filtro percolador fueron superiores en cada uno de parámetros evaluados. Adicionalmente, se aprecia que tanto la tecnología de reactor como la de lagunas obtuvieron desempeños por debajo del 80% en la reducción de la DQO.

Análisis comparativo de las tecnologías

Al no cumplir con el supuesto de normalidad y por la escasa existencia de datos, se decidió realizar un análisis comparativo de las tecnologías.

Por lo anterior, se presume que existe evidencia para suponer que la tecnología de reactor UASB seguida de filtro percolador obtiene mejores desempeños que la tecnología de Lagunas de estabilización. Para probar esta hipótesis se utilizó la prueba no paramétrica para dos poblaciones independientes de Mann-Whitney-Wilcoxon (Sprent y Smeeton, 2001). Esta prueba es equivalente a la prueba paramétrica *t*-student, la cual requiere el supuesto de normalidad en los datos.

Las metodologías no paramétricas se caracterizan por no tener este tipo de supuestos, es decir son flexibles a la ausencia de normalidad. En esencia esta prueba se basa en la metodología de la suma de los rangos de Wilcoxon y consiste en unir las dos poblaciones en una sola muestra; posteriormente se ordena de forma ascendente y se asignan los rangos. En caso de existir empates se utiliza el criterio del rango promedio; finalmente el estadístico de la prueba es la suma de los rangos correspondientes a la muestra de menor tamaño (esta prueba está disponible en el paquete estadístico MINITAB versión 14).

De manera general, la hipótesis nula a probar supone que la eficiencia de reducción promedio para un parámetro de control específico (DBO_5 , DQO ó SST) es igual para las tecnologías de reactor UASB y lagunas de estabilización, frente a la hipótesis alterna de que el promedio es mayor para la tecnología de reactor UASB.

En términos estadísticos la hipótesis se plantea de la siguiente forma:

$$H_0 : \mu_{Reactor} = \mu_{Laguna} \quad v.s. \quad H_1 : \mu_{Reactor} > \mu_{Laguna}$$

Donde μ representa la eficiencia de reducción promedio para un parámetro de control específico. En la Tabla 4.13 se observa la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon

Tabla 4.13. Prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon

Prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon		
Parámetro	Estadístico W	Valor P
<i>DBO</i>	18.00	0.026
<i>DQO</i>	18.00	0.026
<i>SST</i>	17.00	0.052

Como el nivel de significancia (α) es de 0.05 se rechaza la hipótesis nula la cual establece que existe igualdad en los desempeños reportados por ambas tecnologías para la reducción de la DBO_5 y DQO (el valor p es menor al nivel de significancia), mientras que para SST no se rechaza la hipótesis nula de igualdad.

Se puede afirmar que la tecnología conformada por el reactor UASB seguida de filtro percolador tiene un mejor desempeño que la tecnología de lagunas de estabilización en cuanto a la eficiencia de reducción de DBO_5 y la DQO.

Cabe resaltar que los desempeños en la reducción de los SST es el mismo, esto se debe básicamente a que los sólidos se resuspenden cuando el reactor se desestabiliza, por lo que

se corre el riesgo de salir con el efluente. A diferencia de las lagunas, el reactor obtiene niveles de reducción aceptables con poca influencia de la operación del proceso.

4.4. Definición de puntos críticos

4.4.1. Puntos críticos de la tecnología de lagunas de estabilización

Los puntos críticos relacionados con el diseño y construcción y con la operación y mantenimiento hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.14 y 4.15.

Tabla 4.14. Puntos críticos del diseño y la construcción de las lagunas de estabilización

<i>Aspecto crítico</i>	<i>Características</i>
Canal de desvío	Su ausencia genera aumento de la carga hidráulica, disminución del tiempo de retención y disminución del volumen útil (acumulación de sedimentos)
Dispositivo de medición de caudales	La canaleta Parshall constituye el dispositivo de medición utilizado en la totalidad de las lagunas evaluadas; no obstante, este dispositivo es muy sensible a la acumulación de sedimentos (distorsión en la medición); además la mayoría presentan problemas de calibración básicamente por el material en que fueron construidos (concreto), por lo anterior, no se posee registro histórico de caudales (no medición)
Desarenadores (sin compuerta o estructura de sellado)	Ausencia de dispositivos que permitan garantizar una velocidad constante y adecuada a pesar de la variación del caudal; sin estos dispositivos el desarenador no cumple su función de retenedor de arenas o puede generar una acumulación excesiva de materia orgánica. Así mismo, por la carencia de compuertas se presentan dificultades en el mantenimiento
Estructuras de entrada y salida en las lagunas	La ubicación no corresponde con las recomendaciones, ya que propician la formación de zonas muertas, cortos circuitos, disminución del volumen útil, afectando las eficiencias de reducción
Dispositivos para remoción de lodos	La carencia de rampas de acceso genera a la hora de realizar labores de mantenimiento daños en los taludes de las lagunas y en el revestimiento (difícil acceso de maquinaria)
Cercas	La no instalación de rejas o cercos permite la entrada de animales que dañan los taludes
Taludes (sin revestir)	La ausencia de revestimiento favorece el crecimiento de plantas, la erosión a causa de las olas generadas por el viento
Dispositivos de descarga del efluente	Su ubicación propicia la formación de espumas en el cuerpo receptor

Tabla 4.15. Puntos críticos en las actividades de operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización

<i>Aspecto crítico</i>	<i>Características</i>
Medición de caudales	La no medición dificulta el monitoreo y el control del proceso (desempeños), por otro lado, no es posible determinar la presencia de infiltraciones ni la capacidad de carga
Sobrecargas	La ausencia de monitoreo con relación a las cargas de operación ocasiona que las cargas superficiales se encuentran entre los 300 y 800 kg DBO/ha.d; lo que resulta en sobrecargas que generan entre otros: malos olores, insectos, roedores y bajos desempeños
Limpieza de sobrenadantes	Inadecuadas labores de mantenimiento (forma y frecuencia) propician la aparición de natas, olores indeseables y de insectos. Para el caso de las lagunas facultativas, se podrían presentar bajas eficiencias por que el paso de luz se vería restringido (transferencia de oxígeno)
Deslode	La falta de deslode genera disminución del volumen útil, cortos circuitos, disminución del tiempo de retención y bajos desempeños
Limpieza laderas	Las malezas retiradas son arrastradas por la lluvia a la laguna aportando carga orgánica

4.4.2. Puntos críticos de la tecnología de reactor UASB y filtro percolador

Los puntos críticos relacionados con el diseño y construcción y con la operación y mantenimiento hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.16 y Tabla 4.17.

Tabla 4.16. Puntos críticos del diseño y la construcción de los Reactores UASB y filtro percolador

<i>Aspecto crítico</i>		<i>Características</i>
Ubicación PTAR		Una de las PTARs fue construida en un sitio susceptible a inundaciones, situación que genera un alto grado de vulnerabilidad al sistema
Entrada PTAR		El espacio reducido en la entrada genera inconvenientes en el ingreso de equipos o maquinaria pesada a la hora de realizar actividades de mantenimiento
Rejillas gruesas		Su forma (canasta de limpieza manual) propicia el paso de material suspendido en el momento de hacer limpieza y mantenimiento
Distribución del caudal en el reactor UASB		El uso de tuberías perforadas, ocasiona problemas relacionados con constantes obstrucciones; entre los inconvenientes se encuentra la formación de zonas muertas, cortos circuitos, disminución del volumen del lodo activo y finalmente bajas eficiencias
Recolección del efluente en el reactor UASB		La recolección del efluente mediante el uso de canaletas con vertederos triangulares genera inconvenientes por las constantes obstrucciones
Separador	Gas, Sólido, Líquido	Diseños poco claros respecto al separador de fases GSL, pueden estar presentando problemas operacionales inherentes a su diseño y construcción; como pérdida de biogás, contaminación atmosférica por escape de CH ₄ , H ₂ S y CO ₂ , , corrosión y olores; arrastre de lodo activo (burbujeo propio del proceso anaerobio) y finalmente bajos desempeños
Recolección y quemado del biogás		Diseños inadecuados de las tuberías de conducción ocasionan que el agua residual se filtre y salga del reactor con el biogás. Los medidores de biogás se encuentran deteriorados por el inapropiado material con el que fueron construidos
Filtro		Su geometría rectangular no favorece un adecuado funcionamiento hidráulico
Distribución del caudal en el filtro		La alimentación a través de tubería fija, presenta problemas relacionados con la obstrucción de los orificios de distribución como inadecuada o nula humectación del medio de soporte y finalmente bajos desempeños
Ventilación en el filtro		La inadecuada o insuficiente aireación ocasiona la aparición de insectos, organismos vectores, malos olores, muerte con desprendimiento de la biomasa y bajas eficiencias
Sedimentador final		Su geometría cuadrada favorece la aparición de zonas muertas
Recolección del efluente en el sedimentador		Vertederos en concreto son propensos a sufrir obstrucciones

