

# SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

GUÍA DE APOYO PARA CIUDADES PEQUEÑAS Y MEDIANAS

ADALBERTO NOYOLA  
JUAN MANUEL MORGAN-SAGASTUME  
LEONOR PATRICIA GÜERECA





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

© Instituto de Ingeniería

Primera edición: 2013

Impreso y hecho en México

ISBN: 978-607-02-4822-1

Primera impresión, 1200 ejemplares

Diseño y formación: Ruth Eunice Pérez Pérez

*Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la portada, puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en manera alguna por ningún medio sin permiso previo del editor.*

**Contacto: [idrc@pumas.ii.unam.mx](mailto:idrc@pumas.ii.unam.mx)**

Esta obra es resultado de varios años de experiencia con plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, tanto en aspectos de diseño conceptual, como en capacitación de personal técnico y diagnósticos de operación. Sin embargo, la integración del documento fue catalizada en el marco del proyecto Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables financiado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, de Canadá (IDRC, por sus siglas en inglés). Este patrocinio permitió enriquecer el documento con información valiosa sobre el estado del tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe y en particular con los resultados de aplicar la metodología de análisis de ciclo de vida a diversos procesos de tratamiento representativos de la Región, incorporando elementos sociales.

Por lo tanto, nuestro primer agradecimiento es para el IDRC Canadá, por los recursos aportados durante 3 años dentro del proyecto IDRC-UNAM 105701-001 (*Water and sanitation: Latin American and Caribbean cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources*). En particular, a Walter Ubal, especialista senior del programa Agua y Cambio Climático, y a la oficina regional del IDRC en Montevideo, Uruguay.

Así mismo, se reconoce la contribución del Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil) y del Ing. Manuel Osés Pérez (Guadalajara, México) por sus valiosos comentarios al presente documento. 💧



# CONTENIDO





<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>FASE 1. DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SUS TECNOLOGÍAS.....</b>	<b>5</b>
1.1 Aspectos generales.....	5
1.2 Tratamiento de aguas residuales.....	7
1.3 Tecnologías existentes.....	11
1.3.1 Definición de los niveles de tratamiento dentro de un sistema de tratamiento de aguas residuales.....	12
1.3.2 Procesos aerobios.....	15
1.3.3 Procesos anaerobios.....	23
1.3.4 Sistema natural construido tipo "Wetland".....	34
1.3.5 Biofiltro para el control de olores.....	35
1.4 Sistemas para el tratamiento de lodo.....	36
1.5 Consideraciones para la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.....	38
1.5.1 Diversidad de las aguas residuales.....	39
1.5.2 Uso o disposición final del agua tratada.....	40
1.5.3 Diversidad de oferta tecnológica.....	41
1.5.4 Costo de inversión y recursos para operación y mantenimiento.....	41
1.5.5 Remoción de sólidos suspendidos, sedimentables y flotantes.....	42
1.5.6 Remoción de materia orgánica biodegradable.....	43
1.5.7 Remoción de nutrientes.....	46
1.5.8 Remoción de patógenos.....	46
1.5.9 Generación y tratamiento de lodos.....	47
1.5.10 Emisiones de olores y gases de efecto invernadero.....	48
1.5.11 Condiciones ambientales.....	50
1.5.12 Área disponible.....	50
1.5.13 Adaptación de la infraestructura de saneamiento ante el Cambio Climático.....	51
1.5.14 Requerimiento de personal.....	52
1.5.15 Aspectos sociales.....	53
1.5.16 Otros aspectos relevantes.....	54

<b>FASE 2. REVISIÓN DE PUNTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....</b>	<b>57</b>
2.1 Tipo ambiental.....	57
2.2 Tipo técnico.....	57
2.3 Tipo económico.....	58
2.4 Tipo social.....	59
2.5 Árbol de decisiones para la preselección de tecnologías.....	59
<b>FASE 3. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS.....</b>	<b>63</b>
3.1 Introducción.....	63
3.2 Definición de los rubros considerados en la matriz de decisión.....	64
3.3 Operación de la matriz de decisión.....	72
3.4 Matriz de decisión.....	73
<b>PUNTUALIZACIONES FINALES.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO I. SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (ALC).....</b>	<b>79</b>
Calidad del agua residual bruta.....	80
Normatividad en materia de tratamiento del agua residual.....	80
Tecnologías más usadas en América Latina.....	81
Manejo de lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales en América Latina.....	84
<b>ANEXO II. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MÁS REPRESENTATIVAS EN AMÉRICA LATINA.....</b>	<b>85</b>
Sustentabilidad y análisis de ciclo de vida en el tratamiento de aguas residuales.....	85
Análisis de los impactos ambientales generados por los sistemas de tratamiento de agua residual.....	87
Implicaciones prácticas para la selección de tecnologías.....	92



<b>ANEXO III: FICHAS TÉCNICAS DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS 9 ESCENARIOS (TRENES DE TRATAMIENTO).....</b>	<b>95</b>
E1- Aireación extendida acoplada con lechos de secado.....	96
E2- Lagunas de estabilización.....	97
E 3- UASB + filtros percoladores.....	98
E4- Aireación extendida acoplada con lechos de secado.....	99
E5- Lagunas de estabilización.....	100
E6- UASB + lagunas facultativa y de pulimento.....	101
E7- Proceso convencional de lodos activados acoplado con espesador por gravedad, anaerobia y centrifugado.....	102
E 8- Lagunas de estabilización.....	103
E9- UASB + lodos activados acoplado con centrífuga.....	104
<b>ANEXO IV: EJEMPLO DE LA OPERACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN.....</b>	<b>105</b>
Calificación de los procesos de tratamiento.....	108
Llenado y operación de la matriz.....	111
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>115</b>
<b>LECTURAS RECOMENDADAS.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Clasificación de los sistemas de tratamiento anaerobio.....	33
Tabla 1.2.	Principales grupos de contaminantes del agua y sus efectos.....	40
Tabla 1.3.	Respuesta de sistemas flexibles <i>versus</i> convencionales ante condiciones cambiantes de lluvia y sequía.....	52
Tabla I.1.	Parámetros promedio del agua residual municipal en América Latina y el Caribe.....	80
Tabla IV.1.	Ejemplos de valores de ponderación (la totalidad debe sumar 100).....	106
Tabla IV.2.	Calificación de los procesos de tratamiento.....	108
Tabla IV.3.	Ejemplo de llenado y operación de la matriz.....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales.....	8
Figura 1.2.	Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento de las aguas residuales.....	9
Figura 1.3.	Esquema del flujo de energía contenida en el sustrato en función del tipo de tratamiento aplicado (caso de sustrato fácilmente biodegradable).....	10
Figura 1.4.	Ejemplos de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales.....	11
Figura 1.5.	Rejillas y sistemas de desarenado. A) planta de tratamiento de aguas residuales municipales, Brasil b) planta de tratamiento de aguas residuales municipales Cerro de la Estrella, México.....	12
Figura 1.6.	Sedimentadores. a) planta de tratamiento de aguas residuales municipales, Brasil b) planta de tratamiento de aguas residuales municipales Cerro de la Estrella, México.....	13
Figura 1.7.	Principales fuentes de olores en una planta de tratamiento.....	15
Figura 1.8.	Lagunas de estabilización, a) planta de tratamiento de aguas residuales de Santa María Rayón, México, b) planta de tratamiento de aguas residuales, Brasil.....	16
Figura 1.9.	Procesos aerobios para el tratamiento de aguas residuales.....	17
Figura 1.10.	Lodos activados, a) planta de tratamiento de aguas residuales Santa Rosa Jáuregui, México b) planta de tratamiento de aguas residuales de Coyoacán, México.....	19

Figura 1.11. Esquema de un filtro percolador.....	21
Figura 1.12 Esquema de un filtro sumergido aerobio.....	23
Figura 1.13. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales primera generación.....	25
Figura 1.14. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales segunda generación.....	26
Figura 1.15. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales tercera generación.....	27
Figura 1.16. Esquema de un filtro de lecho de raíces (wetland).....	35
Figura 1.17. Esquema de un biofiltro.....	36
Figura 1.18. a) filtro banda de la planta de tratamiento de aguas residuales sur, Querétaro, México, b) manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de La Calera, Colombia.....	38
Figura 1.19. a) y b) filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales sur, Querétaro, México, c) laguna aireada de la planta de tratamiento de aguas residuales de lago de Texcoco, México, d) reactor aerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de Metepec, México.....	44
Figura 1.20. a) y b) lechos de secado de lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales La Calera, Colombia.....	48
Figura 2.1. Diagrama de bloques para la preselección de tecnologías.....	62
Figura I.1. Número de plantas de tratamiento en función del tipo de tecnología en la muestra de PTAR en ALC.....	81
Figura I.2. Distribución de planta de tratamiento (PTAR) en grandes, medianas y pequeñas en los países estudiados y a su vez en caudales menores a 25l/s.....	82
Figura I.3. Caudal acumulado que ingresa a plantas de tratamiento en función de la tecnología utilizada en ALC.....	83
Figura I.4. Configuración de trenes de tratamiento representativos de la región de ALC.....	84
Figura II.1. Impacto por eutrofización (EU) para cada uno de los escenarios estudiados.....	89
Figura II.2. Impacto por cambio climático (GWP) para cada uno de los escenarios estudiados.....	91
Figura II.3. Impacto por formación de oxidantes fotoquímicos (POF) para cada uno de los escenarios estudiados.....	92



# INTRODUCCIÓN

El rezago en infraestructura de tratamiento de aguas residuales municipales en la mayoría de países de la región Latinoamericana y Caribeña es un asunto que no ha recibido la atención debida por parte de las autoridades competentes. Si bien en años recientes la inversión en este rubro se ha incrementado, el atraso acumulado en varias décadas se mantiene. La meta 10 dentro del objetivo 7 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio ha sido alcanzada por la Región, con la excepción de pocos países en lo individual. Es así que en 2011 el 94% de la población tenía acceso al agua potable (la meta era 92%). Por su parte, el indicador para el saneamiento mejorado, de acuerdo con los criterios de la Organización de las Naciones Unidas, está a punto de alcanzarse, ya que se tiene un 82% frente a la meta del 84% prevista en 2015<sup>1</sup>.

A pesar de los avances logrados en los últimos años, en buena parte como resultado de la voluntad política basada en los Objetivos de Desarrollo del Milenio, persisten deficiencias de operación y mantenimiento en los sistemas existentes. En materia de abastecimiento de agua, ésta puede llegar al usuario en cantidad, más no en la calidad adecuada y no de forma continua. Por otro lado, el saneamiento, ya sea por alcantarillado o en el sitio, en la mayor parte de los casos no está asociado con la infraestructura para su tratamiento antes de su descarga al medio receptor. No existen estimaciones confiables del nivel de cobertura de tratamiento para las aguas residuales municipales en la Región, pero se estima que no más del 20% del agua generada entra realmente a una planta de tratamiento.

Aunado a lo anterior, otro aspecto de alcance global que debe ser considerado en las políticas de inversión para la construcción de nueva infraestructura es el relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el cambio climático,

---

<sup>1</sup> Banco Mundial, World Development Indicators Database, 2011. Disponible en: [www.worldbank.org/data/countrydata/countrydata.html](http://www.worldbank.org/data/countrydata/countrydata.html).

tema reconocido como una de las más serias y potenciales amenazas ambientales que enfrenta la humanidad. En efecto, el manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales municipales contribuyen a la emisión de GEI a través de los procesos de descomposición de la materia orgánica contaminante y de las actividades asociadas.

Frente al tamaño del reto, es imperativo desarrollar e implantar nuevas soluciones, más sostenibles, al eterno déficit en infraestructura para el manejo del agua residual, así como para ampliar y mejorar los sistemas de abastecimiento de agua. Los nuevos sistemas administrativos, sociales y tecnológicos deberán considerar las limitaciones y posibilidades propias de la Región, con una alta dosis de innovación y adaptación, deslindándose en muchos casos de las soluciones convencionales.

El nivel de prioridad que tenía en el pasado la inversión en nueva infraestructura de tratamiento se está incrementando, lo cual llevará a que los recursos financieros destinados en los últimos años a este subsector se mantengan o aumenten. Ante tal perspectiva, se abre una oportunidad para aplicar tecnologías de tratamiento de agua residual que atiendan mayormente el contexto específico de la región, que sean innovadoras, que cumplan con las legislaciones locales y que presenten una menor huella de carbono. Bajo este contexto, los criterios de toma de decisiones para seleccionar la tecnología adecuada para un caso específico se amplían, debiendo integrar la sustentabilidad y la mitigación del cambio climático a los técnico – económicos convencionales<sup>1</sup>.

Con el fin de contribuir al cambio necesario para alcanzar un desarrollo más sustentable, esta guía busca ser un apoyo para los responsables de la toma de decisiones en materia de tratamiento de aguas residuales en el ámbito municipal, quienes, a pesar de no ser necesariamente especialistas en el tema, deben contar con criterios para una adecuada elección de la tecnología para resolver su problema de manejo de aguas residuales.

Este documento se orienta fundamentalmente al contexto de pequeños y medianos municipios y sistemas operadores de agua y saneamiento. Se considera, sobre todo en el caso de pequeños centros urbanos, que la responsabilidad de la selección de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales no viene aparejada con una adecuada asesoría, necesaria ante las limitaciones técnicas que con frecuencia enfrentan sus organismos operadores de agua y saneamiento. Como tal, podrá ser útil para apoyar el proceso que inicia desde la identificación de posibles opciones tecnológicas aplicables, la definición de los elementos mínimos a solicitar en las ofertas de proyectos,

---

1 Adalberto Noyola, Leo Heller, Horst Otterstetter (2010). Los desafíos para la universalización del saneamiento básico, en *Determinantes Ambientales y Sociales de la Salud*, Luiz Augusto Galvão, Jacobo Finkelman y Samuel Henao (OPS) Editores. McGraw-Hill Interamericana, 367-381.

la evaluación de dichas propuestas y finalmente la selección de la más adecuada al caso específico, con base en las ofertas técnico-económicas presentadas por las empresas interesadas en proveer la infraestructura.

Sin ser un límite absoluto, se considera que la guía es aplicable para sistemas municipales con caudales menores a 200 l/s (alrededor de 100,000 habitantes equivalente). Una planta de tratamiento de mayor caudal, por su tamaño y requerimientos tecnológicos, queda fuera del enfoque de esta guía, aunque hay elementos, criterios y procedimientos que podrían ser tomados en cuenta. Más aún, para plantas mayores a ese caudal, el tamaño del organismo operador responsable implica que cuenta con expertos en varias áreas técnicas y para quienes este documento sería elemental.

La estructura de este documento y del proceso a seguir como guía para la selección de tecnología, se divide en 3 fases.

La primera fase presenta en términos generales las diversas opciones tecnológicas existentes para dar tratamiento a las aguas residuales en general y de cómo configurar trenes de tratamiento de aguas residuales municipales, destacando la incorporación de criterios de sustentabilidad. Se plantean, en términos generales, los conceptos sobre tratamiento de aguas residuales, las tecnologías existentes, su evolución y las características a considerar para la configuración de trenes de tratamiento para aguas residuales de origen municipal. Se proporcionan ejemplos de los trenes de tratamiento más utilizados en América Latina y de cómo es posible su modificación y/o adaptación para que cumplan criterios de sustentabilidad.

La importancia de esta primera fase radica en que el lector pueda comprender la base elemental de las tecnologías existentes y a su vez, establecer diferencias y similitudes entre ellas, sus ventajas y desventajas, capacidades y requerimientos técnicos generales para su adecuado funcionamiento.

En la fase dos del proceso se incluye un cuestionario que deberá ser respondido por el grupo que participe en la toma de decisiones para que lo guíe en definir si una tecnología es aplicable o no en el ámbito particular de sus necesidades de tratamiento de aguas residuales municipales. Este cuestionario permite desechar aquellas tecnologías que no cumplen con los criterios establecidos para una adecuada integración de plantas de tratamiento y aceptar aquellas que si lo hacen.

Por otra parte, se presenta un diagrama de flujo que orientará al responsable de la toma de decisiones respecto a que trenes del tratamiento ya integrados puede escoger en función del área disponible, topografía del sitio y condiciones de operación en general. En esta fase, así mismo, se recomienda atender un listado de rubros importantes que como mínimo deben estar incluidos en los términos de referencia técnicos para que los interesados integren sus ofertas en el marco de un proceso de licitación.

En la tercera y última fase del proceso de selección, se ha diseñado una matriz de decisión con base en factores ponderados, la cual tiende a hacer más objetivo el proceso de selección de la tecnología y de un tren de tratamiento de aguas residuales. En esta matriz se toman en cuenta los factores más importantes que pueden intervenir en un proceso de selección como son los técnicos, económicos, ambientales y algunos de carácter social. ♦



**FASE**

**1**

# DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SUS TECNOLOGÍAS

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

Las aguas residuales se definen, según la Ley de Aguas Nacionales de México, como "aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas". Debido a lo general de la definición, se considerará, para efectos de este documento, que las aguas residuales municipales son la combinación de diversas corrientes de agua descargada, una vez usada, a los sistemas de drenaje urbanos. Incorporan en su composición una gran variedad de sustancias que la contaminan, provenientes de residencias, instituciones, establecimientos comerciales e industriales. Con frecuencia, esta corriente de agua de desecho se mezcla con aguas subterráneas infiltradas en la red, o bien aguas superficiales o de lluvia en el caso de que los drenajes sean combinados.

En la formulación, planeación, selección y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales se debe considerar la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, las características del agua residual a tratar con relación a la variaciones de caudal, tipo y concentración de contaminantes, los criterios establecidos para la descarga del efluente tratado a un cuerpo receptor o bien para su eventual uso. Así mismo, un componente esencial a considerar debe ser el impacto social y económico que produce la instalación de una planta de tratamiento en una población. En resumen, se considera lo siguiente:

Proteger la Salud Pública y el Medio Ambiente. Si las aguas residuales van a ser vertidas a un cuerpo receptor natural (mar, ríos, lagos), será necesario realizar un tratamiento para evitar enfermedades causadas por microorganismos patógenos en personas que entren en contacto con esas aguas, así como para proteger el equilibrio ecológico y la conservación de la fauna y flora presentes en el cuerpo receptor.

En el caso de sistemas de recolección y drenaje de aguas residuales que no cuentan con una planta de tratamiento, situación común en los países en desarrollo, el agua residual es descargada directamente en el medio natural (cuerpo de agua o suelo). En este medio, bajo las condiciones propias del cuerpo receptor, se realiza hasta cierto grado una autodepuración, mediante operaciones físicas (dilución, mezclado, absorción, etc.), procesos químicos (reacciones químicas de precipitación, por ejemplo) y procesos biológicos (degradación aerobia y anaerobia). Debido a que en la gran mayoría de los casos dicha auto purificación es un proceso limitado, el cuerpo receptor no puede degradar la materia orgánica en exceso que le aporta el agua residual. De aquí que se presente como resultado la contaminación del medio y la degradación del equilibrio ecológico del mismo, con los impactos ambientales y a la salud que esto conlleva.

Para evitar lo anterior, es necesario instalar como parte del sistema de drenaje urbano, plantas de tratamiento de aguas residuales, ya sea centralizadas "al final del tubo" o distribuidas como plantas menores, ubicadas cerca de puntos de reutilización (riego de áreas verdes, enfriamiento industrial, lavado de autos y calles etc.). En estos sistemas, los contaminantes contenidos en el agua residual son removidos o transformados por diversos procesos, dando por resultado un agua de mejor calidad, apta para descarga o para reutilización, en función del tren de proceso que integra la planta de tratamiento. Los residuos resultantes del tratamiento, principalmente material retenido en rejilla y desarenador, así como los lodos de desecho, deben ser manejados adecuadamente para evitar impactos ambientales y riesgos a la salud.

Uso del Agua Tratada. Existen actividades en las que no se requiere utilizar agua potable estrictamente, donde el agua tratada puede ser empleada, sin ningún riesgo a la salud o impacto negativo al objetivo del proceso que la utilice, tales como:

- Riego de áreas verdes (glorietas, camellones, calles, jardines, centro recreativos, parques, campos deportivos, fuentes de ornato, cementerios)
- Llenado de lagunas, estanques, arroyos artificiales en parques y jardines
- Carga de cisternas para control de incendios
- Lavado de automóviles y pisos
- Descarga de sanitarios y mingitorios
- Industriales y de servicios (lavado de patios y nave industrial, lavado de flota vehicular, sistemas de enfriamiento, intercambiadores de calor, calderas, cortinas de agua, industria de la construcción, etc.)
- Inyección en mantos freáticos
- Recarga de cuerpos de agua superficiales

En la actualidad, se ha asimilado en gran medida, tanto en el ámbito gubernamental como en la sociedad en general, la importancia del agua como recurso fundamental, vital y con características únicas para el desenvolvimiento socioeconómico de un país. Es inconcebible plantear el desarrollo y crecimiento sostenible de un país sin una adecuada planeación sobre esta materia. Es por esto que el ciclo urbano del agua, que inicia con la captación, conducción, abastecimiento, uso, recolección, tratamiento, y termina con la descarga y su posible reutilización, ha adquirido un papel relevante en el desarrollo de la sociedad y de los centros urbanos en particular. En este contexto, es de suma importancia integrar sistemas con criterios que aseguren un cierto grado de sustentabilidad. Para ello, debe realizarse una adecuada selección de tecnologías para cada una de las etapas del ciclo, y en particular para el sistema de tratamiento de las aguas residuales.

*Es incongruente plantear el desarrollo y crecimiento sostenible de un país sin una adecuada atención al tratamiento de las aguas residuales*

## 1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará.

Un esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales se presenta en la Figura 1.1. El objetivo de depurar un agua residual se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada. Dependiendo de ello, es posible generar emisiones gaseosas a la atmósfera e, invariablemente, la producción de material de desecho que puede ser un residuo sólido, como la materia retenida en las rejillas o tamices, o semi-sólido en forma de lodos.

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, la ley de la conservación de la materia hace que al retirar de alguna forma el material contaminante del agua residual, éste solo se transforme o transfiera. Por esta simple razón, siempre se producirán residuos, tales como los lodos, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, acompañados por la generación de emisiones gaseosas. Las cantidades y calidad de estos residuos dependerán de las características del agua residual a tratar y evidentemente de la configuración del sistema de tratamiento.

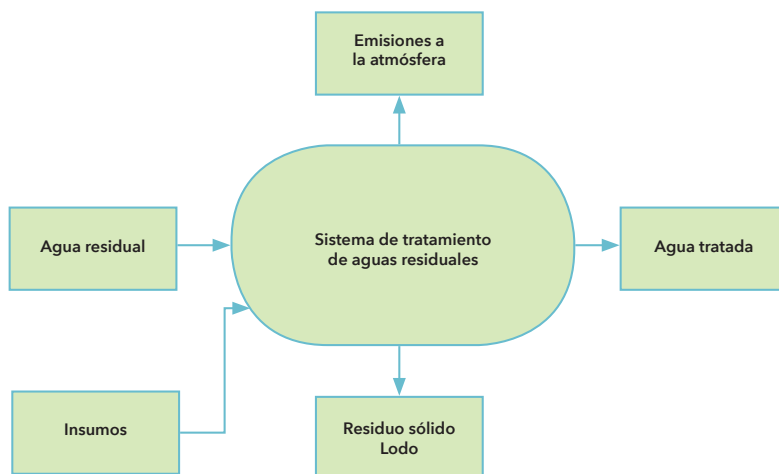


Figura 1.1. Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, los requerimientos de insumos, tales como energía eléctrica y reactivos químicos, se darán en función de las tecnologías seleccionadas para integrar el sistema de tratamiento, y por ende, el costo de operación dependerá también de ello.

En la Figura 1.2 se esquematiza un abanico de posibilidades tecnológicas para integrar un tren de tratamiento de aguas residuales. En esta figura se resalta la división en dos grandes grupos, los tratamientos fisicoquímicos y los biológicos. Los primeros hacen uso, como su nombre lo indica, de procesos físicos (uso de la gravedad, filtración por retención física, atracción electrostática, etc.) y de procesos químicos (coagulación, absorción, oxidación, precipitación, etc.). El segundo tipo involucra la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos.

Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno). Un rubro aparte merecen los sistemas naturales construidos, los cuales aprovechan las transformaciones que se llevan a cabo en el medio natural, solamente que en estas unidades se busca incrementar su capacidad de tratamiento en unidades de proceso controladas. Tal es el caso de los humedales artificiales o el tratamiento mediante descargas directas a suelo.

Por otro lado, los sistemas anaerobios se pueden clasificar en tres generaciones que a su vez se integran según sea el nivel de interacción que posee el microorganismo con el sustrato a degradar (facilidad de transferencia de masa) y la relación entre el tiempo de retención del microorganismo en el sistema (denominado tiempo de retención celular, TRC) y el tiempo de retención hidráulica del sistema (TRH). Más adelante se abundará en esta clasificación.

Es necesario hacer notar que la oferta tecnológica en el mercado es amplia y se presenta bajo distintos nombres o denominaciones que en ocasiones tiene el carácter de marcas registradas. Sin embargo, invariablemente, sabiendo analizar cualquier tipo de sistema de tratamiento presentado bajo una marca registrada o nombre comercial, se podrá clasificar en algún tipo de proceso de tratamiento, o combinación de ellos, presentados en la Figura 1.2.

Como se indicó, los sistemas de tratamiento de agua residual generan lodos que hay que tratar para poder disponer de ellos adecuadamente. En la Figura 1.2 se señalan cinco sistemas de tratamiento de lodos (biológicos y fisicoquímicos) los cuales deben ser integrados con los sistemas de tratamiento de agua residual dentro de lo que se denomina el tren integral de tratamiento de aguas residuales (tratamiento de agua y lodos).