Tabla 4.17. Puntos críticos en las actividades de operación y mantenimiento de los Reactores UASB y filtro percolador

Aspecto crítico		Características
Medición de caudales		La ausencia de mediciones ocasiona aumentos o disminución de la carga hidráulica y orgánica, aumento de la velocidad ascensional, arrastre de lodo, disminución del TRH, afectando la eficiencia de reducción
Seguimiento del funcionamiento sistema	del	La carencia de monitoreos no permite controlar el proceso, por lo que los desempeños se ven afectados considerablemente
Purga de lodos en el sedimentador	en el	Las actividades de purga de lodos no son realizadas con una frecuencia adecuada, por lo que se podría estar presentando descomposición del lodo sedimentado y como consecuencia bajas eficiencias

4.5. Estrategias de optimización de las PTARs

4.5.1. Estrategias de optimización de la tecnología de lagunas de estabilización

Las estrategias relacionadas con el diseño y construcción hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Estrategias de optimización del diseño y la construcción de las lagunas de estabilización

Aspecto crítico	Estrategias de optimización
Canal de desvío	Para proteger las lagunas de la introducción de sobrecargas, el operador debe desviar el flujo hacia la unidad de descarga de emergencia. De acuerdo con lo anterior, resulta imperante la construcción de paso directo o canales de desvío, ya que el aumento del caudal disminuye el TRH y el volumen útil de la laguna por el arrastre de sólidos sedimentables
Dispositivo de medición de caudales	Se propone instalar un dispositivo que controle la velocidad del agua en la unidad (permitan la sedimentación del material), así, como compuertas que faciliten las labores de mantenimiento; recomendando el vertedero sutor como un dispositivo adecuado
Desarenadores (sin compuerta o estructura de sellado)	Rediseñar las entradas y las salidas correctamente y en sentido contrario a la dirección de los vientos predominantes, de manera que se evite la formación de zonas muertas, cortos circuitos, disminución del volumen útil, afectando las eficiencias de reducción
Estructuras de entrada y salida en las lagunas	Se recomienda construir rampas de acceso (principalmente a la laguna anaerobia), de manera que se facilite la remoción de los lodos recuperando el volumen útil de las lagunas y con ello su capacidad de tratamiento
Dispositivos para remoción de lodos	Cerrar las instalaciones con cercas
Cercas	Se debe incluir un revestimiento de concreto en la orilla; el borde libre del revestimiento debe cubrir el nivel de agua en ambas temporadas (lluvia, estiaje) y el talud interior debe tener una relación de 3/1 (horizontal/vertical)
Taludes (sin revestir)	La manera más apropiada para controlar la producción de espuma es a través del uso de dispositivos que descargan abajo el nivel de agua
Dispositivos de descarga del efluente	

El paso de material suspendido no retenido en las rejillas ocasiona un sinnúmero de problemas operacionales al interior de las lagunas, entre los inconvenientes se encuentra la formación de natas, aparición de malos olores y disminución del volumen útil, entre otros. Por lo anterior, se recomienda la reposición de las rejillas que se encuentra deterioradas (rotas), manteniéndolas a través del tiempo (limpieza, recubrimiento epóxico), de manera

que se garantice la retención de los sólidos y la minimización de los problemas operacionales.

La mayoría de las lagunas presentan taludes sin revestir los cuales favorecen el crecimiento de plantas y la erosión por la acción de olas (vientos). El operador deberá inspeccionar una vez por semana el estado de los taludes para verificar si ha ocurrido algún asentamiento o erosión. Los daños deben ser reparados con material arcilloso y cubierto con el césped protector en el talud exterior y con el revestimiento en el talud interior. En la Figura 4.5 se enseña el diseño del talud recomendado.

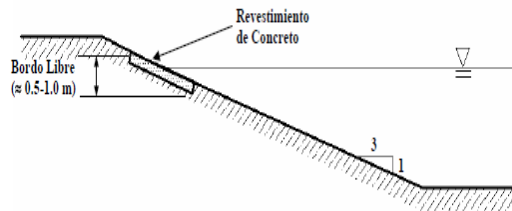


Figura 4.5. Revestimiento adecuado (Stewart, 2005)

Las estrategias relacionadas con la operación y mantenimiento hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Estrategias de optimización de las actividades de operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización

<i>Aspecto crítico</i>	<i>Estrategias de optimización</i>
Medición de caudales	Se recomienda instalar un vertedero sutor, ya que garantiza una velocidad constante, además de permitir la medición de caudal en la PTAR
Sobrecargas	Respecto a las actividades de operación y mantenimiento, es sabido que la no medición de caudal dificulta el monitoreo, así como también, el control del proceso (cargas de operación), siendo importante en esta actividad poseer operarios capacitados y contar con los equipos y herramientas necesarias, por lo que se demanda un mayor compromiso por parte de las entidades encargadas
Limpieza de sobrenadantes	La remoción de material flotante en las lagunas (causa malos olores y zonas propicias para la proliferación de insectos) debe hacerse diariamente o cuando sea necesario para que no se extiendan demasiado sobre el área superficial. El operador necesitará un desnatador y una carretilla para la limpieza de natas; estos desechos deben ser enterrados en el mismo lugar en donde se entierran los sólidos del desarenador y de la rejilla
Deslode	Se debe establecer una frecuencia de limpieza de lodos removiéndolos cuando el volumen se aproxime al 25% del volumen de la laguna (Mara et al., 1992; Nelson et al., 2004). De igual manera, se recomienda construir rampas de acceso (principalmente a la laguna anaerobia), de manera que se facilite la remoción de los lodos recuperando el volumen útil de las lagunas y con ello su capacidad de tratamiento
Limpieza laderas	Retirar de manera permanente el material podado existente en las laderas de las lagunas

De igual forma, el césped no debe llegar hasta el borde del agua. El operador debe mantener una faja limpia de al menos 20cm por encima del borde del agua. La maleza debe ser retirada, secada al aire y quemada o enterrada. Se debe presentar atención especial al surgimiento de jacintos y lemnas, esta última aparece al ser arrastrada por el viento o por aves; la labor del operador es removerlas tan rápido como sea posible antes que cubran toda la superficie de la laguna.

Con relación a los dispositivos de descarga, la manera más apropiada para controlar la producción de espuma es a través del uso de dispositivos que descargan abajo el nivel de agua. Por lo anterior se recomienda mejorar los dispositivos sugiriendo como la forma más apropiada el esquema que se presenta en la Figura 4.6.

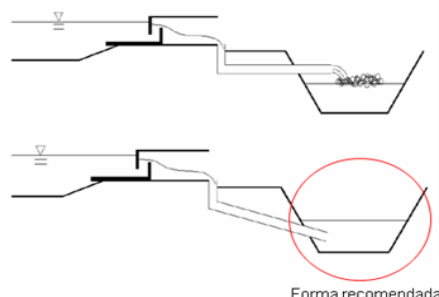


Figura 4.6. Tipos de descarga de agua residual (Adaptado de Stewart, 2005)

La proliferación de mosquitos, moscas, otros insectos y roedores debe ser nula si se ha cumplido con la tarea de enterrar todo lo relacionado con el material flotante y el material orgánico. Los mosquitos y otros insectos pueden ser controlados manteniendo limpias y sin vegetación las márgenes de las lagunas. En caso que los mosquitos depositen sus huevos encima del revestimiento, se debe bajar el nivel del agua para solucionar este inconveniente.

La observación de la apariencia y la detección de malos olores resulta importante a la hora de conocer el grado de funcionamiento de las lagunas. El operador debe estar pendiente de los olores y los colores que sean extraños a los que deben existir normalmente. Según Stewart (2005), el control del olor en las lagunas anaerobias se puede lograr de la siguiente manera:

- Aumentando el pH hasta 8, de modo que la mayor parte del sulfuro formado por la reducción bacteriana de sulfato exista en la forma de ion inodoro bisulfuro (HS^-). La corrección del pH puede hacerse mediante la aplicación de polvo calcáreo, de cal o de nitrato de sodio (NaNO_3), durante un tiempo suficiente para que surja la fermentación metanogénica
- Recirculando el efluente de la laguna facultativa hacia la entrada de la laguna anaerobia, en la proporción de 1 a 4 hasta 1 a 6 (un volumen del efluente final para 4 a 6 volúmenes del efluente crudo)

De manera general, para efectuar las labores de operación y mantenimiento de una manera eficiente, se debe contratar a un operador de tiempo completo. Cada instalación también necesitará un vigilante (principalmente en la noche) y un ingeniero supervisor de tiempo parcial (INAA, 1996).

4.5.2. Estrategias de optimización de la tecnología de reactor UASB y filtro percolador

Las estrategias relacionadas con el diseño y construcción hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Estrategias de optimización del diseño y la construcción de los Reactores UASB y filtro percolador

<i>Aspecto crítico</i>		<i>Estrategias de optimización</i>
Ubicación PTAR		De acuerdo a la disponibilidad de área, las plantas deben
Entrada PTAR		construirse en sitios que propicien el adecuado
Rejillas gruesas		Las rejillas gruesas móviles deben ser sustituidas por rejillas fijas, ya que al realizar la limpieza y mantenimiento existe paso de material suspendido
Distribución del caudal en el reactor UASB		Referente a la alimentación de los reactores UASB, como medida para mejorar los desempeños (disminución de zonas muertas, cortos circuitos, volumen del lodo activo), se recomienda distribuir el caudal uniformemente, construyendo una caja de distribución provista de vertederos y tubos distribuidores por los cuales se reparte el caudal al interior del reactor
Recolección del efluente en el reactor UASB		Como estrategia de optimización de la recolección del efluente del reactor, se recomienda que esta se realice mediante el uso de tubería y sobre ella un accesorio en forma de T, ya que la experiencia práctica ha demostrado que el uso de este tipo de dispositivo favorece la recolección uniforme del efluente sin problemas de obstrucción, contrario a lo que sucede con las canaletas con vertederos triangulares
Separador Gas, Sólido, Líquido		Como estrategia de optimización se recomienda que a la hora de diseñar se tengan claros los procesos que son llevados a cabo en la unidad, así como los conceptos claves con relación al tratamiento anaerobio (condiciones ambientales, inhibidores, etc.)
Recolección y quemado del biogás		Las tuberías de conducción de biogás deben reubicarse, ya que si bien, se evidencia la pérdida de agua residual. Se recomienda además, que los medidores se reinstalen en un material resistente puesto que no es posible contabilizar el biogás; la importancia de este subproducto radica en su alta capacidad energética y según la literatura el mantenimiento de la planta podría ser más económico, permitiendo en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las PTARs
Distribución del caudal en el filtro		Para mejorar la distribución del afluente y consecuentemente, los desempeños de los filtros percoladores, se recomienda la instalación de un sistema de distribución móvil que favorezca la repartición homogénea del afluente y minimice la aparición de zonas muertas
Ventilación en el filtro		Proveer los filtros de más ventanillas de aireación, puesto que los construidos no poseen la ventilación suficiente para el desempeño ideal de la unidad, además deben ser construidos a nivel del suelo de manera que no existan obstáculos que impidan el paso libre del aire por todo el medio filtrante
Sedimentador final		Se debe acoplar en los vertederos triangulares un baffle o pantalla que retenga el material flotante que ocasiona obstrucciones en la salida. Con relación a la geometría, los de tipo cuadrado constituye un problema, ya que propician la aparición de zonas muertas, estableciendo por lo tanto que sedimentadores cuadrados no deberían ser construidos
Recolección del efluente en el sedimentador		

Referente a la alimentación de los reactores UASB, en la Figura 4.7 se presentan las cajas de distribución y los tubos distribuidores recomendados por la literatura.

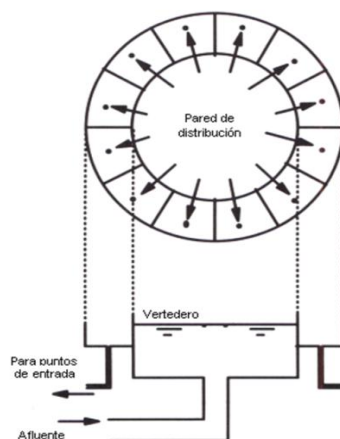


Figura 4.7. Dispositivo de distribución del afluente (van Haandel y Lettinga, 1994, Chernicharo, 2007)

Las estrategias relacionadas con la operación y mantenimiento hallados en la tecnología se presentan en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Estrategias de optimización de las actividades de operación y mantenimiento de los Reactores UASB y filtro percolador

<i>Aspecto crítico</i>		<i>Estrategias de optimización</i>
Medición de caudales		Deben mantenerse conservados los dispositivos de medición de caudales, requiriendo mayor compromiso por parte de las entidades encargadas
Seguimiento del funcionamiento del sistema	del del	Contar con operarios capacitados y con los equipos y herramientas necesarias, por lo que se demanda un mayor compromiso por parte de las entidades encargadas
Purga de lodos en el sedimentador		Se recomienda acoplar en los vertederos triangulares un baffle o pantalla que retenga el material flotante que ocasiona obstrucciones en la salida. Con relación a la geometría, los de tipo cuadrado constituye un problema, ya que propician la aparición de zonas muertas, estableciendo por lo tanto que sedimentadores cuadrados no deberían ser construidos

De manera general, es importante disponer de un espacio para la instalación de un laboratorio, que permita realizar análisis de rutina (caudal, pH, cargas, temperatura, eficiencias, etc.) así como monitoreos frecuentes para el seguimiento del proceso y para actuar en caso de eventualidades.

5. CONCLUSIONES

Analizar el comportamiento de las PTARs y saber si están o estarán sobrecargadas, resulta difícil cuando no se posee un registro de los caudales. Lo anterior conlleva a reflexionar que una actividad tan fundamental aun no se lleve a cabo en las PTARs, requiriendo por lo tanto compromiso de todos los sectores involucrados con el financiamiento y regulación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Los resultados de la investigación evidencian que la acumulación de lodos es un problema muy serio, especialmente en las lagunas anaerobias; esto se debe entre otros a las condiciones de los municipios del Departamento del Valle del Cauca, donde hay pocos recursos para la operación y el mantenimiento.

Los criterios considerados para la evaluación de los sistemas de tratamiento biológico, permiten concluir que las lagunas de estabilización son capaces de soportar cargas orgánicas significativamente mayores a las normalmente aplicadas, sin desmejorar sustancialmente la eficiencia de reducción de la materia orgánica, objetivo central de su funcionamiento.