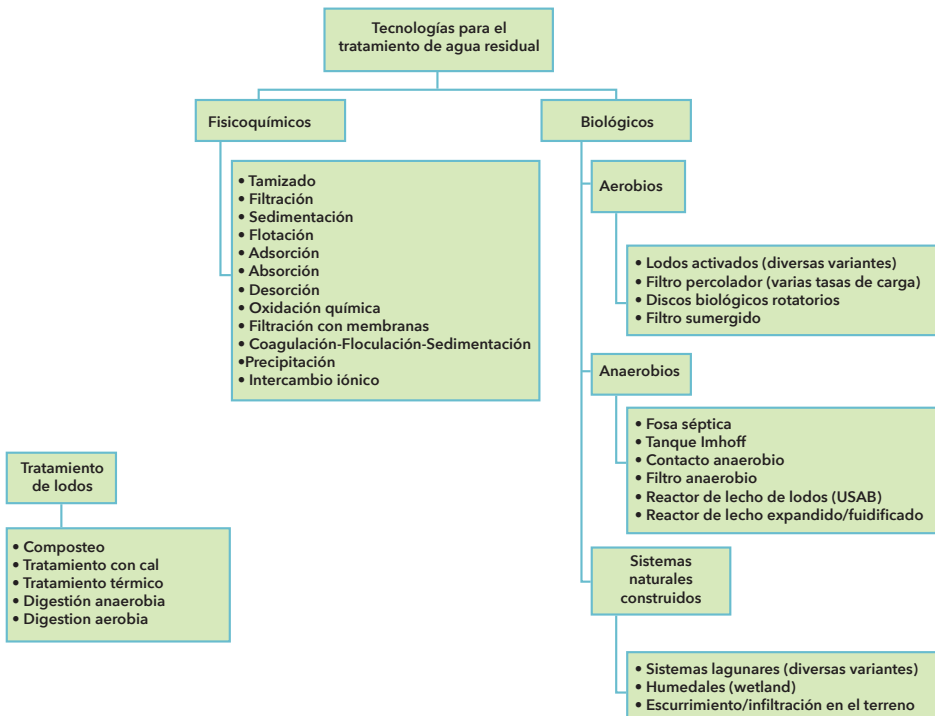


Figura 1.2. Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento las aguas residuales.

En la Figura 1.3 se presenta un esquema del flujo que sigue la energía química contenida en la materia orgánica contaminante (sustrato), según sea procesada por vía anaerobia o aerobia. En

el sistema aerobio, un 65% de la energía producida por el metabolismo microbiano se transforma en nuevas células (denominadas en forma general como lodos) mediante la síntesis (energía de anabolismo). El 35% restante se disipa como resultado de la liberación de energía que acompaña a los procesos vitales de la célula (energía de catabolismo). Estos lodos resultantes deben a su vez ser tratados previamente a su disposición final, lo cual implica costos adicionales importantes. Adicionalmente, para procesar el sustrato por vía aerobia en sistemas mecanizados, es necesario suministrar energía eléctrica para transferir oxígeno al agua y a los microorganismos, lo que se realiza con equipo electromecánico (aireadores mecánicos, compresores).

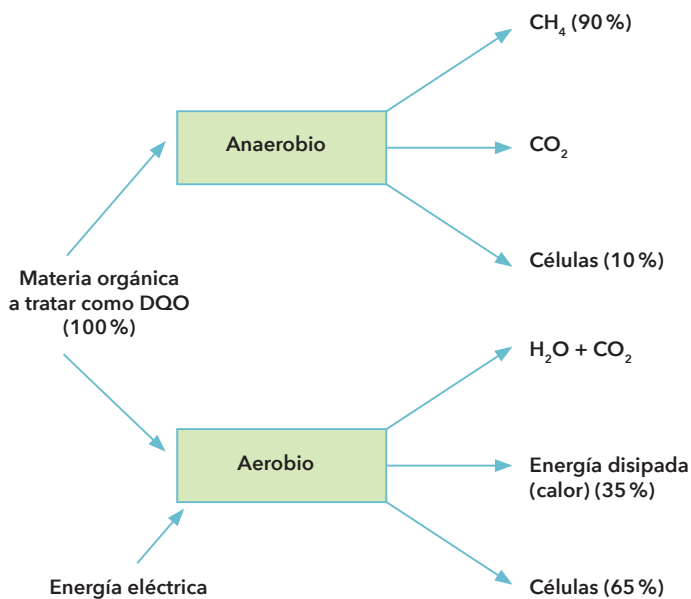


Figura 1.3. Esquema del flujo de energía contenida en el sustrato en función del tipo de tratamiento aplicado (caso de sustrato fácilmente biodegradable).

Por otra parte, si este mismo sustrato se trata por vía anaerobia, el 90% de la energía contenida en él se encuentra en la molécula de metano, gas combustible que puede ser usado como fuente de energía para generar calor o electricidad, entre otros usos. Es de resaltar que prácticamente no hay consumo de energía para la operación del sistema anaerobio comparado con el sistema aerobio. Además, tan solo el 10% de la energía de sustrato se transforma en lodo, lo cual representa una gran ventaja sobre los sistemas aerobios pues hay hasta seis veces menos masa de lodos que tratar y disponer, lo que reduce significativamente los costos asociados a estos requerimientos.

La ventaja que posee el sistema aerobio sobre el anaerobio, y por lo cual es utilizado ampliamente, es que la calidad del agua tratada es superior al efluente anaerobio y permite cumplir con regulaciones ambientales estrictas. Los efluentes anaerobios mantienen materia orgánica disuelta (demanda química de oxígeno, DQO) y compuestos inorgánicos en su forma reducida (amonio, sulfuro de hidrógeno), que generan mayores impactos al medio receptor.

Si se deseara utilizar el sistema anaerobio para sacar ventaja de las características antes mencionadas, este sistema debe ser seguido de un sistema aerobio de pulimento para terminar de degradar la materia contenida en el efluente anaerobio y así cumplir con las normas de descarga.

Una configuración del sistema de tratamiento de aguas residuales que considere en primera instancia un sistema anaerobio y en segunda un sistema aerobio acarrea ventajas económicas, sobre todo en lo referente a la operación y mantenimiento, sobre una opción solamente aerobia. El sistema anaerobio removerá alrededor de un 65% de la materia orgánica del agua residual sin requerimientos de energía para aireación; el resto de materia orgánica lo terminará de remover el sistema aerobio, produciendo agua con excelente calidad, y todo ello con una menor producción de lodos de desecho y un biogás que podría ser utilizado en la misma planta.

*Una combinación de sistemas anaerobios con sistemas aerobios disminuye los costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento, al reducir el consumo de energía y la producción de lodos.*

### 1.3 TECNOLOGÍAS EXISTENTES

Como se ha visto, existe una gran variedad de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento de agua residual (Figura 1.2). Los componentes individuales de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos o biológicos unitarios. Estas operaciones y procesos unitarios se combinan en los sistemas de depuración de aguas residuales, dando lugar a un tren de tratamiento, como se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Ejemplos de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales.

### 1.3.1 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES DE TRATAMIENTO DENTRO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El nivel de tratamiento para un agua residual depende del uso o disposición final que se le quiera dar al agua tratada, lo que puede estar determinado por alguna normatividad. A continuación se describen someramente los distintos niveles de tratamiento.

#### TRATAMIENTO PRELIMINAR

El tratamiento preliminar de un agua residual, como se muestra en la Figura 1.5, se refiere a la eliminación de aquellos componentes que puedan provocar problemas operacionales y de mantenimiento en el proceso de tratamiento o en los sistemas auxiliares. Ejemplo de ello, es la eliminación de componentes de gran y mediano volumen como ramas, piedras, animales muertos, plásticos, o bien problemáticos, como arenas, grasas y aceites. El tratamiento se efectúa por medio de cribas o rejillas, desarenadores, flotadores o desgrasadores. En ciertas ocasiones se emplean trituradores para reducir el tamaño de ciertos desechos y reincorporarlos al tratamiento.

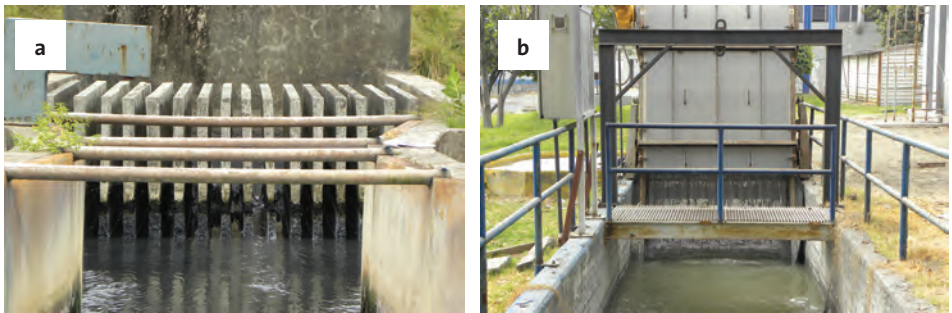


Figura 1.5. Rejillas y sistemas de desarenado. a) Planta de tratamiento de aguas residuales municipales, Brasil b) Planta de tratamiento de aguas residuales municipales Cerro de la Estrella, México.

#### TRATAMIENTO PRIMARIO

En este nivel de tratamiento, una porción de sólidos y materia orgánica suspendida es removida del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio. Las cifras de remoción comúnmente alcanzadas en aguas residuales municipales son del 60% en sólidos suspendidos y de 30% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5). Esta remoción generalmente se lleva a cabo por sedimentación y es considerada como la antesala para el tratamiento secundario (Figura 1.6).



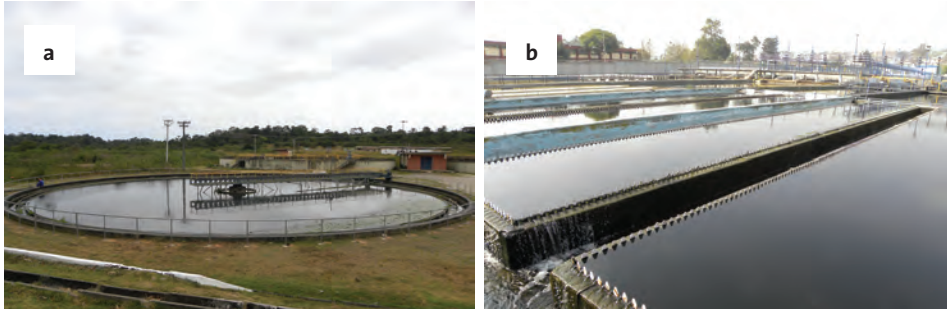


Figura 1.6. Sedimentadores. a) Planta de tratamiento de aguas residuales municipales, Brasil  
b) Planta de tratamiento de aguas residuales municipales Cerro de la Estrella, México.

### TRATAMIENTO SECUNDARIO

En esta etapa de tratamiento se elimina la materia orgánica biodegradable (principalmente soluble) por medios preferentemente biológicos debido a su bajo costo y alta eficacia de remoción.

Básicamente, los contaminantes presentes en el agua residual son transformados por los microorganismos en materia celular, energía para su metabolismo y en otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Estas células microbianas forman flóculos, los cuales son separados de la corriente de agua tratada, normalmente por sedimentación. De esta forma, una sustancia orgánica soluble se transforma en flóculos que son fácilmente retirados del agua. En el caso del agua residual doméstica o municipal, el objetivo principal es reducir el contenido orgánico y, en ciertos casos, los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo.

Los procesos biológicos se dividen en dos grupos; los anaerobios y los aerobios. El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho. Por lo contrario, en el tratamiento aerobio, una mayor cantidad de energía del sustrato es utilizada para la síntesis celular, por lo que hay una mayor generación de biomasa como lodo no estabilizado, cuyo tratamiento y disposición incrementa la dificultad técnica y el costo del tratamiento. Un esquema simplificado de este flujo de energía del sustrato se presenta en la Figura 1.3.

### TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO

Este tipo de tratamiento se refiere a todo tratamiento hecho después del tratamiento secundario con el fin de eliminar compuestos tales como sólidos suspendidos, nutrientes y la materia orgánica remanente no biodegradable.

Por lo general, el tratamiento terciario es necesario cuando deben cumplirse condiciones de descarga estrictas (remoción de nutrientes) o cuando el agua tratada está destinada a un uso en específico. En

tal caso, el arreglo de tratamiento terciario debe ser el necesario para alcanzar esa calidad específica, lo cual implica una gran diversidad de posibles combinaciones de operaciones y procesos unitarios.

### TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DEL LODO

La generación de lodo en cualquier tipo de tratamiento es inevitable y es un factor muy importante que debe ser considerado para una buena elección del proceso de tratamiento. Como se ha mencionado, la ley de la conservación de la materia conduce al hecho que la materia no se crea ni se destruye, solamente se transforma. En el caso de las plantas de tratamiento, los contaminantes se transforman, en parte, en lodo.

Algunos procesos para el tratamiento del lodo son la digestión anaerobia, la digestión aerobia, el

*El argumento de que un proceso de tratamiento de aguas residuales no produce lodos debe ser visto como una falta de conocimiento técnico o como un recurso de venta engañosa.*

composteo mezclado con residuos celulósicos, la estabilización con cal, la incineración y la pasteurización. Como destino final podrán ser desechados en lugares especialmente acondicionados para ello (mono-relleno sanitario) o si la legislación ambiental lo permite, en rellenos sanitarios municipales. Una opción atractiva para la disposición final es el aprovecharlos como mejoradores de suelos o fertilizantes

agrícolas, siempre y cuando cumplan con la normatividad asociada a la producción de biosólidos, nombre como se les conoce a los lodos tratados y acondicionados para su aprovechamiento en tierras.

### SISTEMA DE CONTROL DE OLORES

El impacto de los malos olores provenientes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales ha acompañado siempre a estos sistemas. En este sentido, los malos olores son la principal preocupación de la población cuando se habla de la instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales cercano a sus domicilios. En los últimos años, la preocupación por los derechos de la población a un ambiente saludable, asociada a la implementación de mejoras en la legislación ambiental se ha incrementado, lo que ha conducido hacia la importancia de minimizar las emisiones de olores en el tratamiento de aguas residuales, especialmente las domésticas o municipales. Este aspecto se ha convertido en un reto significativo en el ámbito del manejo de las aguas residuales.

En un tren de tratamiento completo, las unidades que mayormente se identifican como fuentes potenciales de malos olores son el tratamiento preliminar y el tratamiento de lodos. En un buen número de ocasiones, el problema de olores se da desde la red de drenaje, causando impactos en al-

cantarillas y cárcamos de bombeo y, obviamente, en la obra de entrada a la planta de tratamiento, lo cual implica que la generación de olores no necesariamente se debe a la planta de tratamiento en sí.

La Figura 1.7 presenta las diversas fuentes de olores en un tren de tratamiento de aguas residuales municipales, con los porcentajes de ocurrencia para cada una de ellas.

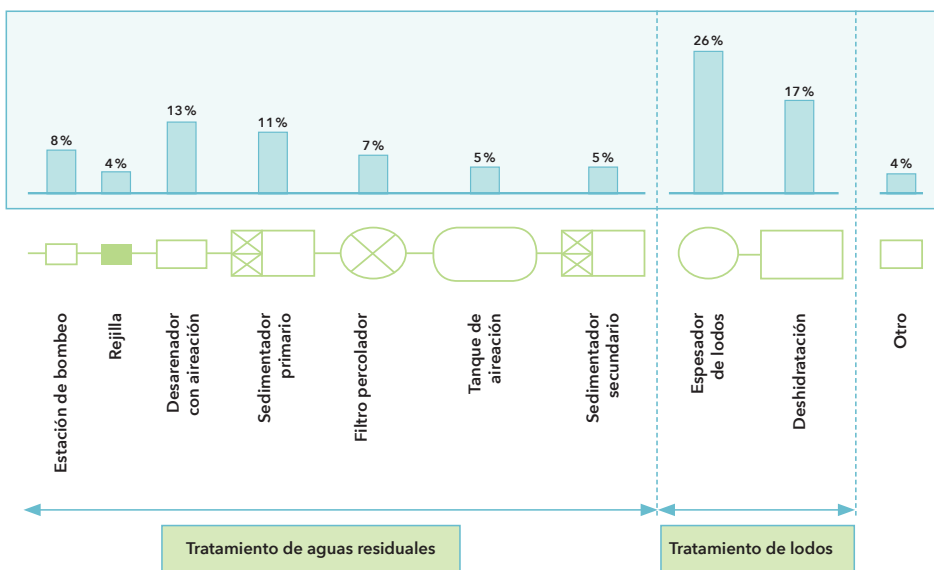


Figura 1.7. Principales fuentes de olores en una planta de tratamiento <sup>1</sup>.

### 1.3.2 PROCESOS AEROBIOS

#### SISTEMAS DE LAGUNAS

En estos sistemas, la simbiosis entre bacterias y algas se aprovecha para degradar la materia orgánica; las primeras consumen materia orgánica y oxígeno y producen  $\text{CO}_2$ , mientras que las segundas consumen  $\text{CO}_2$  y producen oxígeno por medio de la fotosíntesis, lo que mantiene concentraciones de oxígeno disuelto adecuadas en la zona superior de la laguna. Un sistema de tratamiento basado en lagunas generalmente se compone de dos o tres estanques, conectados en serie (Figura 1.8).

<sup>1</sup> Frechen F. B. (1988). Odour emissions and odour control at wastewater treatment plants in West Germany. *Water Sci. Technol.* 20, 4/5, 261-266.

La primera es del tipo facultativa (zona aerobia en la parte superior y zona anaerobia en la parte inferior) con una profundidad entre 1 y 2 m; la segunda es de tipo de oxidación o pulimento (no hay zonas anaerobias) con una profundidad menor a 1 m. En esta laguna se logra abatir la concentración de microorganismos patógenos. En algunos sistemas se instala una laguna anaerobia como primer elemento de la serie de tres lagunas. En este tipo de lagunas se retienen los sólidos suspendidos y materia flotante, liberando a la segunda laguna (facultativa) de esta importante carga. Las lagunas anaerobias tienen profundidades entre 3 y 5 metros por lo general.

En los sistemas de lagunas existe la variante de lagunas aireadas, que se distinguen de las facultativas principalmente porque se les suministra oxígeno mediante mecanismos de aireación artificial, generalmente con aireadores flotantes (Figura 1.9a). En esta modalidad del proceso, dependiendo de la profundidad y de la potencia de agitación instalada, se tendrán lagunas totalmente aireadas o bien aireadas facultativas, donde existirán zonas aerobias y anaerobias. Su profundidad varía entre 2 y 5 metros.

Los lodos que se generan y se sedimentan en lagunas deben ser evacuados en intervalos de tiempo de 1 a 5 años para lagunas anaerobias, y de 10 a 20 años para facultativas y de pulimento, según la carga de sólidos que reciban. El grado de estabilización del lodo generalmente permite la disposición en campo o en relleno sanitario. El esquema recomendado para el secado y evacuación de lodos en una laguna es el diseñar desde un inicio dos sistemas de lagunas en paralelo, con el fin de poder sacar de operación la laguna de la que serán retirados los lodos, sin que esto afecte en grado importante el tratamiento del agua residual. Una vez evacuada el agua de la laguna, se deja secar el lodo al exponerlo al sol hasta que puede ingresar maquinaria de movimiento de tierras para cargar los camiones de lodo que lo conducirán al sitio de disposición final. Esta acción debe programarse para la temporada del año en que no se presentan lluvias (estiaje).

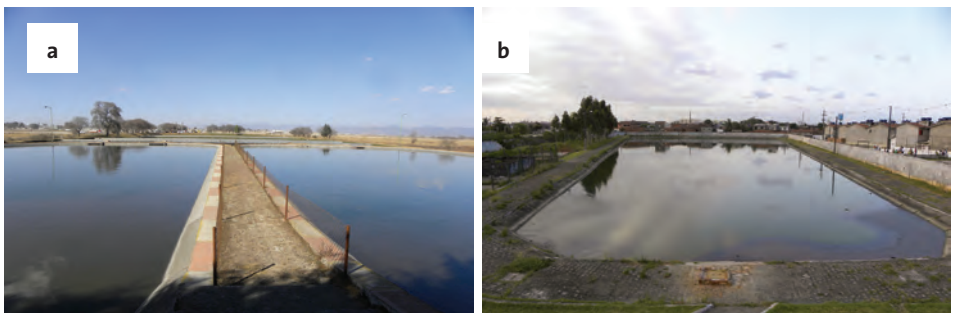
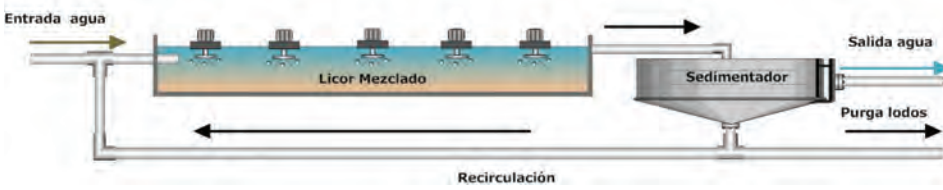


Figura 1.8. Lagunas de estabilización, a) Planta de tratamiento de aguas residuales de Santa María Rayón, México, b) Planta de tratamiento de aguas residuales, Brasil

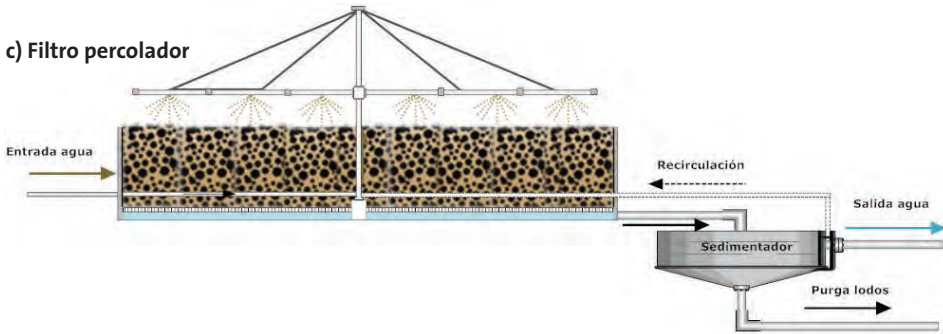
a) Laguna aireada



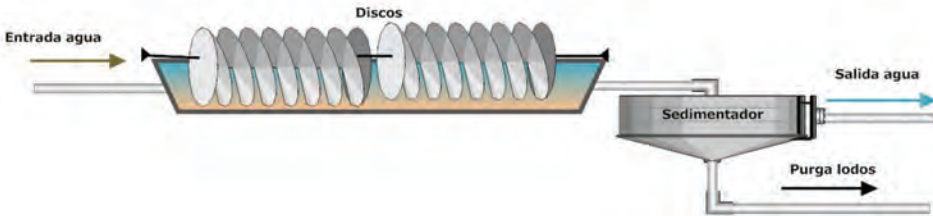
b) Lodo activado



c) Filtro percolador



d) Discos biológicos rotatorios



e) Filtro aerobio sumergido

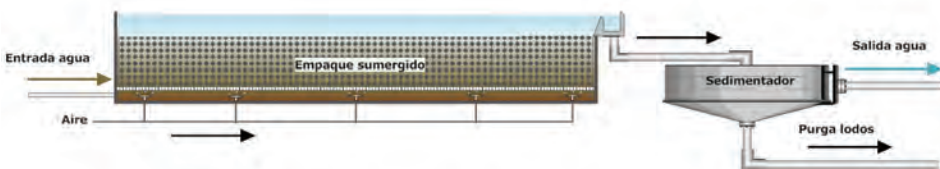


Figura 1.9. Procesos aerobios para el tratamiento de aguas residuales.

## PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Este proceso ha sido y es uno de los más utilizados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico o municipal. Existen alrededor de 13 variantes de lodos activados; los sistemas de flujo pistón, totalmente mezclado de media carga y el de aireación extendida (baja carga) son los más comunes. Una variante particular es el reactor secuencial por lotes (sequencing batch reactor, SBR) que opera en forma discontinua con las etapas de alimentación, reacción, sedimentación y vaciado. La gran ventaja de este sistema es que se lleva a cabo en un solo tanque, el cual cuenta con dispositivos para proveer aeración, mezclado y sedimentación. Este sistema debe contar con al menos dos tanques que funcionen en forma alternada.

En los procesos de lodos activados, los microorganismos se encuentran mezclados con la materia orgánica que digerirán para reproducirse y sobrevivir. Cuando la masa de microorganismo crece y es mezclada con la agitación introducida al tanque por medios mecánicos o de inyección de aire, ésta tiende a agruparse (floculación) para formar una masa activa de microorganismos denominada lodo activado; a la mezcla de este lodo con el agua residual se llama licor mezclado. El licor mezclado fluye del tanque de aireación a un clarificador secundario donde el lodo activado sedimenta (Figura 1.9b). Una porción del lodo sedimentado debe ser retornado al tanque de aireación para mantener una apropiada relación sustrato-microorganismo y permitir así una adecuada degradación de la materia orgánica.

Debido a que en el tanque de aireación se produce lodo activado por la reproducción de los microorganismos, una cierta cantidad debe ser desechada del sistema con el objeto de mantener constante su concentración en el tanque de aireación; esto es lo que se conoce como lodo de purga. Por otra parte, un requerimiento básico del sistema de lodos activados es su adecuada aireación, que puede ser realizada mediante difusores de aire o aireadores mecánicos.

En el reactor completamente mezclado, las partículas que entran al tanque de aireación son inmediatamente distribuidas en todo el volumen del reactor logrando una homogeneidad completa en el mismo (Figura 1.10). La concentración de contaminantes en el reactor es, idealmente, la misma en todo el volumen del reactor y por lo tanto en su salida.

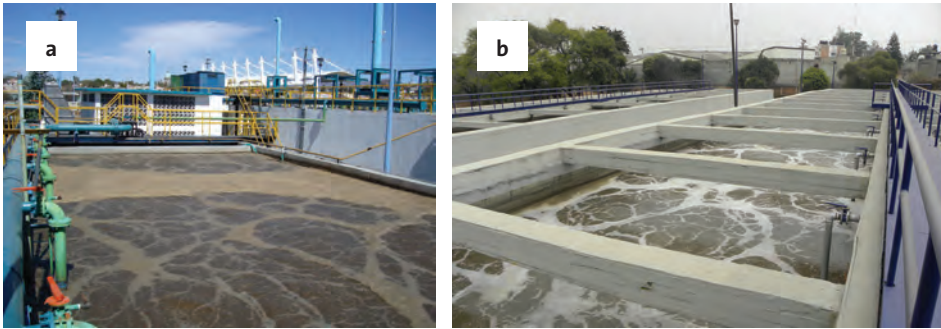


Figura 1.10. Lodos activados, a) Planta de tratamiento de aguas residuales Santa Rosa Jáuregui, México  
b) Planta de tratamiento de aguas residuales de Coyoacán, México.