Con relación al reactor UASB, debe prestarse especial atención a la distribución homogénea del flujo en el fondo del reactor y a su velocidad ascensional a través del lecho de lodos.

A pesar de las limitaciones halladas con relación al diseño, construcción y actividades de operación y mantenimiento, las tecnologías adoptadas se consideran aceptables para las condiciones ambientales del Departamento, además de que alcanzan un buen de eficiencia. Se presume que otras tecnologías de tratamiento no podrían funcionar con tanto éxito como las lagunas y la configuración de reactor UASB seguido de filtro percolador; no obstante, se precisa mayor atención a la hora de diseñar y mantener las PTARs de manera que se garantice el adecuado desempeño del sistema.

Los resultados obtenidos validan la necesidad de realizar investigaciones posteriores que analicen el desempeño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales; el escaso número de datos disponibles, el escaso seguimiento y control hallados en el momento de la investigación, limitaron el efectuar un análisis más profundo del funcionamiento de las PTARs.

ANEXOS

Formato encuestas o listas de chequeo

Lagunas de estabilización

FUENTE	INFORMACION	OBSERVACIONES
	Periodo de diseño	
	Fecha de arranque	
	Eficiencia de reducción de diseño (DBO,SS, DQO)	
	Quien opera	
	Grado de escolaridad	
	Quien mantiene	
	Grado de escolaridad	
	Población de diseño	
	Caudal de diseño	
	Caudales de operación (medios - máximos)	
	Tipo de tratamiento (descripción)	
	Frecuencia de mantenimiento (cada unidad)	
	Manejo de lodos (tratamiento y disposición de cada unidad)	
	Aprovechamiento de subproductos (biogás, lodo, AR)	
	Impactos ambientales (olores, roedores, vectores)	
	Quejas de la comunidad	
	Estructuras de paso directo	
	Tanque de igualación u homogenización	
	Obras de ampliación o modificación	
	Eficiencias de reducción operación en cada unidad de tratamiento (DBO, SS, DQO)	
	Tanque de igualación u homogenización	
	<i>Tratamiento preliminar</i>	
	Rejas (diámetro, espacio entre barras)	
	Naturaleza del material retenido (disposición final)	
	Mantenimiento (manual o mecánico)	
	<i>Laguna anaerobia</i>	
	Profundidad, tiempo de retención, caudal	
	Estructuras de entrada y salida (ubicación respecto a la dirección predominante del viento)	
	Area	
	<i>Laguna facultativa</i>	
	Profundidad, tiempo de retención, caudal	
	Estructuras de entrada y salida (ubicación respecto a la dirección predominante del viento)	

Reactor UASB y filtro percolador

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN EL VALLE DEL CAUCA

FUENTE	INFORMACION	OBSERVACIONES
	Periodo de diseño	
	Fecha de arranque	
	Cuanto duro el periodo de arranque	
	Origen del inoculo	
	Volumen de inoculo	
	Características del inoculo (concentración de sólidos, Actividad metanogénica)	
	Eficiencia de reducción de diseño (DBO,SS, DQO)	
	Quien opera	
	Grado de escolaridad	
	Quien mantiene	
	Grado de escolaridad	
	Población de diseño	
	Caudal de diseño	
	Caudales operación (medios - máximos)	
	Tipo de tratamiento (descripción)	
	Frecuencia de mantenimiento (cada unidad)	
	Manejo de lodos (tratamiento y disposición de cada unidad)	
	Aprovechamiento de subproductos (biogás, lodo, AR)	
	Impactos ambientales (olores, roedores, vectores)	
	Quejas de la comunidad	
	Estructuras de paso directo	
	Tanque de igualación u homogenización	
	Obras de ampliación o modificación	
	Eficiencias de reducción operación en cada unidad de tratamiento (DBO, SS, DQO)	
	<i>Tratamiento preliminar</i>	
	Rejas (diámetro, espacio entre barras)	
	Naturaleza del material retenido (disposición final)	
	Mantenimiento (manual o mecánico)	
	<i>Desarenador</i>	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Frecuencia de mantenimiento	
	Volumen de arena retirada	
	<i>Reactor UASB</i>	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Tiempo de retención, caudal	
	Temperatura, Ph	
	Velocidad ascensional del Caudal	
	Producción de biogás	
	Frecuencia de purga de lodos (mantenimiento)	
	Forma de purga de lodos	
	Volumen de lodo retirado	
	Duración de la purga de lodo	
	<i>Filtro Percolador</i>	
	Tipo de medio soporte	
	Configuración (rectangular, circular)	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Distribución (bombeo, gravedad)	
	Bombeo (entrada, salida, etc)	
	Distribuidor (rotatorio, tuberías fijas)	
	Sistema de drenaje (altura)	
	Carga hidráulica – orgánica	
	Tiempo de retención, caudal	
	Profundidad	
	Presencia de moscas	
	<i>Sedimentador secundario</i>	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Frecuencia de mantenimiento	
	Volumen retirado	
	<i>Lechos de secado</i>	
	Características (tipo de medio)	
	Dimensiones	
	Tiempo de retención	
	Humedad (%)	
	pH	

Tanque séptico y filtro anaerobio

FUENTE	INFORMACION	OBSERVACIONES
	Fecha de construcción	
	Periodo de diseño	
	Fecha de arranque	
	Cuanto duro el periodo de arranque	
	Origen del inoculo	
	Volumen de inoculo	
	Características del inoculo (concentración de sólidos, Actividad metanogénica)	
	Eficiencia de reducción de diseño (DBO,SS, DQO)	
	Quien opera	
	Grado de escolaridad	
	Quien mantiene	
	Grado de escolaridad	
	Población de diseño	
	Caudal de diseño	
	Caudales operación (medios - máximos)	
	Tipo de tratamiento (descripción)	
	Frecuencia de mantenimiento (cada unidad)	
	Manejo de lodos (tratamiento y disposición de cada unidad)	
	Aprovechamiento de subproductos (biogás, lodo, AR)	
	Impactos ambientales (olores, roedores, vectores)	
	Quejas de la comunidad	
	Estructuras de paso directo	
	Tanque de igualación u homogenización	
	Obras de ampliación o modificación	
	Eficiencias de reducción operación en cada unidad de tratamiento (DBO, SS, DQO)	
	<i>Tratamiento preliminar</i>	
	Rejas (diámetro, espacio entre barras)	
	Naturaleza del material retenido (disposición final)	
	Mantenimiento (manual o mecánico)	
	<i>Tanque séptico</i>	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Caudal, tiempo de retención	
	Frecuencia de mantenimiento	
	Forma de mantenimiento	
	Volumen de material retirado	
	<i>Filtro Anaerobio</i>	
	Dimensiones (volumen, área, profundidad)	
	Tiempo de retención, caudal	
	Tipo de medio soporte	
	Configuración (rectangular, circular)	
	Frecuencia de purga de lodos (mantenimiento)	
	Forma de purga de lodos	
	Volumen de lodo retirado	
	Duración de la purga de lodo	

Calidad del efluente

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Toro

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Toro	Marzo 11 de 1999	98,10	98,10	98,10	6,03	6,04	24	22
	Mayo 9 de 2001	85,50	69,20	74,60	7,02	7,05	23	24
	Junio 20 de 2002	78,00	33,00	72,00	7	6,05	24	23
	Octubre 1 de 2006	85,50	76,10	74,80	7,50	7,80	24,00	28,00
	Febrero 11 de 2005	90,00	74,00	76,00	7,17	7,53	24	24
	Febrero 15 de 2007	66,90	49,50	69,00	6,83	6,93	20	22
	Julio 30 de 2008	82,25	79,55	84,75	7,00	7,00	22	22
	Marzo 20 de 2009	88,36	65,97	67,27	No hay datos			