Por su parte, en el reactor con flujo pistón la concentración de materia orgánica es función de su ubicación en el tanque, de longitud considerable en comparación con su profundidad y anchura. Este tipo de reactor se puede concebir teóricamente como una sucesión infinita de tanques totalmente mezclados con volumen diferencial que le confieren una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

El reactor con aireación extendida es similar a uno completamente mezclado excepto en el tiempo de retención hidráulica y celular que es mayor para permitir la digestión del lodo por medio de la respiración endógena. En estos sistemas, se prescinde del sedimentador primario, de forma que la totalidad de la materia orgánica es recibida en el tanque de aeración. La baja carga orgánica y el largo tiempo de residencia de lodos, características de esta variante, permiten alcanzar la estabilización del lodo, mediante un proceso similar al de la digestión aerobia, realizado en forma simultánea al consumo de la materia orgánica del influente. La ventaja de esta variante es que simplifica considerablemente el manejo de lodos, aspecto importante sobre todo en pequeñas plantas de tratamiento. La desventaja inherente es que el costo por energía eléctrica es mayor por unidad de agua tratada en comparación con la variante convencional o completamente mezclada.

Cabe señalar que en años recientes se ha desarrollado tecnología que permite incorporar las ventajas de la biomasa fija a los sistemas de lodos activados. Esta consiste en colocar dentro del tanque de aireación

El sistema de lodos activados en sus variantes completamente mezclado y aireación extendida es uno de los sistemas más utilizados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales municipales. Ocupa el primer lugar en caudal tratado y el segundo lugar como número de sistemas usados en América Latina, después de las lagunas de estabilización.

material de empaque de talla pequeña (piezas de 1 a 2 cm de lado o diámetro) y de densidad semejante a la del agua, en un 30 a 40 % del volumen de dicho tanque. Este empaque, que sirve de soporte para la adhesión de microorganismos, se mantiene en suspensión en el licor mezclado por lo cual se mueve en conjunto con él en todo el volumen de aireación. El empaque permite concentrar el microorganismo en el licor mezclado, lo cual hace que el sistema absorba picos orgánicos con mayor facilidad y permita un diseño de tanques con menor volumen. A este sistema se le ha llamado reactor biológico de cama móvil o MBBR por sus siglas en inglés (Moving Bed Bio-Reactor).

### FILTROS PERCOLADORES

En este sistema no se efectúa ninguna acción cribadora o filtrante, por lo que la palabra filtro no está correctamente empleada; sin embargo, el tiempo y el uso han generalizado el término. En tratamiento de aguas residuales, la palabra filtro se debe a la presencia de un material de empaque, que "filtra" las aguas residuales reteniendo la materia orgánica disuelta. En realidad este es un dispositivo que pone en contacto a las aguas residuales con microorganismos adheridos en forma de biopelícula a un empaque, suficientemente espaciado para que circule el aire en forma natural (Figura 1.9c). Un nombre más apropiado para este sistema podría ser el de lecho no sumergido de oxidación biológica o reactor biológico empacado no sumergido.

El material de empaque ideal debe contar con una alta relación área/volumen, ser inerte, resistente, durable y de bajo costo. En la práctica, todos estos atributos no se encuentran en un solo material, por lo que básicamente se tiene acceso a dos tipos de empaques, los naturales (materiales pétreos) y sintéticos (diversas geometrías de piezas de plástico). Los filtros percoladores se operan con distintas cargas orgánicas y superficiales en función de la presencia o no de recirculación. La tasa de recirculación depende de la cantidad de agua tratada que se retorna a la entrada y de la carga orgánica y superficial utilizada en el reactor.

Una característica importante a resaltar de este sistema de tratamiento es que la aireación se efectúa por convección natural, es decir, el aire fluye a través del medio empacado por diferencia de temperaturas entre el ambiente interno del reactor y el externo. Ello conlleva el no uso de sistemas de aireación que consuman energía y es posible obtener eficacias de remoción de contaminantes del orden del 70 a 85% en función de la carga aplicada (Figura 1.11).

*La palabra "filtro" usada en sistemas biológicos debe ser asociada al material de empaque y no a la acción de filtración de partículas en el agua a tratar. La función primordial del empaque es facilitar el desarrollo de una película de microorganismos adherida a su superficie y así favorecer la degradación de la materia orgánica disuelta.*



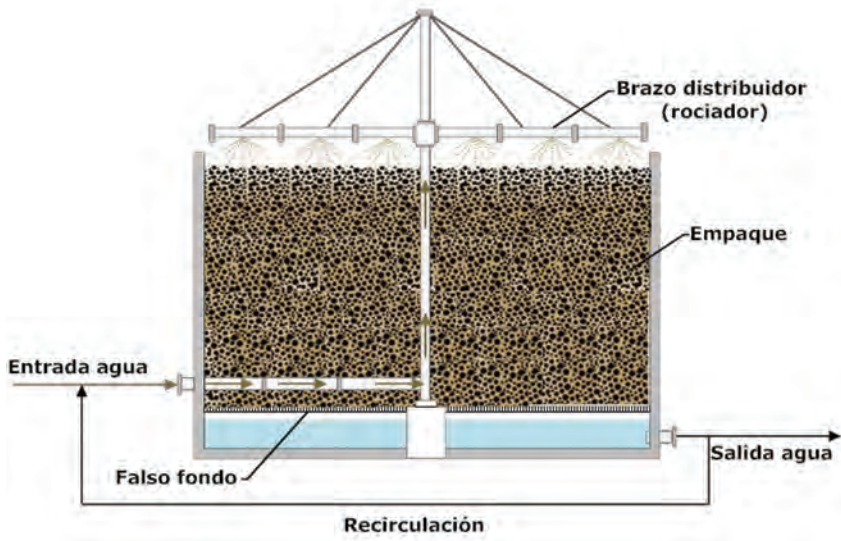


Figura 1.11. Esquema de un filtro percolador.

### SISTEMA DE DISCOS BIOLÓGICOS ROTATORIOS

Este sistema, también conocido como biodisco, consiste en un empaque circular giratorio en el cual se encuentra la biomasa adherida. El disco rota sobre su eje lentamente (2 a 5 rpm) con un 40% de su superficie sumergida en el agua residual, mientras que el resto entra en contacto con el aire, es decir, la biopelícula interacciona con el aire y el agua en forma sucesiva (Figura 1.9d).

El agua tratada pasa después a un sedimentador secundario, en donde se separa la biopelícula desprendida, que constituye los lodos de purga del sistema y que hay que tratar antes de su disposición final. El proceso no requiere recirculación y sus costos de operación son reducidos.

En general, se realizan arreglos de dos o tres tanques de discos biológicos en serie, lo que puede llevar a altas eficacias de remoción de materia orgánica y de nitrificación. En el tratamiento del agua residual doméstica se alcanzan eficacias del 90 al 95% en la remoción de la  $DBO_5$ . Este proceso puede ser utilizado en climas fríos con mayor versatilidad que otros, debido a que opera protegido por una cubierta.

Desde el punto de vista de la conceptualización del proceso, este sistema es ingenioso y evita la difusión forzada de oxígeno en el agua, con el consecuente ahorro en el consumo de energía eléctrica. Sin embargo, el mayor punto débil del sistema no está en el proceso biológico, sino en el mecánico, ya

que el sistema se encuentra soportado en un eje metálico que descansa en rodamientos (chumace-  
ras), elementos que pueden fallar durante la operación debido a desalineamiento o a mala lubricación.

#### **FILTRO SUMERGIDO AEROBIO (FSA)**

Este sistema consiste de un tanque empacado con elementos plásticos, cerámicos o piedras de pe-  
queño tamaño (inferior a los 2 cm). El empaque provee área para la adherencia de los microorganismos y se encuentra sumergido en el agua residual. El oxígeno debe ser incorporado al agua median-  
te difusores colocados en el fondo del reactor y acoplados a un sistema de compresión de aire.

Un filtro sumergido como se muestra en las Figuras 1.9e y 1.12 no contiene en el interior del  
tanque partes móviles y combina un tratamiento con base en biopelícula y biomasa en suspensión,  
características que le permiten alcanzar una concentración alta de microorganismos, proporcionán-  
dole capacidad para el tratamiento de altas cargas de materia orgánica y estabilidad en su operación.  
Este sistema es muy adecuado cuando se manejan altas fluctuaciones de caudal, debido a que la bio-  
masa, estando adherida al empaque que se encuentra inmóvil dentro del reactor, resiste el paso del  
agua a mayores velocidades de flujo de agua o picos hidráulicos, como es el caso del tratamiento de  
aguas residuales domésticas. El uso de este sistema en plantas de mayor tamaño se complica por el  
costo del empaque y/o el peso y desplazamiento de volumen de éste que debe ser compensado con  
una estructura civil más resistente y de mayor tamaño. La resistencia mecánica del empaque debe  
además asegurarse, ya que el aire inyectado en la base del tanque ejerce un efecto abrasivo, que no  
se presenta en los filtros percoladores convencionales.

#### **REACTOR AEROBIO ACOPLADO A MEMBRANAS**

Un desarrollo relativamente reciente lo constituyen los reactores biológicos de membrana (MBR por  
sus siglas en inglés), sistemas compactos que se integran al acoplar un tanque de aireación comple-  
tamente mezclado con un módulo de membranas de micro o ultrafiltración. Las primeras retienen  
partículas hasta 0.1 micras y las segundas hasta 0.01 micras. Estos módulos pueden ser externos  
al reactor o bien sumergidos en el mismo tanque. Las ventajas de este tipo de sistemas es la muy  
alta calidad de agua obtenida (libre de sólidos suspendidos y de microorganismos patógenos) y lo  
compacto de la instalación. Sus desventajas son el costo de las membranas y el taponamiento que  
sufren, lo que implica procesos de limpieza frecuentes y una vida útil de dos o tres años en el mejor  
de los casos. En el estado actual de la tecnología, los reactores MBR no son adecuados para los re-  
querimientos comunes de los sistemas operadores de agua y saneamiento municipales, salvo si se  
requiere producir un agua de reúso de alta calidad.

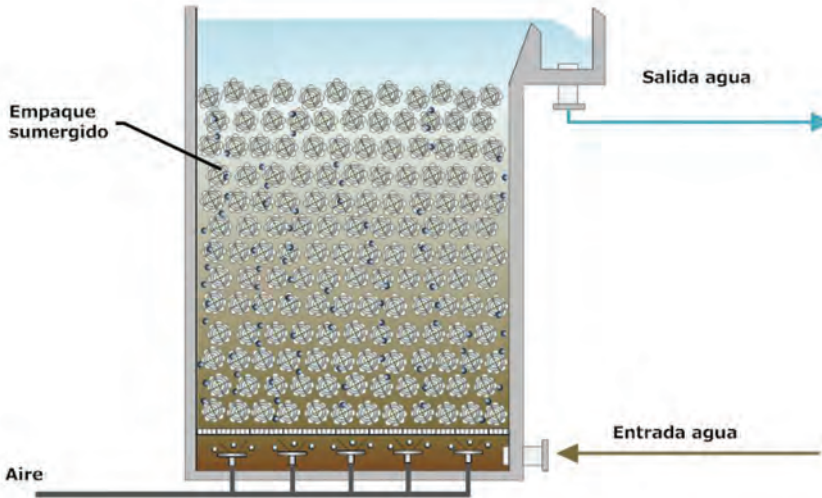


Figura 1.12 Esquema de un filtro sumergido aerobio.

### 1.3.3 PROCESOS ANAEROBIOS

La clasificación común de las diversas configuraciones de reactores anaerobios se hace con base en generaciones, considerando que cada una de ellas tiene características semejantes y que el paso de una a otra se debe a mejoras de proceso que los hacen más compactos y capaces de soportar mayores cargas orgánicas. Básicamente, los reactores de primera generación son sistemas en su mayoría con biomasa sedimentada y sin mezclado, lo que limita grandemente la transferencia de masa (sustrato) entre el medio líquido y los microorganismos (Figura 1.13). Así mismo, no tienen sistemas para incrementar su temperatura. La excepción en esto es el digester de alta tasa, que tiene mezcla y sistema de calefacción con el uso del biogás producido. Otra excepción es el sistema conocido como reactor de contacto anaerobio, que viene a ser la variante anaerobia de los lodos activados. Este sistema, al incorporar la mezcla en el reactor y sobre todo, al contar con un sedimentador de lodos y su recirculación al reactor, es realmente un sistema de transición entre la primera y la segunda generación. La recirculación de los lodos sedimentados permite el control del tiempo de retención celular en el reactor mezclado, lo que resulta en un incremento de la carga orgánica volumétrica a valores superiores a los del resto de los sistemas de la primera generación.

La segunda generación se inicia al lograr retener la biomasa en el sistema mediante la formación de una biopelícula sobre un empaque, o bien por la retención por sedimentación de un lodo denso

*Los dos factores primordiales a considerar para clasificar a los sistemas anaerobios en generaciones es la interacción sustrato - microorganismo y la relación entre los tiempos de retención hidráulica y celular.*

activo, con la suficiente mezcla en la cama de lodos para favorecer la transferencia de masa (Figura 1.14). En estos sistemas se incrementa claramente el tiempo de retención celular sobre el tiempo de residencia hidráulica, lo que se traduce en reactores más compactos y capaces de recibir una mayor carga orgánica volumétrica.

En la tercera generación se avanza en la transferencia de masa del sistema al incorporar una alta velocidad de flujo ascendente en el reactor, lo que aunado a la elevada producción de biogás, resultado a su vez de la mayor carga volumétrica que pueden recibir estos reactores, provoca una fuerte mezcla en la cama de lodos, alcanzando su expansión y fluidificación (Figura 1.15).

A continuación se presenta una breve descripción de los reactores anaerobios presentados en las Figuras 1.13, 1.14, 1.15.

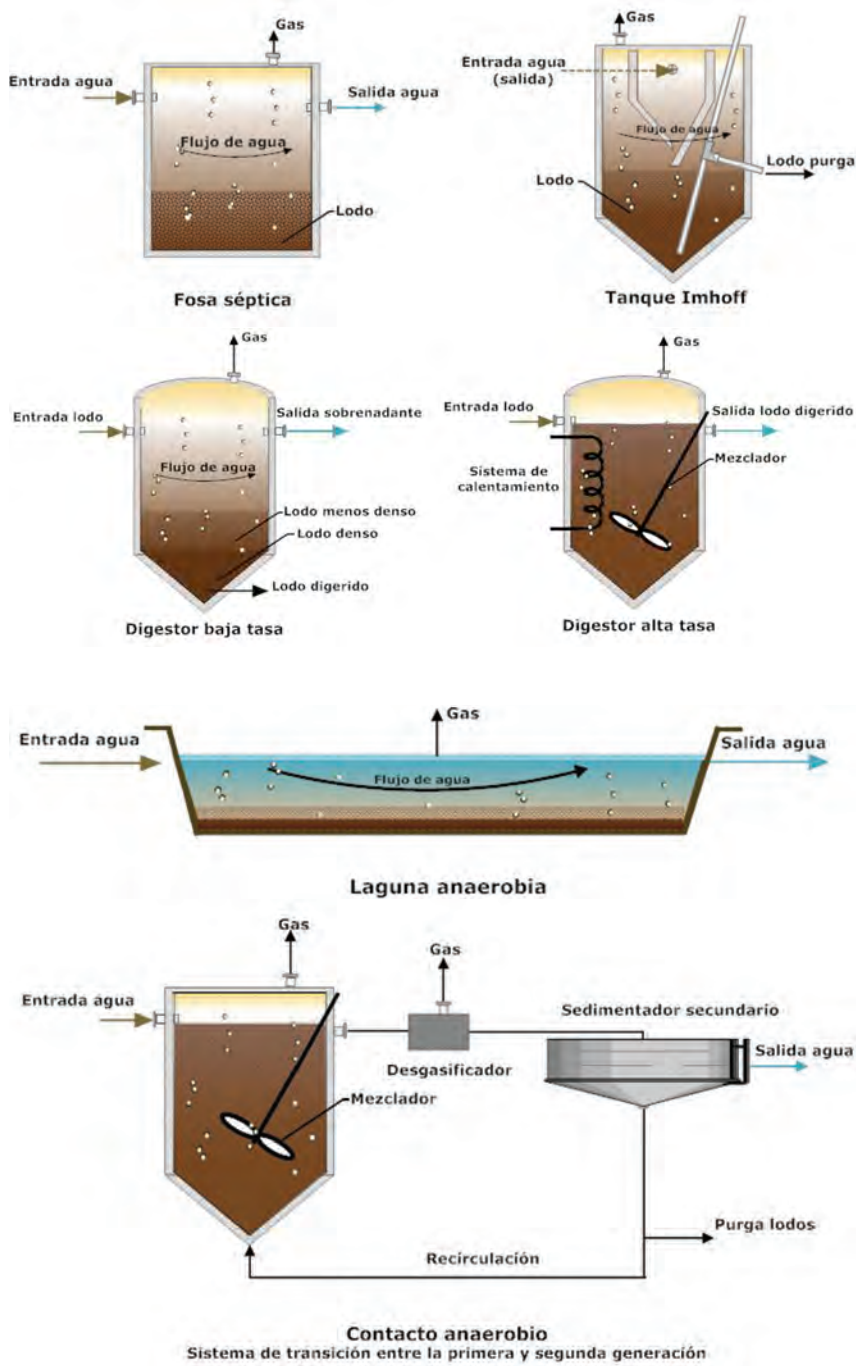


Figura 1.13. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales primera generación.

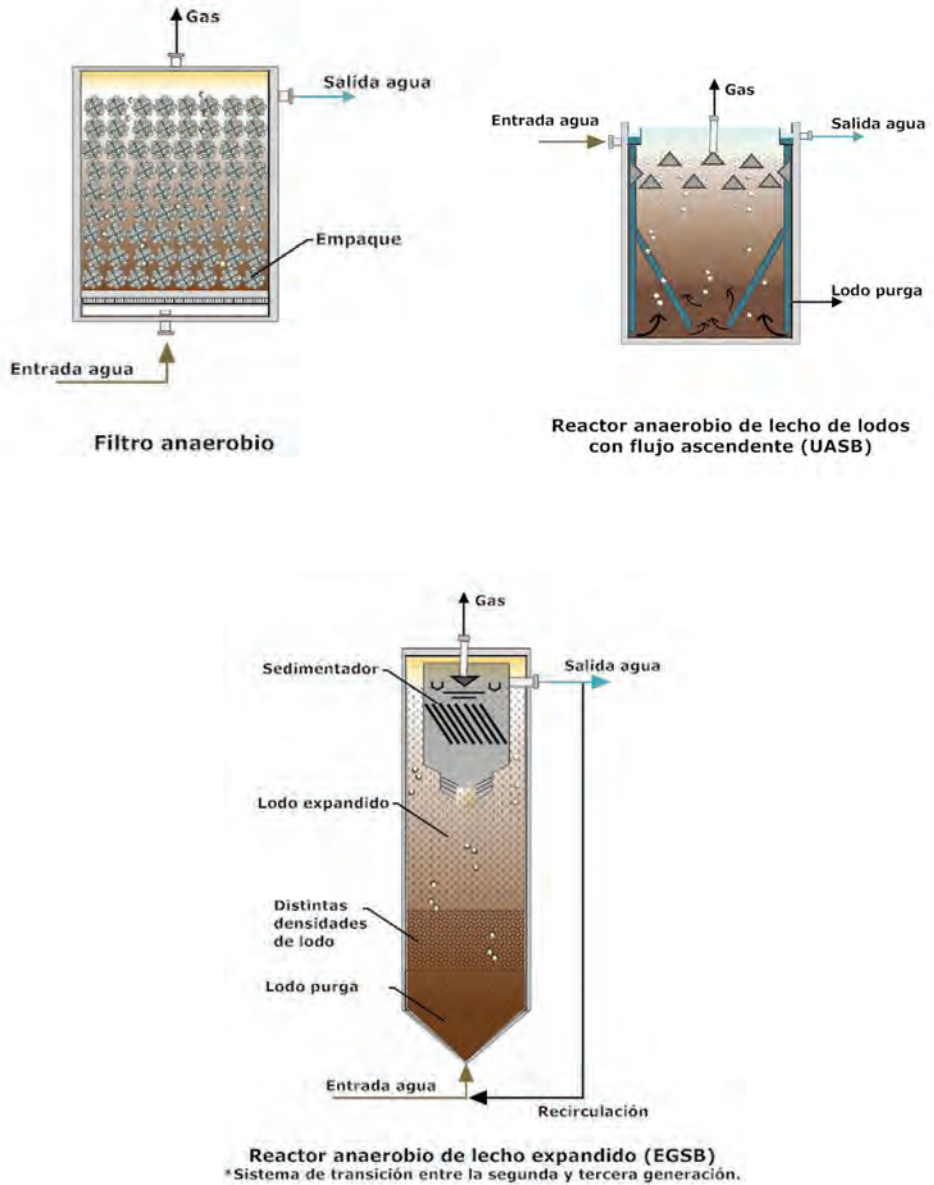
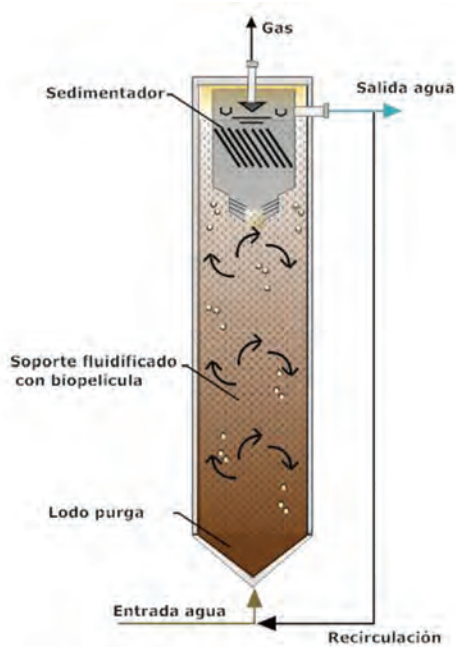


Figura 1.14. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales segunda generación.



**Reactor anaerobio de lecho fluidificado (100% expandido)**

Figura 1.15. Procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales tercera generación

### FOSA SÉPTICA

La fosa séptica puede considerarse como un digestor convencional a escala reducida. Su uso se ha limitado a tratar las aguas de desecho de casas habitación, escuelas, etc.; generalmente, en zonas rurales o bien en áreas urbanas en donde no existe el servicio de drenaje. Las fosas sépticas son tanques, en muchas ocasiones prefabricados, que permiten la sedimentación y la eliminación de flotantes, actuando también como digestores anaerobios. El origen de la fosa séptica se remonta al año 1860, gracias a los primeros trabajos de Jean-Louis Mourais en Francia.

El tanque séptico es la unidad fundamental del sistema de fosa séptica ya que en éste se separa la parte sólida de las aguas residuales por un proceso de sedimentación simple, o bien por flotación natural. En los lodos sedimentados se realiza la digestión anaerobia en condiciones desfavorables, debido a la falta de mezclado y a la temperatura ambiente (Figura 1.13). Estas limitaciones se ven reducidas en cierto grado por el largo tiempo de residencia del lodo dentro del sistema, normalmente de uno a dos años.

Es importante mencionar que los sistemas de fosas sépticas tienen capacidad para hacer un tratamiento parcial de las aguas residuales. En particular, los procesos de digestión anaerobia no se llevan a cabo totalmente, debido a las limitaciones ya señaladas, lo que se traduce en la liberación de materia orgánica soluble como resultado de la hidrólisis de los sólidos orgánicos retenidos como lodos. Por esta razón, el efluente no posee características físico-químicas para ser descargado directamente a un cuerpo receptor, de ahí la importancia de efectuar el postratamiento del efluente de la fosa séptica, o en ciertos casos, dependiendo del tipo de suelo y el nivel del acuífero, de infiltrarlo mediante un pozo de absorción.

#### **TANQUE IMHOFF**

Este sistema puede considerarse como un paso adelante de la fosa séptica. Toma el nombre de su inventor el Ingeniero alemán Karl Imhoff (1876 - 1965) que introdujo en la primera década del siglo XX la innovación de separar la zona de sedimentación de la de retención y digestión del lodo. Su objetivo fue incrementar la capacidad de tratamiento del sistema para dar servicio a un mayor número de usuarios (conjuntos habitacionales, pequeños núcleos urbanos) centralizando el sistema de drenaje hacia un solo sitio y no multiplicando la instalación de fosas sépticas.

El tanque Imhoff tiene por lo general una forma rectangular con una tolva en la parte inferior, y está integrado por una cámara superior que recibe el agua residual y que tiene la función de separar los sólidos de rápida sedimentación. Este material pasa a la cámara inferior a través de una apertura conformada por mamparas de concreto donde será sedimentada y digerida en forma semejante a lo que sucede en una fosa séptica. De la forma del tanque se obtienen las ventajas de mejorar la sedimentación de los sólidos al no tener turbulencia por las burbujas de biogás generadas en la zona de digestión y de retener en forma más eficiente los lodos al no ser arrastrados por los flujos elevados que pueden presentarse en ciertas horas del día.

Los tanques Imhoff ya prácticamente no se construyen, ante la disponibilidad de otras opciones tecnológicas. Al proporcionar un tratamiento de tipo primario, su efluente debe recibir un postratamiento previo a la descarga final.



## LAGUNAS ANAEROBIAS

Este es otro proceso rústico empleado principalmente en aguas de desecho industriales evacuadas a temperatura mayor a la del ambiente y con cierto contenido de sólidos suspendidos sedimentables. Las lagunas anaerobias consisten en tanques profundos (hasta 10 m) normalmente sin cubierta para captar el biogás (Figura 1.13). Por ende, un punto particularmente problemático son los malos olores asociados con estos sistemas.

Las lagunas anaerobias también se aplican en el tratamiento de aguas residuales municipales, como primer elemento de un sistema de lagunas que típicamente se conforma por una laguna facultativa en segundo sitio y una laguna de pulimento al final, tal como se ha mencionado anteriormente. En este arreglo, la laguna anaerobia tiene profundidades entre 3 y 5 metros.

### DIGESTOR ANAEROBIO CONVENCIONAL (SIN MEZCLA)

Este sistema se ha aplicado principalmente para la estabilización de sólidos de aguas residuales altamente concentradas (por ejemplo las aguas residuales de la industria pecuaria) así como de los lodos de desecho provenientes del proceso de lodos activados, aunque en la actualidad sus limitadas eficiencias han hecho que sea sustituido por la versión completamente mezclada (alta tasa) para este último caso. Consiste de un tanque cerrado sin agitación y sin calentamiento, en donde el desecho a tratar se estratifica en zonas definidas (Figura 1.13). La zona microbiana activa ocupa cerca del 30% del volumen total del tanque. Posee tiempos de retención hidráulica mayores a 60 días.