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de La Unión

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
La Unión	Abril 15 de 99	93,00	81,30	87,30	6,03	8,02	22	22
	Enero 27 de 2000	77,00	74,80	83,00	6,09	7,00	24,00	24,00
	Junio 6 de 2001	76,00	67,03	75,00	7,01	7,01	22	24
	Mayo 3 de 2002	87,00	56,00	70,00	7	7	26	25
	Junio 7 de 2002	81,00	60,00	67,00	7,05	7	24	22
	Julio 18 de 2003	79,00	69,00	79,00	7,05	7,32	22	22
	Enero 14 de 2004	75,00	74,00	85,00	6,89	7,1	24	22
	Marzo 24 de 2004	81,00	67,00	87,00	6,99	7,22	21	21
	Febrero 10 de 2005	75,00	76,00	91,00	7,39	7,45	24,00	22,00
	Febrero 24 de 2006	78,20	72,70	82,80	7,29	7,49	25,00	25,00
	Octubre 1 de 2006	85,70	70,60	71,50	7,00	7,60	24,00	30,00
	Mayo 4 de 2007	82,90	69,20	89,20	7,11	7,18	22,00	26,00
	Noviembre 24 de 2008	76,59	70,52	78,99	7,20	7,02	26	28

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Roldanillo

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Roldanillo	Julio 10 de 1998	84,00	67,00	84,00	7	7,6	26	23
	Septiembre 17 de 1999	78,00	60,00	86,00	6,09	7,03	26	23
	Mayo 17 de 2001	82,40	73,29	80,00	7,36	7,25	24	23
	Mayo 9 de 2002	81,00	78,00	80,00	6,05	6,05	24	23
	Marzo 11 de 2004	86,00	67,00	82,00	7,13	7,19	25	24
	Febrero 11 de 2005	90,00	77,00	88,00	7,01	7,29	22	22
	Marzo 3 de 2006	91,20	66,70	81,40	7,19	7,21	23,00	24,00
	Octubre 1 de 2006	80,3	80,5	55,9	6,50	7,20	25,00	30,00
	Febrero 16 de 2007	80,50	64,50	89,20	6,84	7,12	20,00	20,00
	Febrero 28 de 2008	83,40	51,20	81,50	7,16	7,15	22,00	22,00
	Marzo 19 de 2009	83,46	71,54	74,01	No hay datos			

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Guacarí

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN EL VALLE DEL CAUCA

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura (°C)	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Guacarí	Febrero 26 de 1999	90,00	90,00	76,00	7,04	7,04	22,00	22,00
	Enero 21 de 2000	65,20	80,40	90,00	7,03	7,03	24,00	26,00
	Octubre 4 de 2000	79,30	76,20	87,20	7,00	6,08	24,00	22,00
	Mayo 9 de 2001	86,28	77,47	89,00	7,2	7,42	23	22
	Mayo 10 de 2002	87,00	81,00	91,00	6,05	6,05	20	25
	Julio 17 de 2003	95,00	72,00	79,00	7,07	7,18	22	23
	Marzo 19 de 2004	83,00	78,00	90,00	6,99	6,88	20	22
	Febrero 10 de 2005	83,00	76,00	94,00	6,96	7,31	21	24
	Marzo 2 de 2006	83,30	73,50	75,50	7,30	7,39	24,00	26,00
	Octubre 1 de 2006	60,40	76,60	65,50	7,50	7,90	25,00	26,00
	Noviembre 2 de 2007	88,10	63,80	80,00	6,94	7,29	22,00	22,00
	Noviembre 25 de 2008	85,48	68,16	87,5	6,87	6,49 - 6,86	27	25,7 - 28
	Febrero 26 de 2009	78,16	61,01	75,4	No hay datos			

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Restrepo

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Restrepo	Enero 21 de 2000	89,20	85,50	87,40	7,02	7,09	19	19
	Mayo 22 de 2003	86,00	81,10	81,80	6,07	7,02	18	18
	Noviembre 13 de 2003	86,00	82,00	87,00	6,85	6,85		
	Julio 28 de 2004	92,00	85,00	94,00	7,61	7,83	20	18
	Febrero 17 de 2005	92,00	83,00	87,00	6,84	7,66	20	20
	Agosto 12 de 2005	91,00	83,00	91,00	6,83	7,73	20	20
	Enero 27 de 2006	90,20	88,40	81,40	6,68	7,24	18,00	20,00
	Octubre 4 de 2007	92,00	74,60	94,10	6,97	7,80	19,00	19,00
	Marzo 13 de 2009	92,27	83,23	90,00	No hay datos			
	Noviembre 26 de 2009	90,00	70,00	90,00	7,00	7,01	25,00	26,20

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Calima – El Darién

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Calima	Noviembre 1 de 2006	86,70	79,30	90,10	6,53	6,66	17,00	17,00
	Octubre 3 de 2007	94,20	82,90	93,90	7,04	7,70	18,00	18,00
	Febrero 20 de 2009	89,51	81,62	71,91	No hay datos			
	Noviembre 19 de 2009	90,00	67,00	71,00	6,81	7,41	25,00	24,00

Registro histórico de eficiencias de reducción de la PTAR del municipio de Riofrío

MUNICIPIO	Fecha	%DBO	%DQO	%SST	pH		Temperatura	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
Riofrío	Febrero 29 de 2008	93,00	83,00	95,00	7,14	7,92	22,00	22,00
	Marzo 19 de 2009	84,35	77,55	83,27	No hay datos			

BIBLIOGRAFIA

- ALAERTS, G.J., VEENSTRA, S., BENTVELSEN, M. AND VAM DUIJL, L.A. (1993). Feasibility of Anaerobic Sewage treatment in sanitaria strategies in Developing Countries. *Water. Sci. Tech.* 27 (1), 179-186.
- ANH, N.V., NHUE, T.D., HEINSS, T.H., MOREL, U., MOURA A., SCHERTENLEIB, R. (2002). Decentralized wastewater treatment the new concept and technologies for Vietnamese conditions. 5th Specialized Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems Istanbul (Turkey). Pag 24–26.
- AHMED, W., NELLER, R., KATOULI, M. (2005). Evidence of septic system failure determined by a bacterial biochemical fingerprint method. *Journal of Applied Microbiology*. Pag 10: 910–920.
- ARAGÓN, F. (1999) selección de tecnología sostenible par la disposición de aguas residuales en la vereda de Juanchaco. Universidad del Valle. Facultad de ingeniería civil. Cali (Colombia).
- ARCEIVALA, S.J. (1970). Waste Stabilization Ponds: Design, Construction & Operation in India, Central Public Health Engineering Research Institute, Nagpur (India).
- ARCEIVALA, S.J. (1981). Wastewater Treatment and Disposal: Engineering ang ecololy in pollution control. Marcel Dekker, Inc. Nueva York.
- ARTHUR, J.P. (1983). Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries, Technical Paper No. 7, The World Bank, Washington, D.C.
- BECERRA, N.E. (2001). Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. *Revista Ingeniería hidráulica y ambiental*. Vol 22, Nº 4.
- BERNAL, D.P., CARDONA, D.A. (2003). Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una metodología con énfasis en aspectos tecnológicos. Tesis pregrado Ingeniería sanitaria y ambiental. Facultad de ingeniería. Universidad del Valle. Cali (Colombia).
- BID, Banco Interamericano de Desarrollo por Ritchie A. S. (2008). Iniciativa de agua potable y saneamiento.
- BILLORE, S.K., SINGH, N., SHARMAN, J.K., DASS, P., NELSON, R.M. (1999). “Horizontal subsurface flow gravel bed constructed wetlands with phragmites karka in central India”, *Journal Water Science and Technology*. Vol 40, Pag 163–171.
- BORZACCONI, L., LÓPEZ, I. (1994). Revelamiento de Reactores Anaerobios en América Latina. III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". Montevideo (Uruguay). Pag 263-279.
- BORZACCONI, L., VIÑAS, M. (1996). Application of Anaerobic Digestion to the Treatment of Agricultural Effluents in Latin America. *Journal Water Science Technology*. Pag 32 (6): 105–111.