*De la misma forma que la fosa séptica, el tanque Imhoff, las lagunas anaerobias y el digestor convencional basan su funcionamiento en la sedimentación del material particulado y su digestión en el fondo del mismo. Como resultado de una digestión deficiente por la falta de mezclado y la temperatura ambiente, la materia orgánica soluble se incrementa en la salida.*

### DIGESTOR ANAEROBIO DE ALTA TASA (CON MEZCLA Y CALENTAMIENTO)

Este sistema posee la misma función que el digestor anaerobio convencional descrito con anterioridad, sin embargo, la diferencia entre este sistema y el convencional radica en el mezclado y control de temperatura mediante calentamiento del medio (Figura 1.13).

El mezclado del tanque favorece la interacción entre el sustrato a degradar y el microorganismo lo cual, aunado al incremento de la temperatura del interior al valor óptimo (entre 34° y 37°C), incrementa la eficacia de digestión frente a la variante convencional. Ello conlleva la reducción del tiempo de retención hidráulica (y celular) a valores que fluctúan entre los 15 a 20 d y tanques de volumen menor.

Este sistema se utiliza comúnmente para la digestión de lodo proveniente de sistemas de lodos activados en plantas de tratamiento de aguas residuales con caudales superiores a los 500 l/s; su uso en plantas pequeñas no es conveniente por aspectos de costo y economías de escala; en su lugar, cuando se opta por sistemas de tratamiento aerobio, se hace uso de digestores aerobios o bien de la variante del lodo activado tipo aireación extendida, que no requiere de una digestión del lodo adicional, pues como se ha mencionado, se lleva a cabo en el mismo tanque de aireación, a costa de un mayor consumo de energía eléctrica por los aeradores.

#### **REACTOR DE CONTACTO ANAEROBIO.**

Consiste básicamente en un reactor completamente mezclado y calentado acoplado a un decantador que separa la biomasa para que sea recirculada al reactor (Figura 1.13). Es el equivalente anaerobio de los lodos activados aerobios.

El punto problemático en este sistema lo constituye la adecuada separación de los lodos anaerobios en el decantador, pues tienen tendencia a flotar, debido a las burbujas de biogás atrapadas en el interior del flóculo. Esto se llega a solucionar colocando un sistema de desgasificación entre el reactor y el decantador, que funciona con mezclado y bajo un ligero vacío para su extracción. Este sistema se ha aplicado en el tratamiento de aguas residuales concentradas aunque en la actualidad ha sido sustituido por otras tecnologías más eficientes y compactas.

#### **FILTRO ANAEROBIO**

Este sistema, ya de segunda generación, consiste en un reactor inundado de flujo ascendente o descendente empacado con soportes plásticos o piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio (Figura 1.14). El agua residual atraviesa el lecho empacado permitiendo la interacción entre el sustrato en el agua residual y el microorganismo adherido al empaque. Debido a que en este sistema el microorganismo se encuentra adherido al empaque, su tiempo de retención celular es mayor al tiempo de retención hidráulica manejado. Este sistema puede aplicarse en el tratamiento de aguas residuales de casas habitación debido a su alta resistencia a la fluctuación en caudales. En tales casos, este sistema regularmente se coloca después de una fosa séptica con el fin de retener sólidos y flotantes. La eficiencia de remoción para DQO está alrededor del 65% para aguas residuales de tipo doméstico. Instalaciones a escala mayor, debido al alto costo del empaque, pueden no ser recomendables; en el caso de usar piedras como empaque, el costo se incrementa en la estructura civil necesaria debido al peso de la piedra y la baja relación área/volumen que presenta, lo que implica mayores tamaños de tanque.

Existen aplicaciones en el estado de Paraná, Brasil, que integran un reactor anaerobio de tipo lecho de lodos con un filtro anaerobio como elemento de postratamiento. Este arreglo mejora el desempeño del reactor de lecho de lodos al retener sólidos suspendidos que pueden escapar y aporta un ligero incremento en la remoción de la materia orgánica. De cualquier forma, normalmente es necesario introducir una etapa de postratamiento al filtro anaerobio para alcanzar condiciones de descarga acordes con la normativa ambiental.

### **REACTOR ANAEROBIO DE LECHO DE LODOS CON FLUJO ASCENDENTE**

El reactor anaerobio de lecho de lodos UASB (upflow anaerobic sludge blanket) es un reactor de segunda generación con el distintivo particular que no requiere material de empaque para retener los microorganismos. El reactor se basa en la formación de una cama de lodos (biomasa anaerobia granular o floculada) localizada en el fondo del reactor con un volumen aproximado de 1/3 el volumen total de éste.

En la parte superior del reactor se coloca el sistema de captación de biogás (campanas colectoras) cuya función radica en la captación del biogás formado y la de crear una zona libre de biogás, que favorece la buena sedimentación de los gránulos o flóculos anaerobios que pudieran haber atravesado las campanas colectoras de biogás.

La zona ubicada entre la cama de lodos y las campanas colectoras de biogás se denomina zona de expansión de lodo. En ella se aloja el lodo expandido por la acción del biogás y la velocidad ascendente del agua (Figura 1.14).

La particularidad de un reactor UASB radica en el hecho de retener mediante sedimentación los microorganismos en forma de gránulos o flóculos densos, lo que aumenta considerablemente el tiempo de retención celular (TRC). Con esto es posible operar el sistema con reducidos tiempos de retención hidráulica (TRH) y con volúmenes de reactor limitados, conservando buenas eficiencias en la remoción de materia orgánica. En adición a esto, la interacción entre el sustrato y el microorganismo se favorece debido a la turbulencia que provocan las burbujas de gas que ascienden hacia la superficie y al flujo ascendente del agua que atraviesa la cama. Este lecho de lodos funge también como un filtro en el sentido mismo de la palabra; en él queda retenido material particulado que podrá ser degradado en el lecho.

Con un reactor anaerobio tipo UASB alimentado con agua residual municipal típica se pueden lograr eficiencias de remoción en DQO del orden de 60 a 70% (DBO del 70 al 80%).

### **REACTORES DE LECHO EXPANDIDO O FLUIDIFICADO**

Los reactores de alta tasa de tercera generación son aquellos que operan con la biomasa expandida o fluidificada. El nombre dado internacionalmente para este tipo de reactores es el de EGSB por

*En ciertos países latinoamericanos, al reactor UASB se le denomina incorrectamente con el acrónimo RAFA, que indica un reactor anaerobio de flujo ascendente, lo que no resalta la particularidad del sistema, que es la cama o manto de lodos. Un reactor anaerobio de flujo ascendente puede ser en efecto el UASB pero también un filtro anaerobio o un reactor anaerobio de lecho expandido o fluidificado.*

sus siglas en inglés (expanded granular sludge blanket) y de lecho fluidificado, según sea el caso (Figuras 1.14 y 1.15). Estos reactores están orientados básicamente al tratamiento de aguas residuales industriales bajo condiciones de operación muy controladas, por lo que su aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales no es aún recomendable. El reactor EGSB es totalmente dependiente de la adecuada granulación del lodo, ya que de lo contrario, el lodo saldría con el efluente. El lecho fluidificado se basa en material de empaque de pequeño tamaño (no mayor a un milímetro de diámetro por lo general) donde se adhiere la biopelícula anaerobia. En tales casos, la energía de bombeo necesaria para fluidizar el lecho puede ser importante. Un agua residual doméstica o municipal no favorece la granulación debido a la baja

concentración de la materia orgánica; lo que se llega a formar, en dado caso, es un lodo floculento, adecuado para reactores UASB pero no para este tipo de sistema.

Independientemente de que estos sistemas de tercera generación tienen mayores requerimientos de operación y control, es de resaltar la alta eficiencia que alcanzan y la elevada carga orgánica que admiten. En efecto, el estar expandido o fluidificado el lodo dentro del sistema, se logran excelentes condiciones de mezclado lo que favorece la interacción sustrato microorganismo, esto manteniendo un alto tiempo de retención de lodos, muy superior al de retención hidráulica.

#### CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS ANAEROBIOS

En la Tabla 1.1 se presenta una clasificación de los sistemas anaerobios en función de dos variables; es decir, a) la interacción entre el sustrato y los microorganismos y b) la relación entre el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el tiempo de retención celular (TRC). El primer factor se refiere a las condiciones de transferencia de masa dentro del sistema, que puede entenderse como el grado de contacto del sustrato o alimento con el microorganismo o en otras palabras, que tan disponible se encuentra el sustrato para el microorganismo. El segundo factor, la relación entre el TRH y el TRC, se refiere a que tan distinto es el TRH con respecto al TRC. En un tanque completamente mezclado, ambos tiempos son iguales pues los microorganismos se encuentran mezclados en todo el volumen de agua. El caso contrario se observa al estar retenido el microorganismo dentro del tanque (ya sea por medio de un empaque o por sedimentación), en este caso el microorganismo permanece dentro del sistema por un mucho mayor tiempo que el agua que está fluyendo por el tanque. Desde el punto de vista de ingeniería, es

deseable que el TRC sea mucho mayor que el TRH pues así se asegura la permanencia dentro del tanque de los responsables de la degradación de la materia orgánica, es decir, los microorganismos y por otra parte permite manejar un TRH bajo, de tal forma que los tanques sean lo más pequeños posibles. Sin embargo, un alto TRC sin el adecuado contacto del microorganismo con su sustrato, no es útil. El desarrollo tecnológico en los sistemas anaerobios, sin duda alguna ha tenido que ver con estas dos consideraciones (incrementos en la transferencia de masa y en el tiempo de retención celular) y ha hecho que en fechas relativamente recientes se hayan desarrollado sistemas de tratamiento anaerobios compactos con TRH equivalentes, o incluso menores, a los sistemas aerobios, todo ello con adecuadas tasas de degradación de contaminantes y altas eficiencias de remoción.

En la Tabla 1.1 se muestra la clasificación en tres generaciones de los sistemas anaerobios considerando como factores de diferenciación la interacción sustrato-microorganismo, la relación tiempo de retención celular con respecto al tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención hidráulica en sí.

*El concepto generación de reactores en el tratamiento anaerobio no debe entenderse como una secuencia de desarrollos tecnológicos en donde los más recientes sustituyen a los antiguos; los reactores se encuentran vigentes y no se sustituyen unos por otros (salvo tanque Imhoff y contacto anaerobio que han caído en desuso).*

Tabla 1.1. Clasificación de los sistemas de tratamiento anaerobio

TIPO O GENERACIÓN	REACTOR	INTERACCIÓN SUSTRATO-MICROORGANISMO	RELACIÓN TRH/TRC	TRH	ANTIGÜEDAD DEL DESARROLLO
I	Fosa séptica	X	✓	Días	50 a 100 años
	Laguna anaerobia	X	✓		
	Tanque Imhoff	X X	✓ ✓		
	Digestor baja tasa	X	✓		
	Digestor alta tasa	✓ ✓	X		
	*Contacto anaerobio	✓ ✓	✓		
II	Filtro anaerobio	✓	✓ ✓	Horas	30 a 40 años (EGSB 15 años)
	UAS B	✓	✓		
	*EGSB	✓ ✓	✓		
III	Lecho fluidificado	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	Minutos	15 años

\* : reactores de transición entre generaciones  
 X : no adecuado  
 ✓ : adecuado

*La clasificación por generaciones da seguimiento al desarrollo tecnológico de los distintos sistemas anaerobios en forma sistemática y lógica. Existen clasificaciones de sistemas anaerobios que pueden llevar a confusiones, por ejemplo el clasificarlos según se encuentre la biomasa en el sistema; es decir si está suspendida o sedimentada. Para este caso, se podrían agrupar en el mismo tipo, por ejemplo una fosa séptica, un tanque Imhoff y un reactor UASB, que desde el punto de vista de desarrollo tecnológico no tienen relación.*

En la actualidad, se avanza en el desarrollo de sistemas anaerobios acoplados con membranas de micro o ultrafiltración, en seguimiento a los avances logrados con los reactores aerobios de este tipo. El sistema anaerobio, bien puede ser un reactor tipo UASB o uno completamente mezclado. La membrana filtra tanto el lodo como el material coloidal, logrando una alta calidad de agua tratada sin necesidad de un postratamiento aerobio, e incluso, en el caso de las membranas de ultrafiltración, sin requerir una desinfección pues los microorganismos patógenos son también retenidos. La interacción sustrato- microorganismo es excelente al estar el sistema anaerobio mezclado y debido a la barrera física que representa la membrana, el lodo permanece en su totalidad dentro del sistema (adecuada relación TRH/TRC). Aunque conceptualmente es adecuado el sistema, los retos en la investigación y en la conformación de

una tecnología confiable se enfocan en el tema de taponamiento de la membrana, lo cual aún no está resuelto para considerar una aplicación comercial generalizada.

#### 1.3.4 SISTEMA NATURAL CONSTRUIDO TIPO “WETLAND”

Un humedal artificial conocido como “wetland” por su denominación en inglés, es un filtro de materiales granulares (grava por lo común) en donde se desarrolla un sistema de raíces de plantas, que generalmente pertenecen al género *Phragmites* y *Thypha*, conocidos comúnmente como carrizos, tules o totora en los países andinos. Este arreglo proporciona una matriz de grava y raíces a través de la cual fluye el agua a tratar, y donde se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento, semejando el medio natural conocido como rizósfera. Estas plantas aportan el oxígeno atmosférico captado por las hojas a las raíces y rizomas, por lo que el agua residual es trata aeróbicamente por los microorganismos presentes en la rizósfera, y anaeróbicamente por aquellos organismos que se encuentran entre los intersticios del medio granular circundante. Las mayores ventajas sobre otros procesos son su bajo costo de operación, su fácil instalación y mantenimiento, además de producir un efluente de buena calidad ( $DBO_5$  promedio de 25 mg/l).

En la Figura 1.16 se muestra un esquema de un humedal artificial. El suelo de la zona es removido del sitio que ocupará el lecho hasta una profundidad de 1.5 m por debajo del nivel donde fluirá el agua. Este nivel por lo general se encuentra pocos centímetros por debajo de la altura de la zona de

material granular (humedal de flujo subsuperficial). El suelo de esta excavación se impermeabiliza con arcilla compactada o con membranas plásticas (geotextiles), y eventualmente con una losa de cemento o asfalto, con el fin de retener el agua e impedir la infiltración al subsuelo y por lo tanto la pérdida del agua tratada. También pueden llegar a ser altamente eficientes en la eliminación de bacterias y microorganismos patógenos. Este método de tratamiento biológico ofrece también un aspecto agradable a la vista y, en caso de sistemas más grandes, puede constituir asimismo una reserva para la vida silvestre. El problema asociado con este sistema es la alta demanda de área que requiere para su funcionamiento.

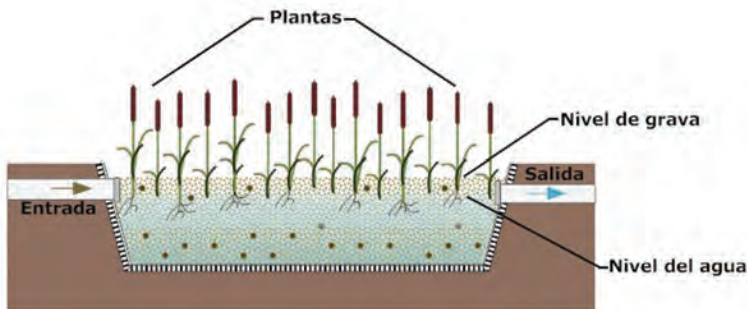


Figura 1.16. Esquema de un filtro de lecho de raíces (wetland).

### 1.3.5 BIOFILTRO PARA EL CONTROL DE OLORES

La biofiltración de corrientes gaseosas consiste en el paso del gas a través de un lecho empacado biológicamente activo, donde los contaminantes son absorbidos y degradados biológicamente por la población microbiana transformándolos a  $\text{CO}_2$ , agua, otros productos oxidados del metabolismo y nuevo material celular (Figura 1.17).

El principal componente del biofiltro es el medio biológico filtrante, en donde los compuestos indeseables en el aire, en primera instancia, son absorbidos y adsorbidos para que puedan ser degradados posteriormente por los microorganismos. El material de empaque del medio biológico filtrante es una mezcla de materiales naturales con un área específica y espacios vacíos grandes, y que puede ser composta, tierra o turba mezclada con un abultante (hojarasca, piedras pequeñas, etc.) o también materiales cerámicos con gran cantidad de poros en su superficie. El medio debe poseer la superficie, la humedad y los nutrientes necesarios para que en ella se desarrolle una biopelícula de microorganismos que serán los responsables de la degradación de los compuestos indeseables en el gas.

En la mayoría de los estudios realizados sobre biofiltración, se ha preferido trabajar con cultivos microbianos mixtos, de manera que tenga lugar una selección natural de la población para degradar compuestos específicos. Una fracción alta de microorganismos / poros (producidos por el material abultante) favorece una baja caída de presión del gas al atravesar la cama, así como una adecuada oxigenación del filtro, retención de humedad y distribución del flujo de gas.

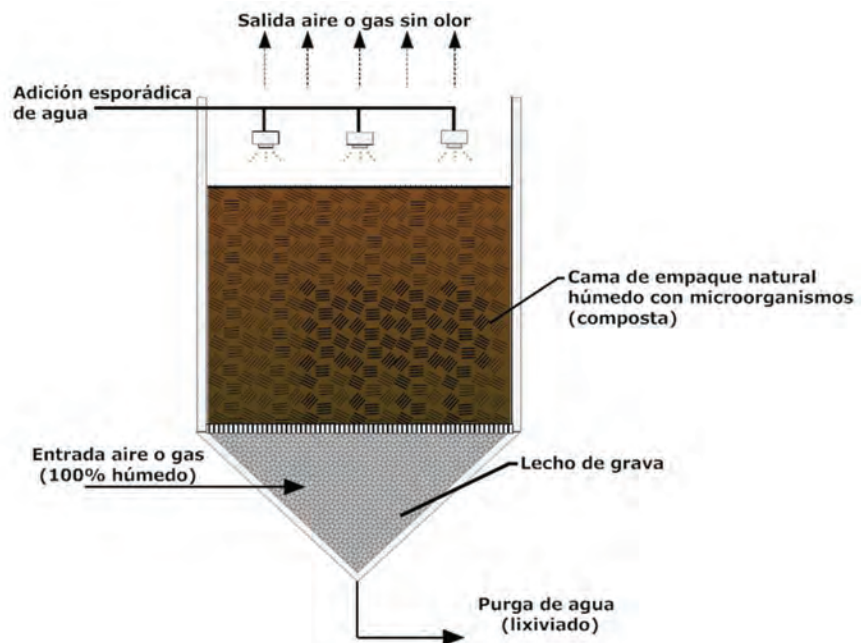


Figura 1.17. Esquema de un biofiltro.

Los biofiltros han sido aplicados con éxito en el tratamiento de malos olores en plantas de tratamiento, así como en plantas de compostaje.

#### 1.4 SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODO

La variable económica de una planta de tratamiento de aguas está influenciada, con un peso específico alto, por el tratamiento y disposición de lodo y subproductos en general. En el caso de las plantas de aguas residuales municipales con lodos activados convencionales, en general, el costo de inversión se distribuye en un 60% para el tren de agua y el 40% para el tren de tratamiento del lodo. En todos los casos, se debe considerar que el manejo del lodo puede tener un alto impacto en



el costo de operación, en particular cuando se tiene que transportar el lodo a lugares lejanos para su disposición final.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales normalmente empleados en la industria o en el tratamiento de aguas residuales de carácter doméstico o municipal, producen lodo, producto de las separaciones sólido-líquido (sedimentación, floculación etc.) o de la coagulación química y del tratamiento biológico.

Estos lodos deben ser sometidos a una serie de tratamientos antes de su disposición final, ya que constituyen un concentrado de la materia orgánica removida del agua. El objeto de estos tratamientos es su estabilización o degradación, seguidas normalmente por una deshidratación para remover agua y así transportarlos hacia el sitio de disposición final o eventualmente para algún aprovechamiento.

Por lo tanto, la planta de tratamiento de aguas residuales debe considerar el tren de proceso para la corriente líquida y el complementario para tratar los residuos sólidos y los lodos resultantes. En ciertas ocasiones, particularmente en instalaciones dentro de zona urbana, hay que agregar un tercer proceso, el de control de olores.

El tratamiento de lodo inicia con la eliminación de sólidos gruesos, con un posterior mezclado de los distintos lodos generados en una planta de tratamiento, con el objeto de lograr homogeneidad. Posteriormente el lodo se espesa hasta alcanzar una concentración de 30 a 40 g/l con el objeto de facilitar su tratamiento y manipulación.

El proceso de estabilización de lodo busca reducir los organismos patógenos, eliminar malos olores e inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción del lodo. Puede darse por vía química (estabilización con cal) o biológica (digestión anaerobia o aerobia y composteo).

Si se habla de una estabilización del lodo, es decir, crear condiciones ambientales (pH y temperatura) dentro del mismo para evitar la proliferación y actividad microbiana, se habla de los procesos de tratamiento con cal y tratamiento térmico. Este tipo de estabilización no implica procesos de degradación microbiana, por lo que la materia orgánica no es removida. Por su parte, la estabilización por vía biológica se logra mediante la reducción por conversión microbiana de la materia orgánica biodegradable presente en los lodos, lo que reduce su potencial putrescible y la masa del residuo. Esto último no se aplica en el caso del composteo, puesto que este proceso requiere de la adición de material celulósico para darle textura y facilidad en el manejo a la masa en tratamiento, lo que aumenta su peso y volumen.

A la digestión le sigue un proceso de deshidratación de lodo hasta alcanzar un 75 a 80% de humedad aproximadamente. En esta etapa generalmente se usan filtros prensa, lechos de secado, centrifugas, filtros banda etc. dependiendo de la cantidad de lodo a tratar (Figura 1.18).

El uso del lodo tratado ha estado orientado por décadas al mejoramiento de suelos. En estos casos el lodo actúa como acondicionador aportando nutrientes, incrementando la retención de agua y mejorando el suelo para la agricultura. En este último caso, el lodo tratado sirve como un sustituto parcial de los fertilizantes que elevan el costo de la producción agrícola. En este rubro hay que tomar en cuenta también el contenido de patógenos, el de metales y compuestos orgánicos que pudieran transformar el lodo en un residuo peligroso. Para ello, en varios países de Latinoamérica se han emitido normas o estándares legales para caracterizar un biosólido susceptible de aprovechamiento en varios usos, según la calidad alcanzada en su producción.

Un caso especial de uso de lodo con valor económico alto se encuentra en el uso del lodo de purga de los reactores anaerobios tipo UASB que tratan aguas residuales industriales, ya que es un lodo granular activo muy demandado para la inoculación de otros reactores de este tipo.

En un sentido más amplio, y en el marco de un desarrollo sustentable, hay que visualizar el agua residual y el lodo resultante como recursos y no como desechos.



Figura 1.18. a) Filtro banda de la planta de tratamiento de aguas residuales Sur, Querétaro, México, b) Manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Calera, Colombia.

### 1.5 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

La persona o grupo enfrentado ante la selección de una tecnología o sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y hasta sociales, muchas veces en un contexto de mercadotecnia no totalmente veraz. Esto hace que el responsable de la toma de decisiones y su equipo de apoyo deban evaluar varios aspectos.

Una tecnología tenderá a ser sustentable cuando en su concepción y características considere el menor uso de insumos y energía posible, se adapte adecuadamente a las condiciones del medio social y económico que le rodea; es decir, hacer uso de los recursos e insumos locales en la medida de lo posible y que presente el menor impacto al medio ambiente a través del control de sus residuos y emisiones, preferentemente transformándolos en subproductos susceptibles de aprovechamiento en el entorno. En este apartado se comentan consideraciones importantes a tomar en cuenta para la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

### 1.5.1 DIVERSIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES

La variación del caudal, tipo y concentración de los contaminantes en las aguas residuales domésticas se ve atenuada en las ciudades por la incorporación del agua proveniente de la actividad comercial e industrial comprendida en el área urbana, así como agua de lluvia en el caso de sistemas de drenaje combinados. En este sentido, las aguas residuales de origen municipal son más homogéneas, dentro de ciertos límites, en su composición y es por ello que son aguas residuales relativamente fáciles de tratar. Ello permite efectuar diseños confiables de plantas de tratamiento que, en algunos casos sin hacer una caracterización exhaustiva del agua generada, basta con saber el número de pobladores, su suministro de agua y la proyección de crecimiento.

Sin embargo, se requerirá una caracterización del agua residual, con base en una campaña de muestreo formal y determinando los parámetros que sean necesarios, cuando haya incorporación de agua residual industrial al drenaje (industria alimenticia, industria pecuaria como cría de cerdos, ganado bovino, industria metalmeccánica, industria química etc.). Es evidente que al existir incorporaciones de descargas industriales, la concentración típica de los compuestos normalmente esperados en un agua residual municipal se alterarán a la alza, con el riesgo de incorporar sustancias tóxicas nocivas al procesos de tratamiento del efluente a tratar.

La caracterización de un agua residual consiste en determinar, mediante una serie de pruebas de laboratorio, la concentración de los elementos o compuestos químicos y biológicos que estén presentes en muestras representativas. El número y tipo de compuestos por determinar es función del origen del agua residual y de su sitio de disposición final, que es tomado como base para fijar las condiciones de descarga. Es frecuente que en la práctica no se disponga de muestras de aguas residuales para ser caracterizadas, debido principalmente a que muchos de los sistemas de tratamiento se proyectan en forma conjunta con los centros urbanos, turísticos o industriales que las generarán. En tales circunstancias, resulta de utilidad la información referente a la caracterización de descargas que se generen en sitios o instalaciones semejantes.

Para el caso de poblaciones con alta afluencia turística o con alta población flotante hay que tomar en cuenta el aporte de agua residual que ello genera al caudal promedio determinado.

La Tabla 1.2 presenta los principales parámetros utilizados en la caracterización del agua residual, asociados con el contaminante que miden y los efectos o impactos derivados de una eventual descarga a un cuerpo receptor o a la salud humana.