BRADLEY, R.B., DAIGGER, G.T., RUBIN, R., TCHOBANOGLOUS, G. (2002). Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Pag 12: 87–99.

CARRANZA, G. (1997). Selección Apropiaada de Tecnologías de Tratamiento para Aguas Residuales Domésticas, Tesis presentada a la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala.

CASTILHO, A., CECCHI, F., ALVAREZ, J. (1997). A combined anaerobic-aerobic system to treat domestic sewage in coastal areas. *Water Res.* Pag 31 (6): 3057–3063.

CASTRO, A. (2003). Selección de alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia: un método con énfasis en aspectos tecnológicos. Tesis MSc en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de ingeniería. Universidad del Valle. Cali (Colombia).

CAVALCANTI, P. (2003). Integrated application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical regions. PhD Thesis, Sub-department of Environmental Technology, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). Resumen ejecutivo de proyecto regional sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en America Latina: realidad y potencial. Lima (Perú).

CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). Especificaciones Técnicas para el Diseño de Trampa de Grasa. OPS/CEPIS/03.81 UNATSABAR. Lima (Perú).

CETESB, Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental. (1989). Operación y mantenimiento de lagunas anaerobias y facultativas. Sao Pablo (Brasil).

CISNEROS, J.B. (2007). El agua en América Latina y el Caribe: situación y perspectivas. En: *Latinosan 2007*. Cali (Colombia)

CONIL, P. (2001). La tecnología anaerobia UASB en el tratamiento de las aguas residuales domésticas: 10 años de desarrollo y maduración en América Latina.

CORRALES, D. (2003). Experiencia de Acuavalle S.A. E.S.P en el Tratamiento de las Aguas Residuales: estación de investigación y de transferencia de tecnología en aguas residuales, municipio de Ginebra, Valle del Cauca, Colombia. En *Agua 2003*, Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Cartagena (Colombia).

CUBILLOS, A., ESPINOSA, C., RIVERA, G., SANABRIA, J. (2003). Reactores Anaerobios para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Mérida (Venezuela).

CHERNICHARO, C., NASCIMENTO, M. (2001). Feasibility of a pilot-scale UASB/trickling filter system for domestic sewage treatment. *Journal Water Science Technology*. Pag 44 (7): 221–228.

CHERNICHARO, C. (2007). Principios de tratamiento biológico de aguas residuales “Reactores anaerobios”. Departamento de ingeniería sanitaria y ambiental. Universidad federal de Minas. Belo Horizonte (Brasil).

CNA y WWF, World Water Forum. (2006). Regional document for the America. World Water council and Conagua. Mexico.

- CRITES, R., TCHOBANOGLOUS, G. (1998). Small and decentralized wastewater management systems. Editorial McGraw-Hill. USA.
- CRITES, R., TCHOBANOGLOUS, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Editorial McGraw-Hill. Bogotá (Colombia).
- DEAN, R.B., FORSYTHE, S.L. (1976) Estimating the reliability of advanced waste treatment. Part 1. Water Sewage Works. USA. Pag 87–89.
- DIAZ-BÁEZ, M., ESPITIA, S., MOLINA, F. (2002). Digestión anaerobia. Una aproximación tecnológica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá (Colombia).
- DRAAIJER, H., MAAS, J., SCHAAPMAN, J., KHAN, A. (1992). Performance of the 5 MLD UASB reactor for sewage treatment at Kanpur, India. Journal Water Science Technology. Pag 25 (10): 123– 133.
- DUQUE, A. (2006). Lagunas de estabilización, opción de tratamiento de aguas residuales en asentamientos poblacionales del Valle del Cauca. Cali (Colombia).
- EGOCHEAGA, L., MOSCOSO, J. (2004). Una Estrategia para la Gestión de las Aguas Residuales Domésticas, CEPIS/OPS, Lima.
- ENGİN, G., DEMİR, İ. (2006). Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities. Journal of Environmental Management. Pag 6: 357–363.
- EPA, Environmental Protection Agency. (1999). Folleto informativo de sistemas descentralizados: Tanque séptico – sistemas de absorción al suelo, EPA 832-F-99-, Washington D.C (USA).
- EPA, Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial”, EPA 832-F00-023, Washington D.C (USA).
- EPA, Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de sistemas descentralizados: Sistemas de tanque séptico para aplicaciones de alto caudal, EPA 832-F-00-079. Washington, D.C (USA).
- SPRENT, P., SMEETON, N. (2001). *Applied Nonparametric Statistical Methods* (Tercera edición ed.). Florida: Chapman & Hall/CRC. Sección 5.2.
- FERNÁNDEZ, I. (2005). Estadística Descriptiva. Departamento de estadística. Universidad Pública de Navarra. Pamplona (España).
- FERRER, M., COSTA, M., BONAFEU, M.D., ESTRADA, M., ROGER, E. (1998). Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Segunda edición. Barcelona (España).
- FIELD J, SIERRA R., ALVAREZ, LETTINGA, G. (1995). Effect Wastewater characteristics and environmental factors. En: Curso internacional de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad de Wageningen.
- FORESTI, E., ZAIAT, M., VALLERO, M. (2006). Preface. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Pag 2: 1-2.

- FRANCI, R. (1999). Manejo de Lodo de Lagunas de estabilización no mecanizadas. Rede Cooperativa de Pesquisas, Rio de Janeiro (Brasil).
- GALVIS, A., CARDONA, D.A, BERNAL, D.P. (2005). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, Seltar. Cali (Colombia).
- GIJZEN, J.H. (2001). Low cost wastewater treatment and potentials for reuse. A cleaner production approach to wastewater management. En: curso internacional de sistemas integrados sostenibles. Cali (Colombia).
- GIRALDO, E. (1993). Tratamientos anaerobios de las aguas residuales domésticas. Limitaciones y potencialidades. En: seminario-taller; Alternativas Tecnológicas para el Tratamiento de Aguas Residuales. Quito (Ecuador).
- GONCALVES, R., ARAUJO, V., CHERNICHARO, C. (1998). Association of a UASB reactor and a submerged aerated biofilter for domestic sewage treatment. Journal Water Science Technology. Pag 38 (6): 189–195.
- GOPAL, B. (1999). “Natural and constructed wetlands for wastewater: Potential and problems”. Journal Water Science and Technology, Vol 40. Pag 27–35.
- GUERRERO, J. (2003). Modelo selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. En: seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Cartagena (Colombia).
- HABERL, R. (1999). “Constructed wetlands: a chance to solve wastewater problems in developing countries”. Journal Water Science and Technology, Vol 40. Pag 11–17.
- HASKONING. (1996). 14 MLD UASB treatment plant in Mirzapur, India. Evaluation report on process performance. Haskoning Consulting Engineers and Architects.
- HELMER, R., HESPANHOL, I. (1997). Water pollution control. WHO. UNEP. First edition. Great Britain.
- HERNÁNDEZ, J.E., SAGASTUME, J.M., NOYOLA, R.A. (2000). Arranque de reactores anaerobios industriales: dos casos de estudio. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- HULSHOFF, L., LETTINGA, G. (1984). *New Technologies for Anaerobic Wastewater Treatment*. En: Water Science and Technology, Volume 18, Nº 12. Pag 41-53.
- IDELOVITCH, E., RINGSLOG, K. (1997). Wastewater treatment in Latin-American: old and new options. World Bank. Washington DC (USA).
- INAA, Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados. (1996). Guía de Operación y Mantenimiento de Lagunas de Estabilización, Departamento de Calidad del Agua, Gerencia de Normación Técnica, Managua (Nicaragua).
- JEFFERSON, B., JUDD, S., DIAPER, C. (2001) Treatment methods for grey water. IWA Publishing, UK.
- JORDAO, E.P., SOBRINH, P.A. (2004). Investigación y experiencia con el Pos-Tratamiento para Reactores UASB en Brasil. AIDIS.