Tabla 1.2. Principales grupos de contaminantes del agua y sus efectos.

ANÁLISIS PRINCIPAL	CONTAMINANTE CONSIDERADO	EFECTO
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Materia orgánica biodegradable	Abatimiento del oxígeno disuelto en cuerpo receptor. Crecimiento de microorganismos.
Demanda química de oxígeno (DQO) o Carbón orgánico total (COT)	Materia orgánica total	Mismos que DBO. Acumulación en cuerpo receptor. Riesgos de toxicidad.
Sólidos suspendidos totales (SST) Volátiles (SSV) y fijos (SSF)	Materia en suspensión sedimentable y no sedimentable (coloidal).	Sedimentación y azolvamientos en cuerpos receptores. Digestión y liberación de materia orgánica e inorgánica.
Nitrógeno total Kjeldhal (NTK), nitratos y nitritos ( $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ ), fósforo total (Pt), ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )	Nitrógeno y fósforo	Nutrientes que provocan eutrofización en cuerpos de agua. Contaminación de acuíferos.
Grasas y aceites	Grasas y aceites	Acumulación en drenajes y cuerpos de agua. Reducen la transferencia de oxígeno a los cuerpos de agua. Flotación de lodos. Contaminación visual.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Sales inorgánicas	Restringen el uso de agua tratada
Coliformes fecales y huevos de helmintos	Patógenos y parásitos	Transmisión de enfermedades gastrointestinales.

Una vez caracterizada el agua residual, resulta necesario definir su reutilización o disposición final así como los requerimientos necesarios para cumplir con la normatividad, con el objeto de determinar los constituyentes que deben ser removidos y la calidad del agua tratada a la que se debe llegar.

### 1.5.2 USO O DISPOSICIÓN FINAL DEL AGUA TRATADA

El municipio deberá identificar el destino final del agua tratada según sea el ámbito legal y las necesidades de tratamiento y requerimiento de agua.

En una planta de tratamiento municipal, el agua tratada es el principal producto a obtener, al cual vienen aparejados otros residuos, que con un correcto manejo, pueden transformarse en subproductos susceptibles de aprovechamiento, tales como los lodos o biosólidos y el biogás. La calidad del agua tratada debe ser definida en función de la normativa de descarga que se aplique en el caso particular, o bien, en regiones con escasez de agua, del tipo de reutilización que se le quiera dar. En estos casos, el recurso ha obtenido, a través del tratamiento que se le ha dado, un valor agregado considerable. El definir con precisión la calidad de agua tratada es un aspecto de primordial importancia para la posterior configuración del tren de proceso de tratamiento.

### 1.5.3 DIVERSIDAD DE OFERTA TECNOLÓGICA

Como se comentó en el inciso 1.2, existe en el mercado del tratamiento de aguas residuales una oferta tecnológica amplia amparada bajo el marco de distintas marcas comerciales. Sin embargo, con frecuencia las diferentes tecnologías dentro de un mismo tipo presentan ligeras variantes, muchas veces solo desde una estrategia de mercadotecnia. Como se comentó con anterioridad, al conocer el tipo de tecnología y al saber su integración dentro de un tren de tratamiento específico de aguas residuales, es posible dilucidar las eficacias de tratamiento del agua residual y sus requerimientos en cuanto a energía e insumos en general, independientemente de lo que el promotor pueda asegurar en su proceso de venta.

El número de tecnologías existentes es finita y se desarrollan avances con relativa lentitud; aparentemente la diversidad de oferta tecnológica en el campo del tratamiento del agua residual pareciera ser muy amplia, sin embargo no es así en realidad. En función de las condiciones de proyecto de que se trate y si se restringe al tratamiento de aguas residuales de origen municipal, se observa que el uso más frecuente de tecnologías y su integración en trenes de tratamiento se reduce a menos de ocho.

Desafortunadamente hay en el mercado ofertas que pueden calificarse como fraudulentas, ya que ofrecen niveles de tratamiento imposibles técnica y económicamente, siendo la detección de ello unos de los principales retos que tiene el responsable de la toma de decisiones.

### 1.5.4 COSTO DE INVERSIÓN Y RECURSOS PARA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Por razones obvias, el costo de inversión inicial es considerado como uno de los elementos más importantes para seleccionar un proceso; sin embargo, siempre debe estar íntimamente relacionado con los costos de operación y mantenimiento, en un horizonte de largo plazo correspondiente con la vida útil de la planta de tratamiento.

Se deberá favorecer la aplicación de aquel proceso que, cumpliendo con una calidad de agua exigida, posea el más bajo costo de inversión, pero sobre todo aquel que contenga el más bajo costo de operación y mantenimiento pues se ha visto que este rubro es el aspecto limitante más importante para obtener continuidad en el tratamiento del agua

En el ámbito del tratamiento de las aguas residuales de tipo municipal, cabe la posibilidad de que sea más fácil obtener recursos económicos para la inversión en una planta de tratamiento en comparación con los relacionados a la operación y mantenimiento de la misma, más aún si se considera que este tipo de infraestructura se proyecta con una vida útil de 20 años o más. Este aspecto es clave para que la inversión perdure en el tiempo, se mantenga operando y haga la función para lo que fue diseñada.

En la región de América Latina son muchos los ejemplos de plantas de tratamiento que están abandonadas o trabajando en condiciones precarias. El hecho de que los periodos de la administración municipal en varios países sean relativamente cortos hace que los sistemas de agua y saneamiento enfrenen la periódica pérdida de conocimiento y experiencia, además de repetir la negociación de sus presupuestos anuales. Tal situación se ve agravada por la frecuente ausencia de planeación a mediano y largo plazo en el ámbito de los gobiernos municipales.

En este mismo sentido, no solamente es necesario prever los recursos económicos para la operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento sino también la existencia de repuestos o refacciones de los equipos y la disponibilidad de apoyo técnico para dar mantenimiento preventivo o correctivo a sus equipos. Ello, evidentemente, está relacionado y depende del tipo de tecnología y equipamiento que se seleccione.

### **1.5.5 REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS, SEDIMENTABLES Y FLOTANTES**

Para la remoción de sólidos gruesos se utiliza el cribado en la fase inicial del tratamiento (pretratamiento) así como la sedimentación de arenas y sólidos densos en equipos conocidos como desarenadores. La filtración se debe utilizar, en el caso de que se requiera, después del tratamiento secundario o terciario, no antes.

La filtración es eficiente para la remoción de sólidos suspendidos, sin embargo requiere mayor esfuerzo operacional que un sedimentador.

La coagulación-floculación es utilizada para facilitar la remoción de sólidos en un sedimentador primario, así como para la remoción de fósforo después del tratamiento secundario. En el caso del agua residual doméstica o municipal no es justificable la utilización de un tratamiento químico, pues la remoción de sólidos sedimentables y coloidales puede ser llevada a cabo a costos menores por medio de un tratamiento físico o biológico. Además, los lodos en un tratamiento químico son

producidos en mayores cantidades y contienen compuestos que ocasionan inconvenientes para su disposición final.

La flotación es utilizada para la remoción de grasas y aceites o material flotante, contaminantes que en el primer caso difícilmente se presentan en grandes cantidades en las aguas residuales domésticas o municipales y en el segundo se pueden aplicar sistemas menos complejos.

Existen algunos productos químicos que disuelven las grasas y aceites en el agua residual, y con ello, evidentemente se evita el retiro físico de las grasas; sin embargo, éstas pueden aparecer en los sistemas de tratamiento subsecuentes provocando problemas de flotación de lodo, taponamientos y desestabilización de la planta de tratamiento. Se recomienda no usar este tipo de productos en forma rutinaria, y mejor incorporar políticas de captación de aceites y grasas en la fuente, en el caso de que lo amerite. La remoción de las mismas debe efectuarse manualmente o por medios mecánicos.

Por otra parte, en el mercado existen productos que dicen ser potenciadores biológicos, enzimas que aceleran los sistemas biológicos de tratamiento. Los sistemas de tratamiento biológicos aplicados al procesamiento del agua residual de tipo municipal no requieren de este tipo de productos, ya que los microorganismos necesarios y suficientes para el adecuado funcionamiento de las plantas de tratamiento están presentes en el agua residual y son regulados por el ecosistema generado en la planta de tratamiento. Lo que hace una planta de tratamiento es crear condiciones para su desarrollo, concentración y mantenimiento. El uso de estos productos enzimáticos en estos casos es innecesario y crea dependencia económica, lo que incrementa el costo de operación.

### **1.5.6 REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE**

Para la remoción de la materia orgánica biodegradable existen dos tipos de tratamiento, el anaerobio y el aerobio, que se comentan a continuación:

#### **SISTEMAS AEROBIOS**

En los sistemas de tratamiento aerobios se identifican básicamente cinco procesos (ver sección 1.2), es decir, los lodos activados, el sistema de lagunas de estabilización, el filtro percolador, el filtro sumergido y el disco biológico rotatorio: algunos de ellos se muestran en la Figura 1.19. Se reitera que los demás sistemas aerobios existentes son variantes, combinaciones o mejoras secundarias de estos procesos básicos identificados por una constelación de marcas y productos comerciales.

La disponibilidad de área es el criterio que limita el empleo de lagunas de estabilización ya que requieren, en comparación con los otros sistemas un área de alrededor 70 veces mayor. En centros urbanos, los altos costos del terreno son el factor restrictivo en la selección de este sistema. Sin embargo es

un sistema que prácticamente no requiere equipo electromecánico, tiene los requerimientos más bajos de personal, es capaz de producir agua apta para riego y elimina coliformes cuando incluyen lagunas de pulimento al final del sistema. Sin embargo, hay que considerar los altos costos demandados después de un cierto número de años cuando el sistema requiere el retiro de los lodos acumulados.

Todos los demás sistemas biológicos aerobios como son los lodos activados, filtro sumergido, filtro percolador y discos biológicos rotatorios pueden ser aplicados en el tratamiento del agua residual doméstica o municipal. En este caso, la elección de un sistema de tratamiento estará supeditada básicamente al costo de operación y mantenimiento, así como a criterios que minimicen el impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales. En un agua residual con alta concentración de materia orgánica, en la cual se requiera aplicar un tratamiento que produzca un agua residual para reutilización, es conveniente desde el punto de vista económico la combinación de procesos anaerobios con alguno de los procesos aerobios ya señalados.



Figura 1.19. a) y b) Filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales sur, Querétaro, México, c) Laguna aireada de la planta de tratamiento de aguas residuales de Lago de Texcoco, México, d) Reactor aerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de Metepec, México.



## SISTEMAS ANAEROBIOS

Como se comentó con anterioridad, la característica fundamental que poseen los sistemas anaerobios es que su operación no depende del suministro de oxígeno y por lo tanto no se requieren equipos de aireación y todo lo relacionado con su mantenimiento, operación y costo energético. Es por ello que la consideración del uso de sistemas anaerobios dentro de un tren de tratamiento de aguas residuales, y en específico, en el ámbito municipal latinoamericano, es altamente recomendable cuando la temperatura del agua lo permita (superior a los 20°C)

Dentro de la gama de posibilidades descrita, resalta el reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB) como la opción más favorable técnica y económica a aplicar. La inserción de este reactor en el tren de tratamiento le confiere capacidad de absorber picos orgánicos y disminuye los requerimientos energéticos de los tratamientos subsecuentes, además de que repercute favorablemente en la disminución de la producción de lodos residuales y, dependiendo del tamaño de la planta de tratamiento, inclusive en la producción de energía a través de la combustión del metano en el biogás.

Este tipo de reactor anaerobio, si bien es plenamente aceptado en sus aplicaciones para aguas residuales industriales, se utiliza ya para el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal en algunos países. En Latinoamérica se ha consolidado en Brasil con algunos ejemplos importantes en México, Colombia, Cuba y Nicaragua, por mencionar algunos. Es importante señalar, que aunque el diseño del reactor es relativamente sencillo y el procedimiento para efectuarlo empieza a permear en la literatura técnica, es indispensable que el contratista que proponga este tipo de tecnología tenga experiencia en el diseño. Hay aspectos internos del reactor (captación del biogás, sistema de distribución de agua, medios para la retirada de natas, sistema de purga de lodo) que no están estandarizados, lo que resulta en que el diseño interno y su consecuente funcionamiento dependan de la experiencia del diseñador. Lo mismo puede decirse de los procedimientos para la inoculación y el arranque del reactor. Otro aspecto que la experiencia ha mostrado como de gran importancia es el diseño y la selección de equipos para un adecuado pretratamiento (rejillas y desarenador), ya que el ingreso de arenas y materiales que dentro del reactor sedimenten o floten, pueden provocar complicaciones operacionales y de mantenimiento importantes.

## PROCESOS ACOPLADOS (ANAEROBIO-AEROBIO)

Los procesos acoplados anaerobio-aerobio aumentan la eficiencia energética en el tratamiento de las aguas residuales comparado con una planta solamente aerobia. En la etapa anaerobia se elimina la mayor cantidad de materia orgánica en el agua residual y en la aerobia se pule el efluente anaerobio.

La calidad del agua es recomendada para su reutilización en riego, lavado de coches y calles e inclusive en la descarga de sanitarios, con una adecuada filtración y desinfección, esta última para todos los casos.

Una de las ventajas más importantes que ofrece este tipo de acoplamiento, además del decremento del costo de operación y mantenimiento, es la disminución en más de 5 veces de la producción de lodo, al ser comparada con la de un sistema aerobio convencional. Además, el lodo producido puede considerarse parcialmente estabilizado.

### 1.5.7 REMOCIÓN DE NUTRIENTES

El contenido de nutrientes en el agua provoca problemas como la eutrofización acelerada en lagos, favorece el crecimiento de algas, provoca un consumo de oxígeno adicional en los cuerpos hídricos, es tóxico para los organismos acuáticos superiores, reduce la eficiencia de cloración del agua, algunos compuestos nitrogenados son carcinógenos y otros provocan metahemoglobinemia en lactantes. Por las razones anteriores, para lograr una calidad de agua tratada que pueda ser dispuesta en cuerpos de agua protegidos, es necesario eliminar los nutrientes del agua residual. Varias legislaciones en Latinoamérica consideran este punto.

En el caso de la reutilización del agua en riego de áreas verdes o en la agricultura, la remoción de nutrientes no tendría sentido, ya que esos compuestos son fertilizantes que pueden disminuir la aportación de los productos químicos utilizados para ello.

Para la remoción de nutrientes es posible aplicar procesos fisicoquímicos, pero sus elevados costos y generación de lodo no fácilmente tratable, los hacen en muchos casos no recomendables.

La utilización de sistemas biológicos para este objeto es lo más adecuado. Existen sistemas de tratamiento con biomasa suspendida concebidos para la remoción simultánea de nitrógeno y fósforo. Los sistemas con biomasa fija únicamente remueven nitrógeno. En este último caso, si se requiere la eliminación de fósforo, puede ser conveniente acoplar un proceso químico.

Por otra parte, es posible el uso de sistemas extensivos como las lagunas y los humedales artificiales para la eliminación de nutrientes, aunque ello demanda una considerable área.

### 1.5.8 REMOCIÓN DE PATÓGENOS

La remoción de patógenos es sinónimo de desinfección. Esta es recomendable en todo efluente de una planta de tratamiento y debe ser realizada cuando el agua tratada sea destinada a un uso. Cuando la descarga es a un cuerpo de agua, puede requerirse además de la desinfección, la remoción del agente desinfectante cuando mantiene un efecto residual (caso del cloro).

El cloro, en forma de hipoclorito de sodio, debido a la alta disponibilidad en el mercado, menor riesgo en su manejo comparado con el gas cloro y a la experiencia acumulada, es el desinfectante más utilizado en plantas pequeñas. La desinfección con luz ultravioleta ha sido aplicada con éxito en varias partes del mundo, a pesar de que no tiene un efecto residual como el cloro, por lo que se recomienda en el caso de descargas a cuerpos de agua naturales, o bien que se le agregue cloro para dar ese efecto residual cuando sea destinada a reúso. En una dosis adecuada, el cloro posee un efecto residual por lo que su uso es recomendable cuando haya que almacenar el agua para su posterior disposición o reutilización. Otra forma de clorar el agua es con dióxido de cloro, el cual es altamente efectivo y minimiza los riesgos asociados con su manejo. Otro tratamiento a considerar es la desinfección con ozono, aunque el costo de inversión es elevado al compararlo con los dos tratamientos anteriores.

Se debe mencionar aquí también la capacidad de remoción de patógenos que presentan los sistemas lagunares que terminan con una laguna de oxidación o pulimento, tal como fue presentado en la sección 1.3.2. En estos sistemas además se remueven completamente los huevos de helmintos, lo cual solo puede ser logrado mediante la filtración del efluente tratado en el caso de los sistemas compactos, ya sea aerobios o anaerobios.

### 1.5.9 GENERACIÓN Y TRATAMIENTO DE LODOS

Como se mencionó con anterioridad, la generación de lodo en el tratamiento del agua es inevitable y es un factor muy importante, por los costos de operación que implica su manejo, que debe ser considerado para una buena elección del proceso de tratamiento. En algunos casos, el tratamiento y disposición del lodo generado por una planta de tratamiento llega a requerir un elevado porcentaje de los costos de inversión y operación de la planta, pudiendo alcanzar el 50% de la inversión total.

Por otro lado, una planta de tratamiento puede generar otro tipo de residuo como los lodos químicos producidos por la coagulación-floculación-sedimentación (tratamiento primario avanzado), arenas, sólidos voluminosos retenidos en el tratamiento preliminar, grasas y aceites. Dependiendo de la cantidad y calidad de los lodos generados en estos casos, éstos podrán requerir un tratamiento específico, o directamente ser confinados en rellenos sanitarios.

El tratamiento del lodo inicia con su espesamiento con el objeto de manejar menos agua durante su estabilización. El espesamiento puede llevarse a cabo en sedimentadores llamados espesadores donde se concentra el lodo, o en sistemas de flotación o los llamados "decanters" centrífugas que llevan el lodo a concentraciones del orden de los 40 a 60 g/l. El tratamiento de lodo primario y secundario puede ser realizado por medio de una digestión anaerobia, ello normalmente en plantas de

tratamiento con flujos de agua residual superiores a los 500 l/s. Con flujos menores a este, es de considerarse el tratamiento con digestores aerobios, o bien optar por la variante de aireación extendida.

La incineración del lodo tiene un alto costo de inversión y operación y se debe instalar equipo de control para evitar la contaminación del aire.

El sistema de composteo requiere mano de obra para el mezclado de las pilas, además de demandar mayor área para su procesamiento. Por otro lado, la masa del residuo se incrementa al tener que aportar al lado material celulósico.

La utilización de lechos de secado tiene el inconveniente de producir en ocasiones malos olores y de requerir un área extensa para su localización; sin embargo, debido a la sencillez de su operación, se utiliza con frecuencia en plantas de tratamiento de pequeños caudales.

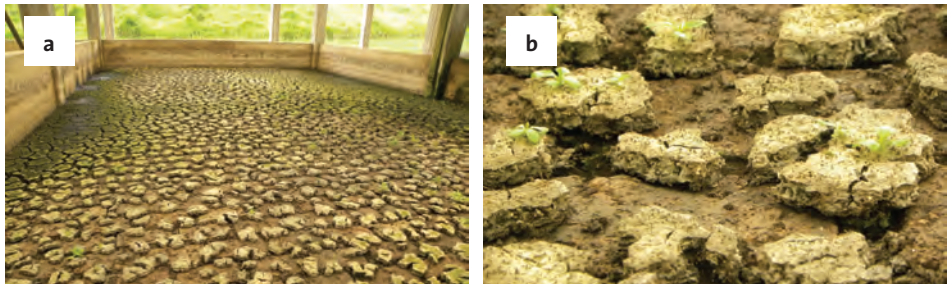


Figura 1.20. a) y b) Lechos de secado de lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales La Calera, Colombia.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el principal gas emitido por las actividades humanas y se produce por la quema de combustible para energía (petróleo, gas natural y carbón). También es un producto secundario de algunos procesos químicos, como la manufactura del cemento. Se estima que las actividades humanas contribuyen 61 mil millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera cada año, más del doble de lo que la naturaleza puede neutralizar.

### 1.5.10 EMISIONES DE OLORES Y GASES DE EFECTO INVERNADERO

Las plantas de tratamiento son sistemas para descontaminar, y por lo tanto, benéficas al medio ambiente. Sin embargo, si no son adecuadamente conceptualizadas, diseñadas, mantenidas y operadas pueden convertirse en elementos con alto impacto ambiental.

Los puntos en una planta de tratamiento relacionados con los impactos ambientales se refieren a la generación y disposición de lodos, a la descarga y/o uso de aguas tratadas no con la calidad adecuada, al ruido provocado por la operación equipo y a la emisión de gases a la atmósfera. Este último factor puede ser particularmente relevante ya que es detectado de inmediato

por la población circundante a través de la generación de malos olores (ver Figura 1.7). Las emisiones gaseosas de los sistemas de tratamiento también pueden contribuir al cambio climático mediante la liberación de gases de efecto invernadero, metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre y que dan lugar al fenómeno denominado efecto invernadero. Su concentración atmosférica en forma natural es baja y a ellos se debe que en la capa de la atmósfera en contacto con la superficie de la tierra se mantenga un intervalo de temperaturas apto para la existencia de vida en el planeta. Cuando estos gases incrementan su concentración debido a las actividades humanas, se presenta el efecto invernadero, que resulta en un incremento de la temperatura ambiente y da resultado al fenómeno actual conocido como cambio climático. Los gases de efecto invernadero incluyen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y gases fluorados.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, el  $\text{CO}_2$  es emitido a la atmósfera debido a la oxidación de materia orgánica, fracción que no se considera como contribución al cambio climático, por ser biogénico (generado de materia orgánica proveniente de la captura de  $\text{CO}_2$  por parte de las plantas y su síntesis en biomasa vegetal). La fracción de  $\text{CO}_2$  que si se cuantifica como emisión de gas de efecto invernadero es la proveniente de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica que sostiene la operación de los equipos de la planta de tratamiento (bombas, sopladores).

El metano se genera en las plantas de tratamiento de aguas residuales debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica que se lleva a cabo desde los drenajes, en los sistemas de bombeo y tratamiento preliminar y fundamentalmente en los sistemas de tratamiento anaerobio cuando se integran a un sistema de tratamiento (reactores y digestores de lodo). La captación de este gas y su manejo y disposición adecuada es imprescindible para evitar su emisión a la atmósfera. Una planta de tratamiento aerobia mal diseñada u operada también puede generar metano, al crear zonas anaerobias en el tanque de aeración o en los lodos retenidos en los sedimentadores.

*La quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica es un importante fuente indirecta de dióxido de carbono en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por ello, es importante favorecer la selección de tecnologías que minimicen el consumo de energía y en todos los casos, trabajar para tener instalaciones eficientes en el uso de la energía.*

*Otro importante gas de efecto invernadero es el metano ( $\text{CH}_4$ ). Este gas se emite en la extracción de los combustibles fósiles, la descomposición de la materia orgánica (aguas residuales, estiércoles, basura urbana) y en los procesos agrícolas como el cultivo del arroz y la ganadería. Representa el 9% de la producción de gases invernadero por actividades relacionadas con los seres humanos. Este gas posee un efecto invernadero 23 veces más potente que el  $\text{CO}_2$ .*

El óxido nitroso es el único óxido de nitrógeno ( $N_2O$ ) que actúa como gas de efecto invernadero. El óxido nitroso tiene un efecto de calentamiento global aproximadamente 300 veces superior al del dióxido de carbono. Sin embargo, el óxido nitroso se encuentra en concentraciones mucho menores que el dióxido de carbono, e inclusive que el metano, en la atmósfera, siendo en la actualidad de 319 ppb (partes por billón), un 18% superior al periodo anterior a la revolución industrial.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), constituyen uno de los impactos ambientales relevantes en el tratamiento de aguas residuales, por lo que debe de tomarse en cuenta en el proceso de toma de decisiones. Al respecto, se estima que las plantas de tratamiento aportan el 5% de las emisiones totales de metano atmosférico de acuerdo al IPCC. Se identifica la necesidad de contar con datos (factores de emisión) representativos de la región latinoamericana que permitan cuantificar en forma más precisa estas emisiones para así poder proponer opciones de mitigación efectivas.

El óxido nitroso puede generarse en los procesos de tratamiento aerobios, particularmente cuando se presentan reacciones vinculadas al ciclo del nitrógeno (nitrificación y desnitrificación). Su producción en plantas de tratamiento de aguas residuales es significativamente menor frente a las emisiones indirectas de dióxido de carbono (derivadas de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles) y del metano.

### 1.5.11 CONDICIONES AMBIENTALES

Un parámetro que afecta a los procesos biológicos en forma considerable es la temperatura, debido a que todas las velocidades de reacción enzimáticas involucradas en el metabolismo de las células de las bacterias dependen de la temperatura dentro de ciertos intervalos. A temperaturas bajas, la actividad se reduce y por lo contrario, a temperaturas altas la actividad se incrementa, manteniendo temperaturas menores a los 40°C. Para cada proceso existen intervalos de temperatura que se deben respetar para una operación eficiente, del mismo modo que existen límites máximos y mínimos permisibles. Es de señalar la excepcionalidad de los procesos anaerobios termofílicos, que tienen temperaturas óptimas entre los 50 y 55°C.

### 1.5.12 ÁREA DISPONIBLE

Existen procesos que son más compactos y que por lo tanto requieren menos área. Este aspecto cobra importancia en lugares donde el terreno es caro, escaso y/o topográficamente accidentado. Por regla general, un sistema de tratamiento con bajos requerimientos de operación y

mantenimiento (procesos extensivos) requerirá mayor área que a uno que demande mayores recursos para su operación y mantenimiento (procesos compactos).

### 1.5.13 ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE SANEAMIENTO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El fenómeno del cambio climático, resultado del calentamiento global debido a la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero, traerá en el mediano y largo plazo modificaciones significativas al régimen climático y con ello al patrón de lluvias a nivel global y regional. Tales cambios constituyen una clara amenaza a la infraestructura de abastecimiento, saneamiento y tratamiento del agua, pues este tipo de obra es altamente vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos severos, por no decir extremos.