- KAASEVA, M.E. (2004). Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater – a tropical case study. *Water Res.* Pag 38 (6): 681–687.
- KADLEC, R., KNIGHT, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control*, Published by IWA Publishing in its Scientific and Technical Report series (No.8).
- LARA, J.A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Master en Ingeniería y Gestión Ambiental, Barcelona (España).
- LEON, G., MOSCOSO, J. (1996). *Curso de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales*, CEPIS, OPS/OMS, PUB96.20, Lima (Perú).
- LETTINGA, G., VAN VELSEN, A., HOBMA, S., DE ZEEUW, W., KLAPWIJK, A. (1980). Use of the Upflow Sludge Blanket reactor concept for biological wastewater treatment, specially for anaerobic treatment. *Biotechnology & Bioengineering*. Pag 35: 699 – 734.
- LETTINGA, G., MAN, A., GRIN, P., HULSHOF, P. (1987). Anaerobic wastewater treatment as an appropriate technology for developping countries. *Tribune Cebedeau*. Pag 40 (11): 21–32.
- LOETSCHER, T., KELLER, J. (1997). *Decisions Involving Numerous Criteria: The Example of Sanitation Planning in Developing Countries*, AWM, Centre, Brisbane. Australia.
- LUNA, E. (2005). *Teoría de la confiabilidad*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Departamento de Física. Argentina.
- MAASKANT, W., MAGELHAES, C., MAAS, J., ONSTWEDDER, H. (1991). The upflow anaerobic sludge blanket (UASB) or the treatment of sewage. *Environ. Poll.* Pag 647–653.
- MANDER, U., MAURING, T. (1997). Constructed wetlands for wastewater treatment in Estonia. *Water Science and Technology*. Pag 35 (7): 323-330.
- MARA, D.D., CAIRNCROSS, S. (1989). *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agricultura and aquaculture*. WHO- UNEP. Suiza.
- MARA, D.D., ALABASTER, G.P., PEARSON, H.W., MILLS, S.W. (1992). *Waste Stabilisation Ponds, A desing manual for eastern Africa*. Lagoon Technology International Ltda. England.
- MARA, D.D., VAZ DA COSTA., BASTOS R. (1996). *Bacteriological aspects of wastewater irrigation*. Leeds, England.
- MARA, D.D; PEARSON, H. (1998). *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterrean Countries*, Lagoon Technology International, Leeds, England.
- MARAI, G.V.R., VAN HAANDEL, A. C. (1996). Design of Grit Channels Controlled by Parshall Flumes, *Water Science and Technology*, Vol. 33, No. 3, pp. 195—210.
- MBULIGUE, S.E. (2004). Comparative effectiveness of engineered wetland system in the treatment of anaerobically pre-treated domestic wastewater. *Ecol. Eng.* Pag 24 (15): 269–284.
- MENDONÇA, R. S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización, como utilizar las aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Editorial McGraw-Hill. Bogotá (Colombia).

METCALF Y EDDY. (1998). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3ª edición, Editorial McGraw-Hill.

METCALF Y EDDY. (2003). Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Fourth edición, McGraw-Hill. New York (USA).

Ministerio de Desarrollo Económico (2002). Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Sección II, título E, tratamiento de aguas residuales. República de Colombia. Bogotá D.C.

MONROY, O. (1997). Sistemas de reactores anaerobios. Memorias. VIII Curso Avanzado sobre Procesos Biotecnológicos. Cuernavaca (México)

MONROY, O., FAMA, G., MERAZ, M., MONTOYA, L., MACARIE, H. (2000). Anaerobic digestion for wastewater treatment in Mexico: state of technology. Water Res. Pag 34 (13): 1803–1816.

MORGAN, J.M., REVAH, S., LOYOLA, A. (1999). Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Su control a través de procesos biotecnológicos. Ingeniería y ciencias ambientales.

MORRIS, M., HERBERT, R. (1997). The design and performance of a vertical flow reed for the treatment of high ammonia, low suspended solids organic effluents. Water Science and Technology. Pag 35 (7): 197-204.

NELSON, V.M., DOW, D.B. (1994). National consortium for decentralized wastewater technology and management, onsite wastewater treatment, proceedings of the seventh international symposium on individual and small community sewage systems. Pag 11-15. Atlanta.

NELSON, K., JIMÉNEZ CISNEROS, B., TCHOBANOGLOUS, G., Y DARBY, J. (2004). Sludge Accumulation, Characteristics and Pathogen Inactivation in Four Primary Waste Stabilization Ponds in Central Mexico. Water Research, Vol. 38, Pag 111-127.

NIKU, S., SCHROEDER, E.D., SAMANIEGO, F.J. (1979). Performance of activated sludge process and reliability-based design. J. Water Pollut. Control Assoc. Pag 16: 2841–2857. USA.

NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G., SAMANIEGO, F.J. (1981). Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. Environmental Protection Agency, EPA Grant no. R805097-01. Pag 1–124. USA.

NOYOLA, A. (1996). Anaerobic technology as tool for the sustainable environment: the context of Mexico. En: biodegradación de compuestos orgánicos industriales. Instituto de Ingeniería Unam. México.

NOYOLA, A. (2003). Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica. En Agua 2003, Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Cartagena (Colombia).

OMS, Organización mundial de la salud. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and the greywater. Vol 2. Wastewater use in agriculture. Switzerland.

OMS, Organización mundial de la salud. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and the greywater. Vol 3. Wastewater and excreta use in agriculture. Switzerland.

OPS, Organización Panamericana de la Salud. (2000). Informe Regional sobre la Evaluación en la región de las Américas. Agua Potable y Saneamiento: estado actual y perspectivas.

OROZCO, A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño. Colombia, Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - ACODAL.

PASSIG, F., VILLELA, L., FERREIRA, O. (2000). Piracimirim sewage treatment plant – Conception utilizing anaerobic process followed by aerobic process – Evaluation of operational conditions and compatibility of the processes. In: Foresti *et al.* (Eds) Proceedings of the IV Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, Vol. 1. Pag 53–59.

PEÑA, M.R. (2002). Advanced primary treatment of domestic wastewater in tropical countries: development of high-rate anaerobic ponds. Ph.D thesis. University of Leeds, England.

PEÑA, M.R. (2003). Pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. En: Agua 2003, Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Cartagena (Colombia).

REED, S.C., CRITES, R.W., MIDDLEBROOKS, E.J. (1995). “Systems for waste management and treatment”. 2 ed, Mc Graw Hill, New York (USA).

REID, G.W. (1982). Appropriate Methods of Treating Water and Wastewater in Developing Countries. The University of Oklahoma at Norman. Ann Arbor Science.

REYNOLDS, T.D., RICHARDS, P.A. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, Second Edition, PWS Publishing Company, Boston.

RITTMANN, B., McCARTY, P. (2001). Biotecnología del Medio Ambiente. Principios y Aplicaciones. España, McGraw-Hill.

RODRIGUEZ, J.A. (2003). Arranque y operación de reactores anaerobios. Universidad del Valle. Cali (Colombia).

RODRIGUEZ, J.A. (2003). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad del Valle. Cali (Colombia).

ROELEVELD, K.K., ZEEMAN, G. (2006). Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts. Sub-Department of Environmental Technology, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. Pag 24: 115-139.

ROMERO, J.A. (1999). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. 1ª edición, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá (Colombia).

RUIZ, J., A. FIGUEREDO, E. GALLEGUO., DOMINGUEZ, A. (1999). Bioindicadores del fango activado y su relación con el rendimiento de la EDAR El Rompido (Huelva). Variaciones temporales con aguas de salinidad elevada. En: Tecnología del Agua. 19 -193. Pag 41-55.

SANCHEZ, R.M., LÓPEZ, E.E., NAJUL, M., BLANCO, H.S. (1998). Límite procesal en sistema dual de lagunas de estabilización de alta carga. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98), Lima.

SANCHEZ, R.M., BLANCO, H., LÓPEZ, E., NAJUL, M., RINCONES, M. (2006). Análisis probabilístico en la evaluación de sistemas de tratamiento para aguas residuales (STLRs). 7: 1-7.

SCHELLINKHOUT, A., COLLAZOS, C.J. (1992). Full-scale Application of the UASB Technology for Sewage Treatment. *Journal Water Science Technology*, Vol. 25, No. 7. Pag 159-166.

SCHELLINKHOUT, A., OSORIO, E. (1994). Long-term Experience with the UASB Technology for Sewage Treatment on Large Scale. 7th International Symposium on Anaerobic Digestion. 23-27 de enero de 1994. Ciudad del Cabo, Sudáfrica. Oral and Posterpaper preprints. Pag 251-252.

SHILTON, A. (2001). Studies into the hydraulics of waste stabilisation ponds. Ph.D thesis. School of civil engineering, Massey University. Auckland (New Zealand).

SHILTON, A., HARRISON, J. (2003). *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilization Ponds*, Institute of Technology and Engineering, Massey University, Palmerston North (New Zealand).

SHUVAL, H.I. (1986), "Wastewater irrigation in developing countries, health Effects and technical solutions". World Bank Rechnical Paper No. 51.

SOBALVARRO, J.A. (1997). Contribución para el análisis de alternativas de tratamiento de aguas residuales para ciudades de pequeño o mediano tamaño. Tesis MSc en Ingeniería Civil área de énfasis Concentración en Ingeniería Urbana. Centro de ciencias exactas y de tecnología. Universidad federal de Sao Carlos. Brasil.

SOBALVARRO, J.A., BATISTA N.N. (1997). Propuesta para selección de procesos de tratamientos de esgotos sanitarios adecuados a ciudades de pequeño y medio porte. Universidad Federal de São Carlos. Brasil.

SOUSA, J., FORESTI, E. (1996). Domestic sewage treatment in an up-flow anaerobic blanket – sequencing batch reactor system. *Journal Water Science Technology*. Pag 33 (11): 73–84.

SOUZA, M.A. (1997). Metodología de análisis de decisiones para seleccionar alternativas de tratamiento y uso de aguas residuales. Universidad de Brasília/ Departamento de Ingeniería Civil. Brasil.

STERLING, C.R. (1987). The detection of Giardia and Cryptosporidium from water sources using monoclonal antibodies. University of Arizona, Tucson.

STEWART, M.O., POCASANGRE, A., FLORES, C., MONGE, J., ESTRADA, M. (2000). Waste Stabilization Pond Use in Central America: The Experiences of El Salvador, Guatemala, Honduras, and Nicaragua, *Water Science and Technology*, Vol. 42, Nos. 10-11, pp. 51-58.

STEWART, M.O. (2005). Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad. Universidad Estatal de California.

STOTTMEISTER, U., WIEBNER, P., KUSCHK, U., KAPPELMEYER, M., KASTNER, O., BEDERSKI, R.A., MULLER, H., MOORMANN. (2004). Effects of plants and microorganism in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. Pag 24: 93-117.

SUEMATSU, G.L. (1995). Tratamiento de aguas residuales; objetivos y selección de tecnologías en función al tipo de reuso. Lima: CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

TAWFIK, A., KLAPWIJK, B., GOHARY, F., LETTINGA, G. (2002). Treatment of anaerobically pre-treated domestic sewage by a rotating biological contactor. *Water Res.* Pag 36 (8): 147–155

TAWFIK, A., ZEEMAN, G., KLAPWIJK, B., SANDERS, W., GOHARY, F., LETTINGA, G. (2003). Treatment of domestic sewage in a combined UASB/RBC system. Process optimization for irrigation purposes. *Journal Water Science Technology*. Pag 48 (7): 131–138

TAWFIK, A., KLAPWIJK, B., VAN BUUREN, J., GOHARY, F., LETTINGA, G. (2004). Physico-chemical factors affecting the E. coli removal in a rotating biological contactor (RBC) treating UASB effluent. *Water Res.* Pag 38 (7): 1081–1088

TCHOBANOGLIOUS, G. (1995). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, tomo I, editorial McGraw-Hill. MADRID.

TORRES, P., FORESTI, E. (2001). Domestic sewage treatment in a pilot system composed of UASB and SBR reactors. *Journal Water Science Technology*. Pag 44 (6): 247–253.

TSAGARAKIS, K.P., MARA, D.D., ANGELAKIS, A.N. (2001). Wastewater management in Greece: experience and lessons for developing countries. *Water Science and Technology*. Pag 9: 163–172.

UNDA, O.F. (1999). Ingeniería sanitaria aplicada al saneamiento y salud pública. Editorial Limusa S.A. Mexico.

VAN HAANDEL, A., LETTINGA, G. (1994). Tratamiento Anaerobio de Esgotos “Un manual para regiones de clima caliente”. Editorial EPGRAF. Campina Grande (Brasil).

VEENSTRA, S., POLPRASERT, C. (1997). Wastewater Treatment part I and II. International institute for infrastructural, hydraulic and environmental engineering. IHE – Delf. The Netherlands.

VIEIRA, S., SOUZA, M. (1986). Development of technology for the use of the UASB reactor in domestic sewage treatment. *Journal Water Science Technology*. Pag 18 (17): 221–238.

VIEIRA, S.M. (1988). Anaerobic Treatment of Domestic Sewage in Brazil - Research Results and Full-scale Experience. *Anaerobic Digestion*, 1988. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. Boloña (Italia). Pag 185-195.

VON SPERLING, M. (1995). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *International symposium on technology transfer. Journal Water Science Technology*. Pag 33 (13): 59–72.

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Brasil.

VON SPERLING, M., OLIVEIRA, S. C. (2007). Reliability analysis of wastewater treatment plants. Water Research. Pag 12: 1182–1194.

WEF y ASCE. (1992). Design of municipal wastewater treatment plants.

WEF y ASCE. (1998). Water Environment Federation & American Society of Civil Engineers, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Manuals and reports on engineering. Practice No. 76. Fourth Edition. Volumen 1. USA.

WETZEL, R.G. (2000). “Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: Short – term versus long term objectives” Journal Water Science and Technology, Vol 44. Pag 1–8.

WHO/UNICEF. (2004). Global water supply and sanitation assessment report, joint monitoring programme for the water supply and sanitation. World Health Organization. Geneva.

WILDSCHUT, L. (1987). Operación y mantenimiento de una planta UASB para aguas residuales domésticas. Haskoning (Holanda).

YAÑEZ, F. (1992). Lagunas de Estabilización: Teoría, Diseño, Evaluación, y Mantenimiento, Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, Ministerio de Salud Pública, Quito (Ecuador).

YAÑEZ, F. (2000). Aspectos destacados en la tecnología de lagunas de estabilización. En: seminario internacional de tratamiento de aguas servidas. Porto Alegre (Brasil).

YOUNG J.C. (1991). Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters. USA.

Referencias URL

URL-1.

www.sabanet.unisabana.edu.co/ingenieria/especializacion/ambiental/material/ciclo1/6agua/gestionrhparametrostratamientofinal.ppt. Visitado 5/11/2009.

URL-2.

www.serbi.luz.edu.ve/scielo.php?pid=S1317-225. Tratamiento aerobio de dos efluentes industriales utilizando reactores biológicos rotativos de contacto. Visitado 15/12/2009.

URL-3.

www1.minambiente.gov.co/.../contenid/medidas.htm. Guía ambiental de proyectos carboeléctricos. Visitado 22/11/2008.

URL-4.

www.es.wikipedia.org/wiki/Agua_potable_y_saneamiento_en_Colombia. Agua potable y saneamiento en Colombia. Visitado 22/12/2009.

URL-5.

www.geocities.com/ptarcolombia. Plantas de tratamiento de aguas residuales y biosólidos de Colombia. Visitado 16/01/2010.