Toda nueva obra de saneamiento debe ser proyectada incorporando medidas de adaptación a los efectos del cambio climático, ya sea que se prevea un incremento en lluvias y escorrentías, o periodos de sequías más agudas, según sea el caso. Dichas medidas se identificarán a partir de un análisis de vulnerabilidad de los distintos componentes del sistema frente a las amenazas a las que se encuentran expuestos. Además, el concepto de resiliencia, entendido como la capacidad de un sistema para recuperarse o ajustarse ante los cambios, debe considerarse en todo diseño de ingeniería. Este nuevo enfoque busca reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de la infraestructura y de la prestación del servicio, ante la imposibilidad de controlar la ocurrencia de la amenaza.

La localización de la planta de tratamiento debe entonces decidirse con información de un atlas de riesgos local que identifique las zonas propensas a inundaciones o deslizamiento de tierras. Las líneas de drenaje y cárcamos de bombeo deben estar protegidos de estos fenómenos en caso de existir riesgo de ocurrencia. Equipamiento electromecánico y otros elementos sensibles deben seleccionarse de manera de poder operar bajo el agua o bien protegerse con barreras físicas, como diques o colocarse sobre estructuras. En lo posible, la infraestructura debe alejarse de cauces de ríos, planicies propensas a inundaciones o de laderas que pueden volverse inestables por lluvias intensas.

La Tabla 1.3 presenta algunos ejemplos de respuesta de adaptación a los efectos del cambio climático que tendrían algunos sistemas flexibles comparados con los sistemas típicos o convencionales.

Tabla 1.3. Respuesta de sistemas flexibles *versus* convencionales ante condiciones cambiantes de lluvia y sequía<sup>1</sup>.

ASPECTO EN EL MANEJO DE AGUA URBANA	EJEMPLOS NO EXHAUSTIVOS DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	EJEMPLO DE LA RESPUESTA DE LOS SISTEMAS ACTUALES	POSIBLES RESPUESTAS DE UN SISTEMA FLEXIBLE A LAS CONDICIONES CAMBIANTES DEL CLIMA
Abastecimiento de agua	Reducción del suministro de agua, ya sea estacional o durante todo el año	Incremento del abastecimiento de agua a través de infraestructura adicional (presas, pozos, desaladoras, etc.)	Reducción de la demanda a través del incremento de eficiencia, control de fugas, políticas de precios
			Fuentes de abastecimiento alternativas: cosecha de agua de lluvia y reúso de agua tratada
			Incremento sustentable de la capacidad de almacenamiento; por ejemplo almacenamiento y recuperación del acuífero
Manejo de agua residual	Variación importante de concentración de contaminantes en el influente por incorporación de agua pluvial (escenario de lluvias extremas e inundaciones)	Tecnología para el tratamiento mejorada	Red de drenajes separados (pluvial, residual), control de la contaminación en la fuente y uso de técnicas de tratamiento naturales
	Aumento de la carga en el influente por uso más eficiente del agua (escenario de escasez)	Tecnología para el tratamiento mejorada	Diversificación del reúso favorecido por las condiciones de sequía
	Inundación de las plantas de tratamiento de aguas residuales situadas cerca de ríos o costas	Construcción de barreras de protección o elevamiento del equipo	Uso y ubicación apropiada de técnicas de tratamiento natural descentralizado
Manejo de agua pluvial	Aumento del caudal por aguas pluviales y desbordes del alcantarillado combinado	Mejorar y ampliar la infraestructura de aguas pluviales de la ciudad	Atenuación de la escorrentía con opciones sostenibles de sistemas de drenaje urbano (techos verdes, pavimentos porosos, cunetas, recolección de agua de lluvia y estanques de retención)

### 1.5.14 REQUERIMIENTO DE PERSONAL

En plantas pequeñas y medianas, idealmente se deben seleccionar aquellos procesos que requieran el mínimo de mano de obra para su operación y mantenimiento, sin que éstos sean del tipo altamente automatizado debido a su elevado costo y en últimas circunstancias elevado y especializado mantenimiento. La automatización debe considerarse en las grandes plantas, donde generalmente se involucran procesos compactos y altamente mecanizados.

1 ICLEI (2011). Adapting Urban Water Systems to Climate Change—A Handbook for Decision Makers at the Local Level. ICLEI European Secretariat GmbH, Alemania (con adaptaciones). [http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch\\_training/files/Resources/Loftus\\_2011\\_Adaptation\\_handbook\\_for\\_decision\\_makers\\_at\\_the\\_local\\_level.pdf](http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch_training/files/Resources/Loftus_2011_Adaptation_handbook_for_decision_makers_at_the_local_level.pdf)



Un aspecto importante a tomar en cuenta es la especialización del personal requerido para operar la planta de tratamiento, sobre todo en regiones donde sea difícil contar con técnicos calificados. Se recomienda favorecer aquellas tecnologías que no demanden una alta especialización para su arranque y operación y en el caso de requerirse, asegurar su permanencia en el empleo de este personal clave.

Al respecto, un punto a considerar es la rotación de personal operador, que debe ser limitada en lo posible. La experiencia que un trabajador puede lograr con el tiempo es muy valiosa para la planta de tratamiento en particular y debe ser conservada. El proporcionar condiciones laborales adecuadas es una medida necesaria para evitar este problema; lo mismo aplica para el personal gerencial y administrativo.

En la gran mayoría de países de la región no existen esquemas formales reconocidos para capacitar operadores de plantas de tratamiento, lo que lleva a que personal capacitado en la práctica sea frecuentemente solicitado por otras plantas de tratamiento, ofreciendo mejores ingresos, comportamiento negativo que no contribuye al fortalecimiento del subsector.

### 1.5.15 ASPECTOS SOCIALES

La selección de plantas de tratamiento de aguas residuales debe involucrar a todos los interesados (trabajadores, comunidad local, proveedores, gobierno, etc.) desde el inicio y asegurar transparencia en los procesos de manejo y toma de decisiones previos a la construcción de la planta. Para que una intervención sea exitosa, la participación de los beneficiarios en el proceso de planificación y toma de decisiones es siempre esencial. Esto aumenta el sentido de responsabilidad entre los beneficiarios para pagar las tarifas de aguas residuales una vez que el servicio esté en operación.

**Educación comunitaria.** Debido a que la mayoría de las personas no visualizan al manejo y tratamiento de las aguas residuales como un problema que requiere de medidas y soluciones inmediatas que además implica un costo, es necesario lograr un cambio de conocimientos, actitudes y comportamiento, mediante una campaña de educación comunitaria.

**Participación pública.** Un programa de participación pública involucra a la sociedad desde el inicio, dando espacio al público para discutir el problema, identificar actores clave, discutir soluciones, entender las posibilidades técnicas, y participar en el proceso de toma de decisiones de los sistemas de tratamiento propuestos.

**Equidad y solidaridad social para alcanzar la recuperación de costos.** La utilización de principios tales como el de "el usuario del agua paga" y "el que contamina paga" es requerida para alcanzar un manejo de aguas residuales estable y sustentable con sistemas de recuperación de costos eficientes.

*En todo proyecto de tratamiento de aguas residuales, debe incluirse desde etapas tempranas la participación de la comunidad, de tal forma que su opinión y necesidades sean consideradas; de no hacerlo, el proyecto puede resultar en un fracaso.*

Sin embargo, dichos principios deben ser aplicados de una manera socialmente aceptable, considerando la solidaridad y la equitativa distribución de los costos entre todos los ciudadanos y usuarios, recurriendo a subsidios solo en los casos claramente necesarios. A los usuarios se les debe hacer conocer, y lograr que se identifiquen, con conceptos como "uso eficiente del agua" y "tratamiento de aguas residuales". Todos los usuarios se beneficiarán de las mejoras al medio ambiente.

### 1.5.16 OTROS ASPECTOS RELEVANTES

La planta de tratamiento, al iniciar su operación, debe estar conformada por procesos de tratamiento que puedan operar cumpliendo con la legislación vigente al menos por un lapso de seis meses continuos sin que ameriten una labor de mantenimiento considerable. Ello implica que la planta no requiera un servicio de mantenimiento mayor durante este período tal como cambio o reparación de equipos, cambio de empaques (gravas, arenas, carbón activado, antracita, etc.) ni depender de la adición de enzimas ni químicos de ninguna especie, excepto solamente para desinfección del agua tratada.

La planta de tratamiento debe contener equipos a los cuales se les pueda proporcionar mantenimiento en el país o región y que haya un surtido de refacciones suficiente con tiempos de entrega aceptables.

La planta de tratamiento debe ser capaz de resistir, controlar y tratar fluctuaciones de al menos el 15 % del flujo de diseño, variaciones de concentración y tipo de contaminantes propios de casa habitación, unidades habitacionales y efluentes municipales.

La planta de tratamiento debe ser capaz de resistir períodos sin alimentación sobre todo en pequeñas plantas. Los procesos anaerobios y naturales soportan mejor estas condiciones que los sistemas aerobios mecanizados. Tal situación puede presentarse durante la noche, en la que las descargas de agua residual se ven limitadas.

Se recomienda que la planta favorezca trenes de tratamiento de aguas residuales integrados por sistemas biológicos de tratamiento y no con sistemas de tipo fisicoquímico, a menos que se integre dentro del tren un tratamiento avanzado. Ello se basa en que los sistemas biológicos tienden a ser más económicos y amigables con el medio ambiente que los sistemas fisicoquímicos.

La planta de tratamiento debe contemplar sistemas que minimicen el ruido y la emisión de olores pues son aspectos que provocan, en lo inmediato, molestias y reacciones adversas de los vecinos.

En este sentido, es conveniente que las plantas de tratamiento sean construidas en sitios en donde se pueda contemplar una zona de amortiguamiento en el perímetro de la planta.

La planta debe contemplar todos los elementos de seguridad adecuados para su operación y mantenimiento; son instalaciones que representan, en alguna medida, un riesgo tanto para operadores como para visitantes.

Como parte de una política de concientización ambiental a la comunidad y ser socialmente responsables, es importante que se consideren espacios dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento para exposiciones, explicaciones de su funcionamiento, para recibir visitas con estándares de seguridad, comodidad y atención adecuadas. Aunado a lo anterior, se sugiere que el diseño de la planta considere el aspecto estético de la misma; las plantas no necesariamente deben ser sucias ni feas, al contrario, con las consideraciones arquitectónicas adecuadas, pueden transformarse en lugares agradables, de buen aspecto que el hecho de visitarlas sea en una grata experiencia. 💧

*Se recomienda, como principio, favorecer aquellas tecnologías que hayan sido desarrolladas en la región, ya que responderán mejor a las necesidades locales. Con ello se disminuye la dependencia tecnológica, se favorece la cadena económica de servicios alrededor de la tecnología y se incentiva el desarrollo tecnológico local. Además, la respuesta en cuanto al apoyo técnico para el control operacional y el mantenimiento de la planta podría ser más ágil.*



## REVISIÓN DE PUNTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

En este capítulo se hacen algunas preguntas importantes cuyas respuestas definen conceptualmente si el tipo de tecnología que se considera es apta a utilizarse en el ámbito del tratamiento de aguas municipales para un caso específico. En todas las preguntas, la respuesta deseable es la afirmativa. La Figura 2.1 presenta un algoritmo que pretender guiar la toma de decisión en cuanto a la selección de tecnologías susceptibles para concurso o licitación enfocadas al tratamiento de aguas residuales municipales, ello considerando los conceptos abordados en la Fase I de esta guía.

### 2.1 TIPO AMBIENTAL

- ¿Puede operar la planta dentro de las fluctuaciones de temperatura del medio ambiente presentes en la región?
- ¿La dirección del viento dominante es favorable para la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales en cuanto al transporte de aerosoles o posibles malos olores?
- ¿Se tiene una estimación de la generación de gases de efecto invernadero por parte del proceso de tratamiento (agua y lodos)?
- ¿Se cuenta con un estudio de impacto ambiental, incluso preliminar, que valore los impactos de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales?

### 2.2 TIPO TÉCNICO

- ¿Se ha identificado, dentro de lo posible, alguna tecnología aplicable al caso y que haya sido desarrollada o adaptada en la región o en el país?
- ¿Se puede considerar que el agua residual a tratar es del tipo netamente municipal ( $\text{DBO}_5$  total por debajo de los 350 mg/l)?
- ¿Se está seguro de que no hay descargas industriales de relevancia, o de cualquier otro tipo, que alteren el carácter municipal del agua residual?

- ¿En la tecnología propuesta se favorece el tratamiento biológico sobre los tratamientos físico-químicos?
- ¿Se ha considerado dentro del tren de tratamiento del agua, al menos para efectos de comparación y evaluación, un sistema anaerobio?
- ¿No hay dependencia de productos (enzimas, bacterias o microorganismos de cualquier tipo) que deban agregarse a la planta frecuentemente y generen dependencia económica?
- ¿Se reconoce que la planta de tratamiento genera lodos y su cantidad y calidad están determinadas y se ha considerado su manejo?
- ¿La planta de tratamiento, preferentemente, integra o contempla el tratamiento de lodos por vía biológica?
- ¿En plantas pequeñas, se ha considerado dentro del tren de manejo de lodos, al menos para efectos de comparación y evaluación, los lechos de secado?
- ¿Se tiene contemplado cómo disponer adecuadamente los lodos generados?
- ¿La planta de tratamiento genera lodos susceptibles a ser usados como mejoradores de suelo o en la agricultura?
- ¿La planta de tratamiento integra o contempla el control de olores?
- ¿El control de olores hace uso de biotecnología o sistemas biológicos como biofiltros de composta?
- ¿La planta de tratamiento integra o contempla la mitigación de ruido?
- ¿Se tiene contemplado que hacer con el agua residual o agua parcialmente tratada durante el arranque de la planta o falla de la misma sin que afecte ostensiblemente al medio ambiente?
- ¿La planta de tratamiento usa equipamiento de fácil compostura y reposición?
- ¿Se considera que la tecnología usada en la planta de tratamiento favorece una fácil operación y mantenimiento de la misma?
- ¿Se considera que la planta no requiere personal altamente capacitado; es decir, puede ser operada por un profesional de nivel técnico medio con la capacitación necesaria?
- ¿El consultor que propone la tecnología puede demostrar experiencia en su diseño y operación?

### 2.3 TIPO ECONÓMICO

- ¿La tecnología utilizada en la planta de tratamiento puede contribuir de alguna forma con las actividades económicas de la región?
- ¿En cuanto a la reparación y/o mantenimiento de los equipos de la planta es posible apoyarse con prestadores de servicios de la región?

- ¿Se desglosa a detalle el costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento?
- ¿El costo de operación y mantenimiento de la planta es sostenible considerando las finanzas del municipio o del organismo responsable de su operación?

## 2.4 TIPO SOCIAL

Las preguntas siguientes pueden formularse en tiempo futuro:

- ¿Ha sido consultada la población directamente relacionada o posiblemente afectada sobre la construcción de la planta de tratamiento?
- ¿Se ha hecho consciencia en la población sobre la necesidad y ventajas de contar con una planta de tratamiento de aguas residuales?
- ¿Se ha definido el esquema de participación ciudadana durante el proceso de toma de decisiones, así como para la adjudicación, construcción y operación?
- ¿Se considera contratar personal de la comunidad?
- ¿Se cuenta con un plan de apoyo para la educación de la comunidad (visitas guiadas, museo, servicio social, entre otras acciones)?
- ¿Se cuenta con un plan de capacitación para los empleados?
- ¿Se cuenta con un plan de respuesta a emergencias y brigadas de protección civil dentro de la planta?

## 2.5 ÁRBOL DE DECISIONES PARA LA PRESELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

En la Figura 2.1 se presenta un algoritmo en forma de diagrama de bloques para apoyar en la sección preliminar de tecnologías. Se basa en la experiencia de los autores y por lo tanto no pretende ser exhaustivo, ya que se han identificado sólo los procesos más adecuados o aplicados, de acuerdo con su conocimiento y con las tecnologías más empleadas en América Latina y el Caribe.

El algoritmo da inicio al preguntar si se han respondido afirmativamente las preguntas efectuadas en los incisos del 2.1 al 2.4. Ello es importante pues filtra tecnologías que no es recomendable considerar para su aplicación en el ámbito municipal o al menos, como se comentó en su oportunidad, deben ser sujetas de un análisis técnico más profundo.

El siguiente paso es definir si hay área o no y si ésta es apta para la posible aplicación de sistemas extensivos (dependerá además de la topografía y tipo de suelo del lugar). En el caso afirmativo es conveniente considerar los sistemas lagunares y los humedales artificiales además de los sistemas compactos de tratamiento; para el caso de que la respuesta sea negativa, solamente se considerarán estos últimos.

El algoritmo tiene ya definidos trenes de tratamiento que por su integración aseguran tender a criterios de sustentabilidad (anaerobios + aerobios) y otros que son muy usuales en Latinoamérica. En un proceso de licitación y con el objeto de tener un mayor número de opciones a evaluar, es importante solicitar a las empresas de ingeniería interesadas que presenten propuestas considerando alguno de los trenes de tratamiento que aparecen en el diagrama de bloques. En tal caso, se desarrollaría un proceso de licitación con tecnología abierta.

Otra forma de aplicar el algoritmo es seleccionar el proceso de tratamiento antes de llamar a las empresas interesadas, de forma que éstas elaboren sus propuestas con tecnología fija (predefinida). Si esta es la opción conveniente, es recomendable que en el proceso previo (aplicación del algoritmo y uso de matriz de decisiones) se involucre un consultor experto e independiente. Esto se debe a que en tal caso, para el proceso de selección de la tecnología no se tendrán cuantificados algunos elementos de la matriz de decisiones, debiendo suplir esta falta con la experiencia del consultor.

El siguiente paso en el algoritmo se refiere básicamente a la evaluación de las opciones tecnológicas propuestas y sujetas a evaluación. Para ello es requisito contar con información mínima para que se alimente a la matriz de decisión y así alcanzar una decisión con sustento y transparencia.

Para cualquiera de las dos opciones de licitación seleccionadas (con tecnología abierta o fija) es de gran importancia definir los elementos de información que deben incluir las ofertas, ya que solo así se podrá desarrollar un proceso de comparación, evaluación y selección objetivo y claro. Estos atributos en un proceso de toma de decisiones son muy valiosos para alcanzar consensos entre los involucrados y permiten comunicar mejor a la sociedad el resultado del proceso, al documentarlo y hacerlo transparente. En ese sentido, los aspectos conceptuales de pre-diseño mínimos a solicitar en los términos de referencia técnicos en un proceso de licitación son:

- a) Diseño conceptual: Se deben definir, con base en un diagrama de bloques, las etapas generales de la planta de tratamiento clasificados en operaciones y procesos unitarios que correspondan al tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario, según sea el caso. Lo mismo debe aplicarse a la línea de lodos y al manejo de las emisiones gaseosas.
- b) Establecimiento de las bases de diseño: En general, se deben identificar claramente los datos que llevaron al diseño técnico de la propuesta, lo que contempla la caracterización del agua residual bruta, del agua tratada y de las condiciones ambientales imperantes en el sitio que influyen en el diseño de la planta. Al respecto, la información de base debe ser proporcionada por el usuario o dueño a todos los licitantes, dando libertad a éstos para que la complementen.
- c) Diagrama de flujo de proceso (DFP). El balance de materia es indispensable y debe ser completo y plasmado en un diagrama de flujo de proceso (DFP). En él se muestra la secuencia de todas



- las corrientes, líquidas, sólidas o gaseosas, al inicio del proceso, al final del mismo y entre cada operación y proceso unitarios que lo conforman, de tal manera que se identifiquen los cambios en el flujo de masa y concentración en esas etapas, quedando explícitas las salidas de residuos, entre ellos los lodos. Estandarizar las unidades a  $\text{m}^3/\text{d}$ ,  $\text{kg DQOt}/\text{m}^3$ ,  $\text{kg DQO}/\text{d}$ ,  $\text{kJ}/\text{d}$ , etc.
- d) Volumetría de tanques: Se debe estimar el volumen de los tanques ( $\text{m}^3$ ) de mayor tamaño (sedimentadores, tanques de aireación, reactores biológicos, tanques de equalización de flujo, digestores de lodo, etc.).
  - e) Potencia instalada y de operación: Se debe incluir el listado de los principales equipos electromecánicos y sus patrones de uso, y de ahí estimar el consumo eléctrico de la planta. Utilizar  $\text{kWh}/\text{d}$ ,  $\text{kWh}/\text{m}^3$ .
  - f) Especificación preliminar de equipos con mayor consumo de energía.
  - g) Determinar la plantilla de operación y el grado de especialización de cada uno de sus integrantes.
  - h) Estimación de costo de operación y mantenimiento. Utilizar unidades como moneda local/ $\text{m}^3$  de agua tratada, moneda local/ $\text{kg DQO}$  eliminado, moneda local/mes de operación, moneda local/(habitante)(año).
  - i) En caso de licitaciones llave en mano, el monto económico de la oferta debe considerar la puesta en marcha de la planta y capacitación de los operadores.
  - j) Definir los tipos de garantía y los periodos de prueba que deberán aplicarse.
  - k) Se debe ser explícito en caso de que la infraestructura de tratamiento por construirse requiera incorporar medidas de adaptación a los efectos de cambio climático; esto con base en información obtenida de un atlas de riesgos naturales local o municipal. ◆

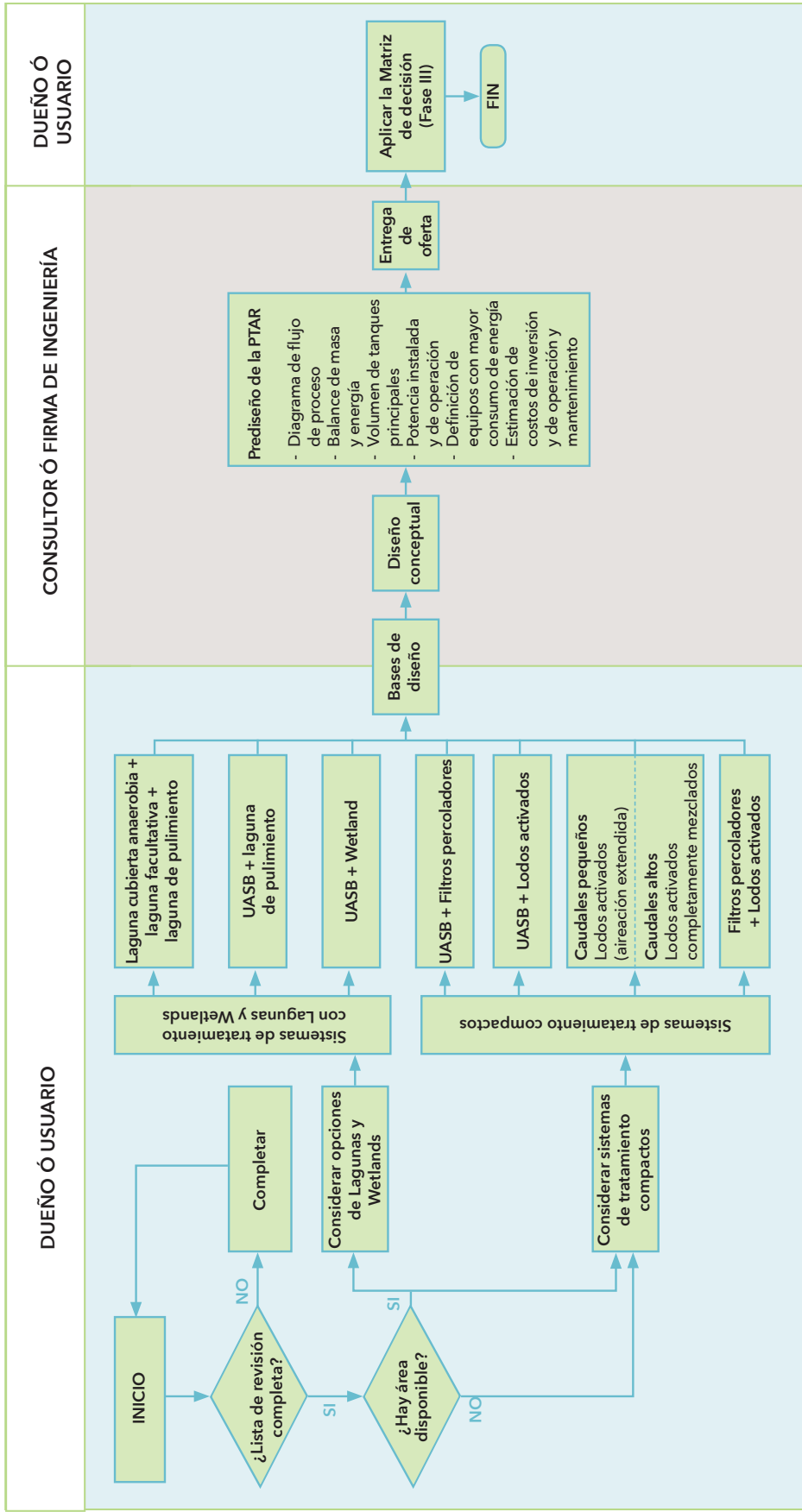


Figura 2.1. Diagrama de bloques para la preselección de tecnologías.

## EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación de las tecnologías propuestas para la construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales es, por lo general, una tarea complicada para los responsables de la organización, sea pública o privada, si se considera que normalmente no son especialistas en el tema. Estas personas tienen la responsabilidad de tomar una decisión adecuada en función de las necesidades legales, económicas, financieras y contractuales, entre otras, de la organización y de su entorno, muchas veces con base en argumentos que tienen sesgos comerciales no totalmente veraces. En este contexto, es necesario apoyar la toma de decisiones con herramientas que permitan realizar las comparaciones en una forma sencilla, objetiva, económica, todo con base en conocimientos generales sobre el proyecto y los procesos de tratamientos involucrados en las ofertas. Una metodología de ese tipo permitirá a los responsables, además de llegar a la mesa de negociación con mejores elementos para obtener un mejor y más seguro contrato, el contar con elementos claros y transparentes para comunicar y sustentar la decisión a todos los actores involucrados.

La técnica de evaluación propuesta en esta guía para ayudar a escoger el mejor proyecto desde el punto de vista técnico se basa en una matriz de decisión. Esta matriz correlaciona los distintos aspectos que pueden ser evaluados a un proceso de tratamiento de agua bajo una determinada circunstancia de aplicación mediante la asignación de calificaciones en diversos rubros según los criterios del o los evaluadores. Los rubros reciben una ponderación según su importancia, en función de cada caso de evaluación. Esta técnica permite que una evaluación de tipo cualitativa tienda a ser más objetiva para todos los involucrados, además de que asegura que mientras más capacitados y expertos sean los participantes en fijar los valores de ponderación y de las calificaciones de los procesos, más confiable será la decisión tomada a través de la matriz.

La matriz de decisión propuesta considera y pondera en la toma de la decisión los siguientes rubros: aplicabilidad del proceso, la generación de residuos, la aceptación por

parte de la comunidad, la generación de subproductos con valor económico o de uso, la vida útil, el requerimiento de área, costo de inversión inicial, costo de operación y mantenimiento, el requerimiento de reactivos, aspectos de diseño, construcción y operación así como la influencia sobre el entorno e impacto al medio ambiente.

### 3.2 DEFINICIÓN DE LOS RUBROS CONSIDERADOS EN LA MATRIZ DE DECISIÓN.

#### 1) APLICABILIDAD DEL PROCESO

Este rubro implica el grado de adecuación o pertinencia del proceso de acuerdo con las características particulares del agua residual a tratar, así como de la calidad requerida para el agua tratada. Involucra entonces los siguientes factores:

**Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable:** los procesos pueden diseñarse y aplicarse óptimamente dentro de ciertos intervalos de caudal. En otras palabras, hay procesos mejor adaptados a flujos pequeños y otros responden mejor en flujos grandes.

**Tolerancia a variaciones de flujo:** en general, los procesos trabajan eficientemente con un flujo constante; sin embargo, se debe tener en cuenta las variaciones de flujo que pueden ser toleradas por el sistema. Por ejemplo, si la variación del flujo es muy grande, en algunos casos se deberá emplear un tanque regulador; por otro lado, ciertos procesos responderán mejor a periodos sin alimentación de agua residual.

**Características del agua residual:** las características del influente se encuentran entre las consideraciones básicas para la selección del proceso y los requerimientos para su operación. Se debe considerar la disponibilidad de nutrientes en los procesos biológicos. Asimismo, se debe conocer qué compuestos presentes en el influente pueden ser inhibidores y bajo qué consideraciones afectan el proceso.

**Eficacia de remoción:** La integración de un proceso de tratamiento se define en función de la calidad deseada del efluente, la cual se establece con los requerimientos de descarga fijados en la legislación vigente o bien de especificaciones para su reúso. Con esta información y la obtenida en la caracterización del agua residual a tratar, se llega a la eficacia (o porcentaje de remoción de contaminantes) que el proceso debe cumplir. Este criterio toma en cuenta el grado en que el proceso cumple

con lo establecido en las condiciones de descarga. No se habla de eficiencia en este apartado porque la eficiencia implica también el uso adecuado de recursos, aspecto que no se atiende en este rubro.

## **2) GENERACIÓN DE RESIDUOS**

Los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos o gaseosos generados por un proceso de tratamiento deben ser conocidos o estimados. Algunos aspectos que deben considerarse en el procesamiento de los residuos son el sitio de disposición final y el costo de tratamiento y disposición de los mismos. La selección del tipo de tratamiento y disposición de los residuos debe hacerse a la par con el tratamiento del agua residual, ya que forma parte de un mismo sistema. Hay que tener en mente que la ley de la conservación de la materia es universal y que toda planta de tratamiento de aguas residuales generará residuos en mayor o menor cantidad y tipo, según sean las características particulares del caso.

## **3) ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD**

Este rubro, en algunos casos, puede ser el factor decisivo para que se realice o no la construcción de la planta de tratamiento. Una obra como ésta deberá ser aceptada por la organización a la que dará servicio (población, industria, etc.) y por los vecinos. La estrategia de comunicación del proyecto desde etapas tempranas es fundamental para tener éxito en este aspecto

## **4) GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE USO**

En algunas plantas de tratamiento de aguas es posible generar subproductos con valor económico (cierto tipo de lodos para inóculo de otras plantas de tratamiento, lodo como mejorador de suelos o fertilizante (biosólido), biogás con valor energético) los cuales pueden representar ventajas adicionales al tratamiento del agua, pues significan entradas de dinero y un aprovechamiento de recursos que contribuye a la sustentabilidad.

## **5) VIDA ÚTIL**

Este concepto responde a la interrogante sobre cuánto tiempo durará operando la planta de tratamiento de aguas. Generalmente hay dos partes en la vida útil de una planta de tratamiento de aguas: la de la infraestructura (obra civil, eléctrica, tuberías, tableros de control) y la de los equipos electromecánicos rotatorios y dispositivos electrónicos diversos, expuestos a un mayor desgaste por lo que poseen una vida útil menor. En este caso, se considera que el factor limitante es la vida útil de los equipos rotatorios.

## 6) REQUERIMIENTOS DE ÁREA

El área requerida para la construcción de una planta de tratamiento puede ser factor fundamental en la toma de decisiones. La poca disponibilidad de terreno o el alto costo del mismo pueden influir de manera decisiva en la factibilidad de ciertos procesos, tales como los sistemas lagunares o sistemas naturales construidos. En sentido inverso, un terreno barato, disponible y de buena calidad para realizar movimiento de tierra, favorecerá este tipo de procesos. En el caso de los sistemas extensivos, el tipo de terreno es importante, pues áreas con topografía irregular o bien rocosas, los desfavorece.

## 7) COSTO

El considerar todos los costos en el análisis financiero del proyecto es indudablemente la práctica adecuada para apoyar la selección del proceso, ya que se determina el costo real por metro cúbico tratado. En ello se deben involucrar no solo los montos de inversión requeridos, sino también los costos de operación y mantenimiento en el horizonte de la vida útil de la planta por construir.

### 7.1 INVERSIÓN

Este criterio es a veces difícil de ponderar en la toma de decisiones, pues generalmente se basa en consideraciones "ajenas" al proceso de tratamiento de aguas residuales que se está evaluando, como son la disponibilidad de recursos del cliente o usuario para llevar a cabo el proyecto, el costo del dinero, la posibilidad de allegarse financiamiento, e incluso la oferta de financiamiento por parte de la empresa que llevará a cabo el proyecto.

Generalmente éste ha sido el factor principal en la selección de un proceso de tratamiento de aguas residuales, ya que en ocasiones, en el medio municipal, estas decisiones se toman con criterios de corto plazo. Es común que un proceso con mayores costos de inversión sea desechado en el proceso de toma de decisiones, aunque técnicamente pudiera ser superior al elegido, o inclusive más económico en operación y mantenimiento, lo que hubiera representado una mejor opción en un horizonte de largo plazo, idealmente su vida útil.

Los costos de una región a otra pueden variar considerablemente debido al costo de la mano de obra, costos de embarque y otros relacionados con la transportación de equipo y materiales, así como a las diferencias en los precios de los materiales de construcción y equipos adquiridos localmente o de importación.

El costo de inversión total considera la suma del capital fijo más el capital de trabajo. El capital fijo es el costo requerido para la construcción de la planta de tratamiento, igual a la suma de los costos directos más los indirectos. El costo directo es igual a la suma de los costos de materiales, equipos y

mano de obra para construir la planta de tratamiento lo cual llega a representar entre un 70 a 85% del capital fijo. Los costos indirectos involucran aspectos como la ingeniería y supervisión, gastos que apoyen la construcción como la adquisición de equipos temporales, apertura de caminos temporales, construcción de casetas provisionales para el personal, etc.

El capital de trabajo es el capital necesario para arrancar la planta de tratamiento y llega a representar alrededor del 10% del capital total.

### 7.2 COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En la actualidad se debe hacer énfasis especial en este rubro, si se toma en cuenta la frecuente escasez de recursos económicos que enfrentan los organismos operadores de sistemas de agua y saneamiento en la región Latinoamericana. Con frecuencia, los recortes en presupuestos se dan en estos aspectos, particularmente en el caso de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Debe ser incluso un criterio de decisión más importante que el costo de la inversión inicial, ya que en el corto plazo un sistema de operación costosa, por arriba de la capacidad de pago del usuario, será abandonado.

Este criterio involucra el análisis de los siguientes conceptos:

**Costo de insumos (reactivos):** Este criterio evalúa la cantidad de reactivos químicos necesarios para el buen funcionamiento del sistema, o bien para incrementar su eficiencia. Se debe tener disponibilidad de los reactivos empleados por el sistema (cantidad y proveedores) para periodos de operación prolongados. En los procesos de tratamiento, el consumo de reactivos constituye un importante costo fijo.

**Costo de la energía:** Los procesos de bajo consumo energético deberán ser favorecidos en la elección. Se debe tomar en cuenta la potencia total instalada en la planta, así como la potencia requerida para su operación.

Los requerimientos de energía son criterios fundamentales en la evaluación de un proceso de tratamiento de aguas residuales, pues impactan de manera directa los costos de operación de la planta. Algunas instalaciones se abandonan debido a elevados consumos energéticos, lo cual hace incosteable su operación. Al respecto, los procesos de tratamiento anaerobio pueden ser energéticamente autosuficientes en cierto grado por el aprovechamiento del biogás producido. Es importante recordar que el consumo de energía eléctrica, cuando proviene de combustibles fósiles, está relacionada con la emisión de gases de efecto invernadero y por lo tanto contribuye indirectamente al calentamiento global.

*Gastos administrativos y de personal:* Deben tomarse en cuenta los aspectos de carácter administrativo, pues éstos se relacionan directamente con la necesidad de recursos económicos y de organización para operar las plantas de tratamiento. Por otro lado, un sistema de operación compleja requerirá un nivel de organización mayor, así como requerimientos de personal calificado.

*Costo de refacciones y material de mantenimiento:* Los procesos con numerosos equipos electromecánicos en operación y con alto grado de instrumentación generarán una mayor necesidad de mantenimiento del sistema y por lo tanto serán los más costosos en este aspecto.

## 8) DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Bajo este rubro se han agrupado los aspectos de criterios de diseño, experiencia del contratista, tecnología ampliamente probada y complejidad en la construcción y el equipamiento.

### 8.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Este concepto se refiere al dominio que la práctica ingenieril tiene sobre los modelos teóricos o empíricos para el diseño de la planta de tratamiento, e involucra la madurez de la tecnología aplicada y la claridad en sus criterios de diseño. El tamaño del sistema se basa en la cinética que gobierna el proceso. Los valores para las ecuaciones cinéticas son tomados de la práctica, la literatura y eventualmente de resultados de plantas piloto.

### 8.2 EXPERIENCIA DEL CONTRATISTA

Este criterio considera la capacidad del contratista para ejecutar el proyecto de instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en todas sus fases, desde la elaboración del proyecto de ingeniería hasta el arranque y la operación correcta de la planta de tratamiento. Involucra entonces los siguientes factores:

**Solidez en los criterios de diseño:** implica la experiencia del diseñador, así como la uniformidad y consistencia de las memorias de cálculo y el diseño de ingeniería del sistema de tratamiento con los datos de diseño reportados en la literatura. Se valora la experiencia del ingeniero de proceso y del diseñador para proponer la configuración de tratamiento idónea para un problema específico.

**Demostración de plantas en operación:** generalmente, la mejor manera de demostrar experiencia por parte del contratista es la visita a alguna planta en operación que haya sido construida o diseñada por él, así como referencias directas de clientes.



### 8.3 TECNOLOGÍA AMPLIAMENTE PROBADA

Este rubro se refiere a si existen en el país, en la región o en el ámbito mundial plantas de tratamiento que manejen el sistema que se está proponiendo. Este hecho dará mayor confianza sobre la aceptación y aplicabilidad del sistema de tratamiento.

En este sentido, la información sobre sistemas que estén operando sirve para prever el funcionamiento futuro del sistema propuesto y asegura una base mínima de experiencia de operación y solución de problemas.

### 8.4 COMPLEJIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN Y EQUIPAMIENTO.

Un tren de tratamiento complejo, con gran número de equipos y altamente instrumentado puede requerir mayor tiempo para su construcción, instalación y puesta en operación. Los materiales y equipos pueden no encontrarse en el país y se requerirá de su importación. Todos estos factores impactarán directamente y de manera negativa la inversión inicial requerida, e indirectamente incidirán posiblemente en mayores costos de mantenimiento de la planta de tratamiento en operación.

## 9) OPERACIÓN

Bajo este rubro se agrupan conceptos que están relacionados con el funcionamiento de la planta de tratamiento para garantizar la producción del agua tratada deseada, como son la flexibilidad de operación, confiabilidad del proceso, complejidad de su operación, requerimientos de personal y disponibilidad de repuestos y centros de servicio para los equipos.

### 9.1 FLEXIBILIDAD DE LA OPERACIÓN

Se debe conocer si la operación del proceso es sencilla y bajo qué condiciones opera. Un sistema versátil acepta variaciones hidráulicas y considera la posibilidad de retirar temporalmente de operación algún equipo o hasta una operación unitaria completa sin afectar significativamente el funcionamiento del sistema o la calidad y cantidad del agua tratada. Asimismo, un proceso flexible permite ser instalado en plantas ya operando, o bien permite la expansión futura de la planta con pocas modificaciones o adiciones. En este rubro se deberá considerar si el proceso es capaz de soportar variaciones en el caudal, en la carga y en el tipo de contaminantes.

### 9.2 CONFIABILIDAD DEL PROCESO

Este criterio toma en consideración la seguridad de una operación continua durante la cual el proceso puede proporcionar constantemente un efluente con la calidad requerida, sin que falle alguna

operación o proceso unitario o se deteriore cualquier equipo clave para su correcto funcionamiento; es una apreciación de su robustez.

### *9.3 COMPLEJIDAD DE OPERACIÓN DEL PROCESO*

Este aspecto es muy importante, pues frecuentemente ha sido el motivo de que una planta se abandone y deje de operar. Es necesario establecer el grado de complejidad de los procesos en su operación bajo condiciones normales y adversas. De esta forma se puede establecer el perfil y número del personal requerido para la operación de la planta. Un sistema con demasiados equipos motrices requerirá de varios operarios y personal calificado para su control, así como requerimientos de mantenimiento mayores. Por otro lado, un sistema altamente instrumentado tendrá una inversión inicial importante y requerirá de menos personal, pero capacitado en mayor grado. Con procesos complejos puede ser necesaria la instalación de un laboratorio analítico bien equipado como parte de la infraestructura de operación de la planta de tratamiento.

### *9.4 REQUERIMIENTOS DE PERSONAL*

Este aspecto está directamente relacionado tanto con el tamaño de la planta de tratamiento como con la complejidad de la operación. Los procesos sencillos en la operación son frecuentemente mejores, particularmente en plantas pequeñas y medianas, ya que en esos casos no es necesario contar con personal calificado.

### *9.5 DISPONIBILIDAD DE REPUESTOS Y CENTROS DE SERVICIO*

Este rubro tiene que ver con el mantenimiento preventivo y correctivo del equipo utilizado en la planta de tratamiento de aguas residuales. Una buena disponibilidad de repuestos y centros de servicio cercanos es deseable para agilizar el mantenimiento y abaratar su costo.

## **10) ENTORNO E IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE**

Este criterio engloba los efectos relacionados con la operación de la planta sobre el ambiente y viceversa. Incluye la influencia de la temperatura sobre el proceso, la producción de ruido, contaminación visual, producción de malos olores, generación de gases de efecto invernadero y la reproducción de insectos o animales potencialmente dañinos a la salud.

### *10.1 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA*

Una variación importante en la temperatura afecta la rapidez de degradación de algunos procesos biológicos por lo que la temperatura promedio del sitio debe ser conocida y evaluado su efecto sobre

el proceso o tecnología en consideración. Debe considerarse en particular la temperatura del agua entrante, la cual normalmente es afectada en forma estacional en función de la temperatura ambiente.

#### *10.2 PRODUCCIÓN DE RUIDO*

El equipo ruidoso en plantas de tratamiento es una limitante fuerte para su aceptación, sobre todo en zonas donde existan casas habitación aledañas a la planta de tratamiento. Este aspecto debe también ser atendido con base en los requerimientos de salud y seguridad industrial.

#### *10.3 CONTAMINACIÓN VISUAL*

Se evalúa el diseño arquitectónico de la planta y su integración con la arquitectura de la región y del paisaje del sitio.

#### *10.4 PRODUCCIÓN DE MALOS OLORES*

La dirección de los vientos dominantes puede restringir el uso de algunos procesos, especialmente los que generan olores y aerosoles. Este rubro es de considerarse con mayor atención cuando existan asentamientos humanos cercanos a la planta de tratamiento. En estos casos deberá considerarse la incorporación en las especificaciones de equipo el control de olores y aerosoles, ya que de no hacerlo, la manifestación de la población afectada puede hacer que las autoridades obliguen a suspender las actividades de la planta hasta la solución del problema. Los costos económicos y de imagen asociados a ello pueden ser considerables. Las barreras vegetales (árboles) son frecuentemente una medida adecuada que además mejora la imagen de la planta ante los vecinos.

#### *10.5 GENERACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (HUELLA DE CARBONO)*

La liberación de gases que contribuyen al calentamiento global y al fenómeno del cambio climático es un aspecto que ha tomado en fechas recientes particular importancia, como ya fue explicado en la Fase 1 de esta guía (inciso 1.5.10). Las plantas de tratamiento de aguas residuales tendrán diferente impacto ambiental en esta materia, en función del tipo de proceso biológico involucrado (fuente directa) y del nivel de consumo de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles (fuente indirecta).

#### *10.6 CONDICIONES PARA LA REPRODUCCIÓN DE INSECTOS Y ANIMALES DAÑINOS*

Se deben considerar las condiciones que presenta la tecnología para la reproducción de animales dañinos o molestos como las ratas e insectos como cucarachas, mosquitos, moscas etc.

### 3.3 OPERACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

Como es posible observar en la presentación de los rubros considerados, hay conceptos agrupados bajo un rubro y conceptos independientes. El hecho de designar un concepto como independiente o incorporarlo dentro de un rubro depende de la importancia que se le dé a cada concepto bajo el marco de un proyecto determinado. La presente estructuración de los conceptos en la matriz es una propuesta que se piensa puede abarcar un mayor número de proyectos.

La matriz consta de 5 columnas (**A, B, C, D, E**) y 28 renglones útiles.

En la columna **A** se presentan los valores de ponderación para los diversos rubros a evaluar del proyecto, que se identifican en la columna **B**. Estos son evaluados para cada propuesta técnica con una calificación que se asienta en la columna **C**.

La suma de los valores ponderados fijados en la columna **A** debe ser **100**. Los valores de la columna **A** deben ser fijados mediante acuerdo entre las personas que participarán en el llenado, considerando la importancia que tiene cada rubro dentro de las condiciones específicas de cada proyecto. Eventualmente, a alguno de ellos se le puede asignar un valor de cero, cuando el rubro correspondiente no implique diferencia entre las tecnologías evaluadas o bien sea un asunto plenamente controlado. Estos valores de ponderación deberán permanecer constantes para cada caso, independientemente de cuál sistema de tratamiento de aguas se esté evaluando.

En la columna **C** se evalúa cada rubro y subrubro de la columna **B** al otorgar un valor de cero cuando el aspecto evaluado no aplique, 1 cuando el proceso cumpla con el aspecto en forma deficiente, 3 cuando cumpla con el aspecto en forma adecuada y 5 cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena o excelentemente.

En la columna **D**, la calificación asignada a cada rubro (columna **C**) se divide entre la calificación máxima que pueden obtener (es decir 5) excepto para las casillas 7.3 D, 8.5 D, 9.6 D y 10.7 D, pues esto ya se realizó a partir de las calificaciones de los subrubros, de acuerdo con las instrucciones en la misma matriz.

En la columna **E** se multiplica el valor de cada renglón de la columna **D** por el valor ponderado de la columna **A** y finalmente se suman todos los renglones de la columna **E** para obtener la calificación global (casilla **11 E**) del proceso evaluado bajo las condiciones ponderadas en la columna **A**. El proceso que obtenga la mayor calificación será el seleccionado.

En el anexo IV se desarrolla un ejemplo hipotético que ilustra la operación de la matriz de decisión. ♦

## 3.4 MATRIZ DE DECISIÓN

	A	B	C	D	E
#	%	PROCESO EVALUADO: _____ RUBROS EVALUADOS	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 3=adecuado 5=muy bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	D*A
1		APLICABILIDAD DEL PROCESO			
2		GENERACIÓN DE RESIDUOS			
3		ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD			
4		GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REUSO			
5		VIDA ÚTIL			
6		REQUERIMIENTO DE ÁREA			
7		COSTO			
7.1		Inversión			
7.2		Operación y mantenimiento			
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 7.3 D			
8		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
8.1		Criterios de diseño			
8.2		Experiencia del contratista			
8.3		Tecnología ampliamente probada			
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento			
8.5		Sumar las casillas 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C y dividir el total entre 20. El resultado anotarlo en la casilla 8.5D			
9		OPERACIÓN			
9.1		Flexibilidad de operación			
9.2		Confiabilidad del proceso			
9.3		Complejidad de operación del proceso			
9.4		Requerimiento de personal			
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio			
9.6		Sumar las casillas 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 9.6D			
10		ENTORNO			
10.1		Influencia de la temperatura			
10.2		Producción de ruido			
10.3		Contaminación visual			
10.4		Producción de malos olores			
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono)			
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos			
10.7		Sumar las casillas 10.1C, 10.2C, 10.3C, 10.4C y 10.5C y 10.6 y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7D			
11	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11E			



## PUNTUALIZACIONES FINALES

Esta guía se ha escrito con el objetivo de coadyuvar al desarrollo y adecuada gestión de los servicios de tratamiento de aguas residuales municipales en la región Latinoamericana y Caribeña. Para ello, se consideró necesario describir las tecnologías existentes (Fase I), definir criterios para su selección acorde con criterios sustentables (Fase II) y por último, en la Fase III, presentar una técnica de evaluación objetiva con base en factores ponderados.

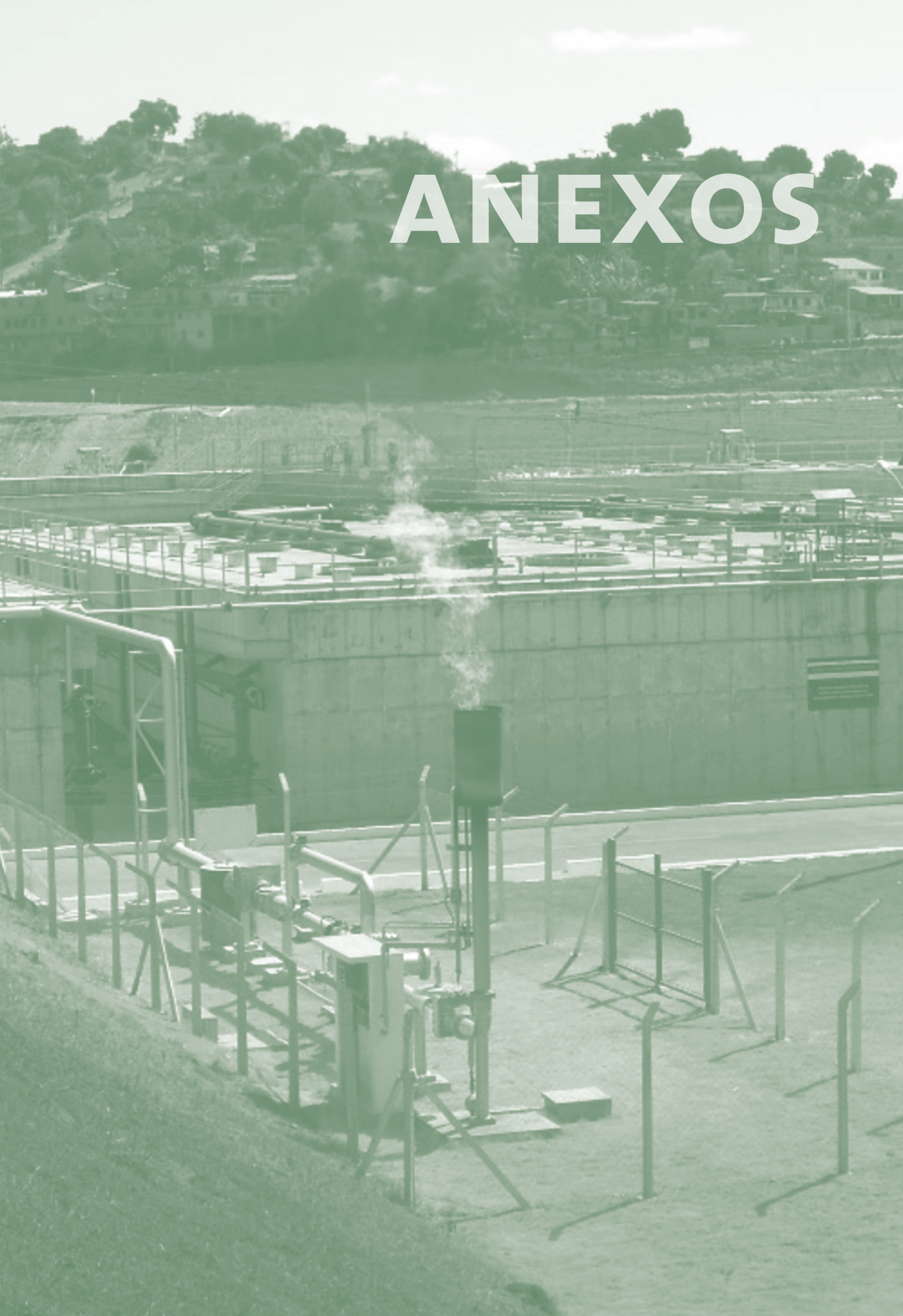
Los resultados obtenidos a partir de los criterios y el procedimiento establecidos en esta guía estarán alineados con las necesidades de un proyecto en particular. Sin embargo, la decisión final de tomarlos en cuenta o no es responsabilidad del tomador de decisiones que debe estar apoyado por un equipo humano técnico lo suficientemente versado en el tema de tratamiento de aguas residuales para poder efectuar una correcta interpretación de los resultados obtenidos. Los criterios, conceptos, recomendaciones y algoritmos desarrollados en esta guía no pueden ser tomados o utilizados mecánicamente y en forma abstracta; éstos deben ser siempre acompañados de análisis según las características y necesidades de cada proyecto.

Así mismo, este documento no pretende afectar intereses comerciales legítimos de ninguna entidad u organismo público o privado; por el contrario, busca incrementar el rigor técnico de las ofertas para que éstas realmente atiendan la problemática de cada potencial cliente y puedan así ser sujeto de una evaluación adecuada. Para los no especialistas, la guía presenta un análisis objetivo de lo existente en materia tecnológica para el tratamiento de las aguas residuales municipales, y bajo criterios eminentemente técnicos, hace una propuesta de metodología para una toma de decisiones más objetiva y transparente, con las recomendaciones que se consideran pertinentes, en un marco de sustentabilidad para el subsector en la región Latinoamericana y del Caribe. ◆





# ANEXOS





## SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (ALC)

La información contenida en este anexo es un resumen de la parte correspondiente del informe final del proyecto "Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables", financiado por el International Development Research Center (IDRC) de Canadá y desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El informe puede ser consultado en: <http://proyectos.iingen.unam.mx/LACClimateChange/>

La mayor parte de esta información ha sido publicada en Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, P., Hernández-Padilla, F. (2012) Typology of wastewater treatment technologies in Latin America, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40, 926-932.

La situación del tratamiento de las aguas residuales en Latinoamérica, entendiendo ello como el estado de la cobertura del servicio, características del agua a tratar, uso de tecnologías, normatividad ambiental y condiciones asociadas con el flujo de recursos, puede considerarse como homogénea a excepción de Chile que ha logrado tener un avance muy importante en la materia. En esta sección se presentan los resultados más importantes con respecto al diagnóstico de las tecnologías utilizadas en la región, con la intención de que puedan ser tomados en consideración, ya sea para comparar con información específica o en su defecto, para servir de referencia en caso de falta de información.

*El proyecto "Reducción de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Tratamiento de Aguas Residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables" desarrollado en el ii-unam y financiado por la IDRC de Canadá del 2010 al 2013 tuvo como fin contribuir a la gestión sustentable del agua y a la reducción de los gases de efecto invernadero de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales en América Latina y el Caribe. Para ello se trabajó en el establecimiento de lineamientos técnicos para la definición del procesamiento de aguas residuales con base en un análisis del ciclo de vida, la cuantificación de gases de efecto invernadero, el análisis económico y la evaluación de impactos sociales de los sistemas de tratamiento.*

## CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL BRUTA

En la Tabla I.1 se muestra el promedio de algunos parámetros usuales para caracterizar las aguas residuales de tipo municipal, tomando como base 158 plantas de tratamiento de la región. Los valores expuestos en dicha tabla pueden ser considerados como valores representativos de la región latinoamericana

Tabla I.1. Parámetros promedio del agua residual municipal en América Latina y el Caribe<sup>1</sup>.

PARÁMETRO	VALOR PROMEDIO PROPUESTO PARA ALC	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR DE REFERENCIA*
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	244	17	220
DQO (mg/l)	557	40.3	500
SST (mg/l)	264	31.1	220
Nitrógeno total (mg/l)	42	1.4	40
Fósforo total (mg/l)	7	0.7	8
Coliformes totales (NMP/100ml)	1.2x10 <sup>7</sup>	1.4x10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>7</sup>

## NORMATIVIDAD EN MATERIA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

Las regulaciones en materia de calidad del agua tratada en la región latinoamericana se pueden clasificar en tres tipos: la normatividad que establece los límites máximos permisibles que deben cumplir las descargas de aguas residuales a los cuerpos de agua receptores, la normatividad que regula un porcentaje mínimo de remoción de ciertos contaminantes y la normatividad enfocada a preservar la calidad que debe mantener el cuerpo receptor independiente de la descarga o descargas existentes. Las regulaciones latinoamericanas no son estándar y es posible encontrar una amplia variación de criterios para ello; se ajustan según las condiciones económicas, políticas y sociales de cada país así como de su capacidad de gestión para el control y monitoreo de las descargas.

1 Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, P., Hernández-Padilla, F. (2012) Typology of wastewater treatment technologies in Latin America, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40, 926-932

## TECNOLOGÍAS MÁS USADAS EN AMÉRICA LATINA

La muestra de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) analizadas en los 6 países seleccionados (Brasil, Chile, Colombia, Guatemala, México y República Dominicana) se conformó en total por 2,734 instalaciones distribuidas por país de la siguiente manera: Brasil con una muestra de 702 PTAR, Chile con un total de 177 PTAR, Colombia con un total de 139 PTAR, Guatemala con un total de 32 PTAR, México con un total de 1,653 PTAR, y República Dominicana con una muestra de 31 PTAR. En 199 plantas se identificaron procesos dobles (tratamiento y postratamiento), por lo que fueron contabilizadas dos veces, dependiendo de las tecnologías involucradas.

La Figura I.1 presenta una distribución por número de tecnologías encontradas en la muestra del estudio. Las tres tecnologías más usadas en ALC que representan el 80 %, son los procesos de lodos activados, las lagunas de estabilización y el reactor anaerobio de lecho de lodos (UASB). Es de resaltar el uso del reactor UASB que en los últimos 20 años se ha consolidado como una opción cada vez más aplicada en el tratamiento de aguas residuales municipales.

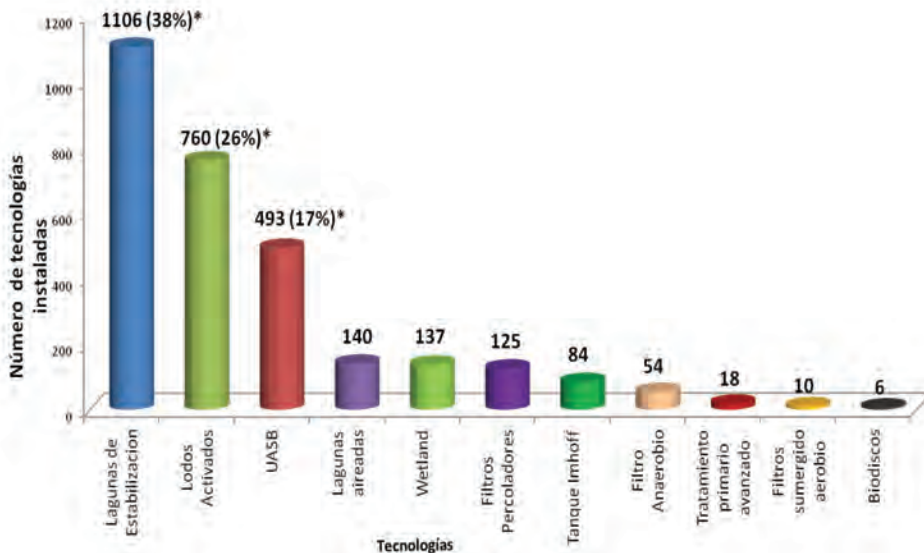


Figura I.1. Número de plantas de tratamiento en función del tipo de tecnología en la muestra de PTAR en ALC <sup>1</sup>.

1 Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, P., Hernández-Padilla, F. (2012) Typology of wastewater treatment technologies in Latin America, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40, 926-932

En la Figura 1.2 se presentan la distribución por tamaño de las plantas de tratamiento en los países del estudio, en pequeñas, medianas y grandes. Es de resaltar que la mayor proporción de las plantas corresponde a las pequeñas (menores a 25 l/s), siendo ello una tendencia general en Latinoamérica y que se considera permanecerá debido a la falta de infraestructura de tratamiento en pequeñas ciudades. En particular, Guatemala (87%) México (76%) y Brasil (62%) cuentan con una mayor proporción de pequeñas plantas, y de éstas, las muy pequeñas (menores a 5 l/s) predominan en México, con un 61% de las menores a 25 l/s.

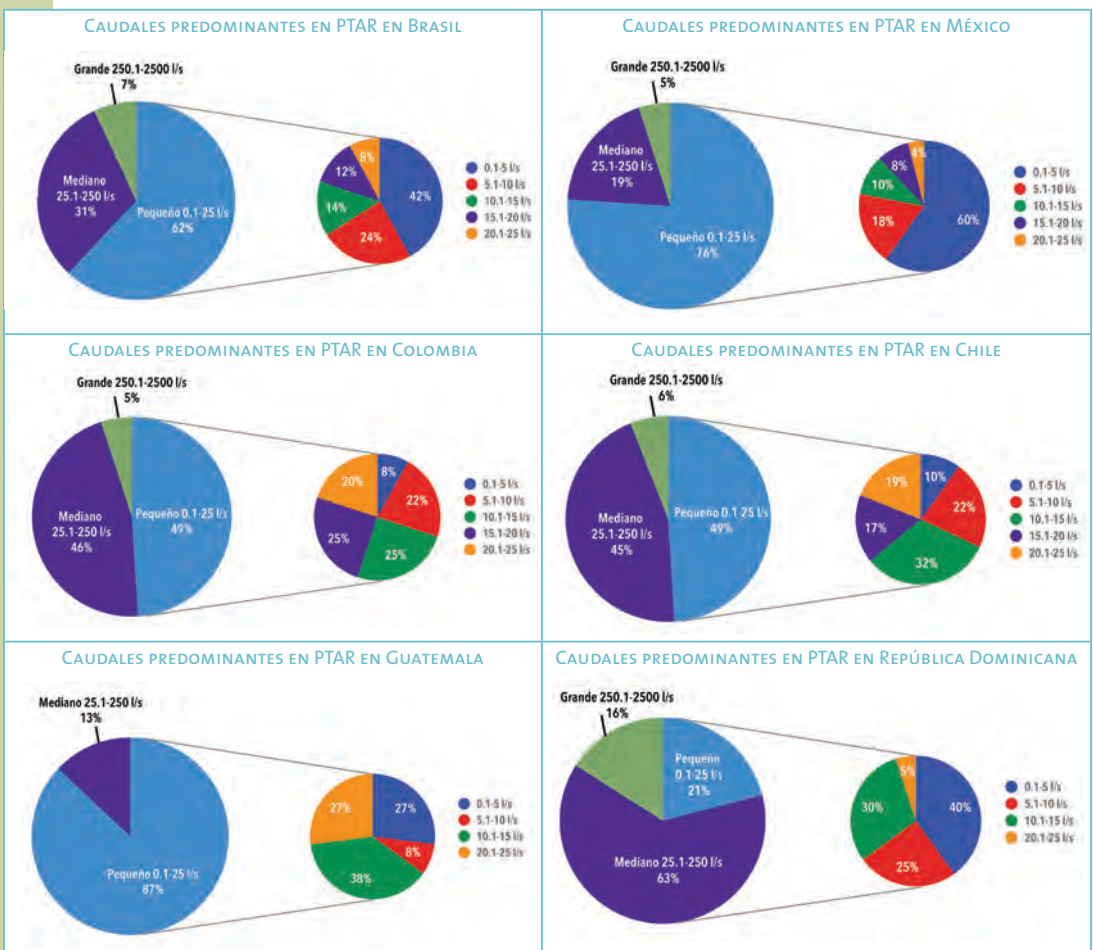


Figura 1.2. Distribución de planta de tratamiento (PTAR) en grandes, medianas y pequeñas en los países estudiados y a su vez en caudales menores a 25 l/s

En la Figura I.3 se presenta el caudal tratado acumulado por tecnología de tratamiento. Es notorio que los lodos activados dominan en la región, al tratar en conjunto el 58% del agua que ingresa a una planta de tratamiento, seguidos con un porcentaje muy menor (15%) por las lagunas de estabilización, mientras que el tratamiento primario avanzado (con adición de químicos) alcanza un 9%, por arriba del UASB (7%). Como puede observarse, el primario avanzado cuenta con pocas instalaciones pero son de gran tamaño; en algunos casos, esta infraestructura está reconvirtiéndose en sistemas convencionales de lodos activados, mediante la adición del proceso biológico.

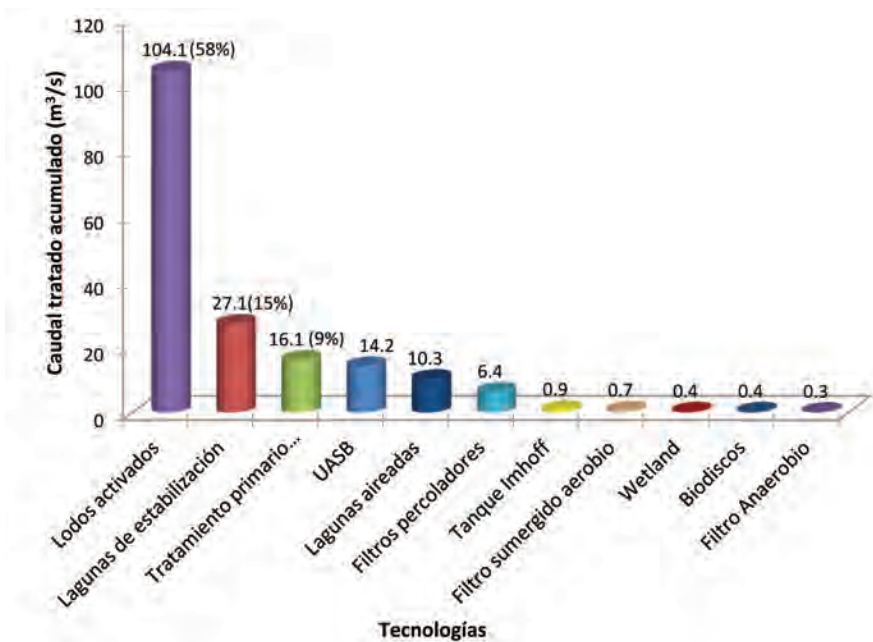


Figura I.3. Caudal acumulado que ingresa a plantas de tratamiento en función de la tecnología utilizada en ALC<sup>1</sup>.

Con respecto a los caudales más representativos de tratamiento de agua residual en ALC, con base en un análisis estadístico se identificaron los siguientes valores: 13 l/s para el intervalo de 0.1 a 25 l/s; 70 l/s para el intervalo de 25.1 a 250 l/s; y 620 l/s para el intervalo de 250.1 a 2500 l/s. Con base en estos caudales y las tecnologías más utilizadas se integraron 9 trenes de tratamiento considerados representativos para la región de América Latina y el Caribe en los tres intervalos de caudales. Los diagramas de bloques de estos procesos se presentan en la Figura I.4.

<sup>1</sup> Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, P., Hernández-Padilla, F. (2012) Typology of wastewater treatment technologies in Latin America, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40, 926-932

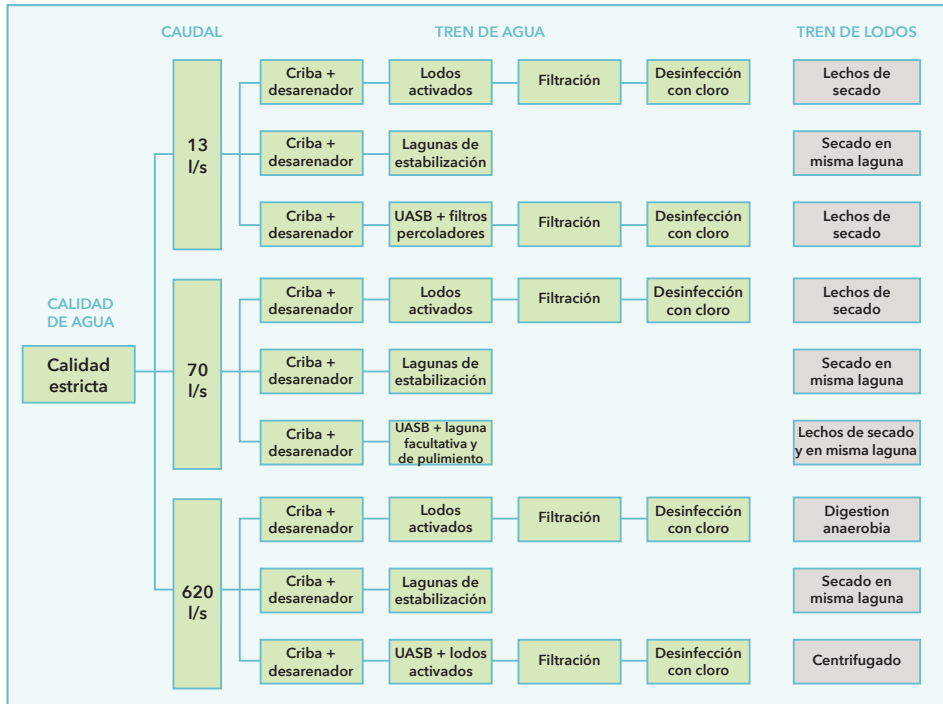


Figura I.4. Configuración de trenes de tratamiento representativos de la región de ALC.

En el anexo III se presentan las fichas de información resumidas correspondientes a los 9 escenarios de trenes de tratamiento de aguas residuales más representativos en Latinoamérica (Figura I.4). Así mismo, se incluyen los resultados de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en caso de aplicar posibles modificaciones técnicas para transformarlos en sistemas que tienden más a la sustentabilidad, utilizando la metodología del análisis de ciclo de vida.

### MANEJO DE LODOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA

En general, la disposición de lodos en América Latina se realiza en forma inadecuada debido a que, con frecuencia en plantas pequeñas, se disponen en el mar, en el drenaje, directamente en suelo o en vertederos no controlados, con un alto contenido de agua. Las grandes plantas de tratamiento tratan adecuadamente el lodo y lo envían a un relleno o monorrelleno muchas veces en sitios cercanos a la planta. En muy pocos casos de la muestra de plantas de tratamiento materia del proyecto, el lodo se enviaba a suelo agrícola después de haber evaluado el contenido de metales pesados. 💧



## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MÁS REPRESENTATIVAS EN AMÉRICA LATINA

La información contenida en este anexo es un resumen de la parte correspondiente del informe final del proyecto "Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables", financiado por el International Development Research Center (IDRC) de Canadá y desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El informe puede ser consultado en: <http://proyectos.iingen.unam.mx/LACClimateChange/>

### SUSTENTABILIDAD Y ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen por objeto prevenir la contaminación del ambiente y preservar la salud humana, además de suministrar un recurso susceptible de ser aprovechado en diversos usos. Como todo proceso de transformación, deben también ser seguros para sus trabajadores y evitar impactos negativos en su entorno. De esta forma, un sistema de tratamiento de aguas residuales sustentable debe ser ambientalmente eficiente, económicamente factible y socialmente aceptado.

**Ambientalmente eficiente.** El sistema de tratamiento de agua residual, además de cumplir con la calidad de agua tratada, debe reducir tanto como sea posible los impactos ambientales propios de la operación, tales como emisiones a la atmósfera, descargas al agua y generación de residuos.

**Económicamente factible:** El sistema de tratamiento de agua debe también operar a un costo aceptable a la comunidad beneficiada, el cual incluye a particulares, negocios y gobierno. Este costo debe ser compatible con el servicio que proporciona la planta de

tratamiento, ya sea para mejorar el ambiente, preservar la salud pública y la calidad del cuerpo receptor, así como proveer un recurso susceptible de reutilización.

**Socialmente aceptado:** El sistema de tratamiento de agua residual debe operar de una manera que sea aceptable para la mayoría de la comunidad beneficiada y la que se encuentra en su entorno. Es probable que esto requiera un amplio diálogo con los diferentes grupos para informar, educar, desarrollar confianza y ganar apoyo. En la medida que esto se logre y que la sociedad perciba beneficios derivados de la operación del sistema, se alcanzará la apropiación del mismo por parte de la comunidad, aspecto que fortalecerá su sustentabilidad.

Es evidente que es difícil compatibilizar las tres variables en el caso del tratamiento de aguas residuales (costos, aceptación social y el impacto al medio ambiente). Sin embargo, el equilibrio que se debe lograr es el reducir las cargas ambientales generadas por el tratamiento de aguas residuales tanto como sea posible, dentro de un nivel de costo acorde con la capacidad de pago de los responsables del tratamiento y de los beneficiarios y al mismo tiempo que sea aceptada por la mayoría de la población.

Aunque las plantas de tratamiento de aguas residuales son concebidas como un servicio ambientalmente favorable que contribuye a la sostenibilidad, la realidad es que éstos sistemas, cómo cualquier otro, generan impactos ambientales, los cuales deben de ser identificados y cuantificados para que a partir de ésta información se puedan tomar decisiones ambientalmente responsables o bien, generar estrategias de mejora del desempeño ambiental en los trenes de tratamiento.

Una herramienta metodológica que puede ser útil en la evaluación ambiental integral de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV es una metodología que evalúa los impactos ambientales de productos o servicios desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final de sus productos y residuos, tomando en cuenta todos los vectores involucrados (aire, agua, suelo) y todos los potenciales impactos ambientales que se puedan generar. Es una herramienta normada bajo la serie de normas ISO 14040 e ISO 14044 que tiene cuatro etapas:

1. Definición de objetivo y alcance
2. Inventario de Ciclo de Vida
3. Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida
4. Interpretación.

En la primera etapa se establecen los sistemas a analizar, sus límites y la unidad funcional (base de comparación entre los sistemas). El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) consiste en la compilación

de todas las entradas y todas las salidas de los sistemas a evaluar. Con ese inventario se procede a la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV), que consiste en identificar y asociar las emisiones ambientales generadas por todos los compuestos, energía y materiales, cuantificados en el ICV, con impactos específicos, para así valorarlos sobre bases más firmes. Dicha evaluación se realiza con el apoyo de paquetes de cómputo comerciales (Simapro versión 7.3, en el caso de este trabajo), que contienen bases de datos que apoyan en el cálculo de los impactos ambientales en varias categorías, las cuales debe ser seleccionadas por el experto, de acuerdo con un análisis de pertinencia. La interpretación es la etapa final, en donde se hacen los comparativos con base en las categorías de impacto seleccionadas, con lo cual se podrán tomar decisiones informadas.

### ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

El análisis estadístico de los datos recolectados en ALC, determinó las configuraciones representativas de las PTAR para esta región: lagunas de estabilización; lodos activados por aireación extendida; proceso convencional de lodos activados; UASB + lodos activados; UASB + filtros percoladores y UASB + lagunas de estabilización. Para cada una de las configuraciones se identificaron los caudales representativos de la región: chico (13 l/s), mediano (70 l/s) y grande (620 l/s). Los diagramas de bloques se presentan en el anexo I, Figura I.4.

A partir de lo anterior, se determinaron 9 escenarios de tratamiento representativos de la región de ALC, determinados por el caudal tratado, por el tipo de tecnología en el tratamiento secundario y por el manejo acoplado de los lodos resultantes.

**Escenario: 1 - AE.** Aireación extendida acoplado con lechos de secado, flujo chico.

**Escenario: 2 - LE.** Lagunas de estabilización con secado de lodos en la misma laguna, flujo chico.

**Escenario: 3 - UASB + F.** UASB + filtros percoladores acoplado con lechos de secado, flujo chico.

**Escenario: 4 - AE.** Aireación extendida acoplado con lechos de secado, flujo mediano.

**Escenario: 5 - LE.** Lagunas de estabilización con secado de lodos en la misma laguna, flujo mediano.

**Escenario: 6 - UASB + LF.** UASB + lagunas facultativa y de pulimento con secado de lodos en la misma laguna, flujo mediano.

**Escenario: 7 - LA.** Proceso convencional de lodos activados acoplado con espesado por gravedad, digestión anaerobia y centrifugado, flujo grande.

**Escenario: 8 - LE.** Lagunas de estabilización con secado de lodos en la misma laguna, flujo grande.

**Escenario: 9 - UASB + LA.** UASB + lodos activados acoplado con centrifuga, flujo grande.

Para calcular el ICV, a cada uno de los 9 escenarios de tratamiento se les aplicó un análisis de ingeniería conceptual con elementos de ingeniería básica lo cual implicó: analizar la configuración de los trenes de tratamiento (preliminar, primario, secundario y terciario), balances de masa y energía considerando agua, sólidos y aire. Con estos resultados se generó el inventario de ciclo de vida (ICV) complementándolo con información de referencias bibliográficas y bases de datos.

A partir del ICV obtenido se realizó la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, que incluyó nueve categorías: agotamiento de recursos abióticos, acidificación, eutrofización, deterioro de la capa de ozono, toxicidad (del ecosistema, humana y terrestre), formación de oxidantes fotoquímicos y cambio climático.

En este anexo se presentan, a manera de ejemplo, los impactos por metro m<sup>3</sup> de agua tratada, para las categorías más relevantes en sistemas de tratamiento de aguas residual: eutrofización, cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos.

### *EUTROFIZACIÓN*

Este fenómeno se produce por el enriquecimiento de nutrientes en cuerpos de agua, lo cual provoca un aumento en la producción de biomasa (algas, maleza acuática), desencadenando un cambio indeseable en la composición de especies y potencial afectación a la biodiversidad y al aprovechamiento del recurso agua.

La eutrofización se genera a partir de niveles altos de macronutrientes, de los cuales los más importantes son el nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, en este impacto también participan óxidos de nitrógeno, amoníaco y materia orgánica. En el método de EICV utilizado (CML 2000), todos estos compuestos se refieren como fosfato equivalente (PO<sub>4</sub> e), por lo que se usa como indicador del impacto generado.

Una de las funciones de los sistemas de tratamiento de aguas es justamente remover materia orgánica y nutrientes, lo que redundará en la disminución de eutrofización. Por ello, el evaluar este impacto es relevante para este tipo de sistemas.

En la Figura II.1 se observan los impactos generados por cada uno de los 9 escenarios de tratamiento analizados (de E1 a E9).

Los escenarios de lodos activados (E1, E4 y E7) generan mayores impactos en esta categoría, tanto por disposición de agua tratada, como por disposición de lodos.

Las barras rojas indican los impactos por la disposición de agua tratada, los cuales se presentan por la cantidad de compuestos que no fueron removidos del agua durante el tratamiento. En esta evaluación es importante tomar en cuenta que los impactos se cuantifican considerando que el agua

tratada es descargada a un río. Los lodos activados presentan concentraciones de DQO en el efluente (E1 y E4, aeración extendida) de  $62\text{g/m}^3$  y de  $47\text{g/m}^3$  para E7 (lodo activado convencional de mezcla completa). Estos valores son mayores que los que alcanzan las lagunas (E2, E5 y E8) con  $30\text{g/m}^3$ , y los procesos con reactores UASB seguidos de un postratamiento, que presentan  $49$ ,  $10$  y  $37\text{g/m}^3$  para los escenarios E3, E6 y E9, respectivamente.

Los mayores impactos por disposición de lodos en la tecnología de lodos activados (E1, E4 y E7), se deben a que estos escenarios generan mayor cantidad de lodos y en su disposición liberan nutrientes y materia orgánica (barras verdes).

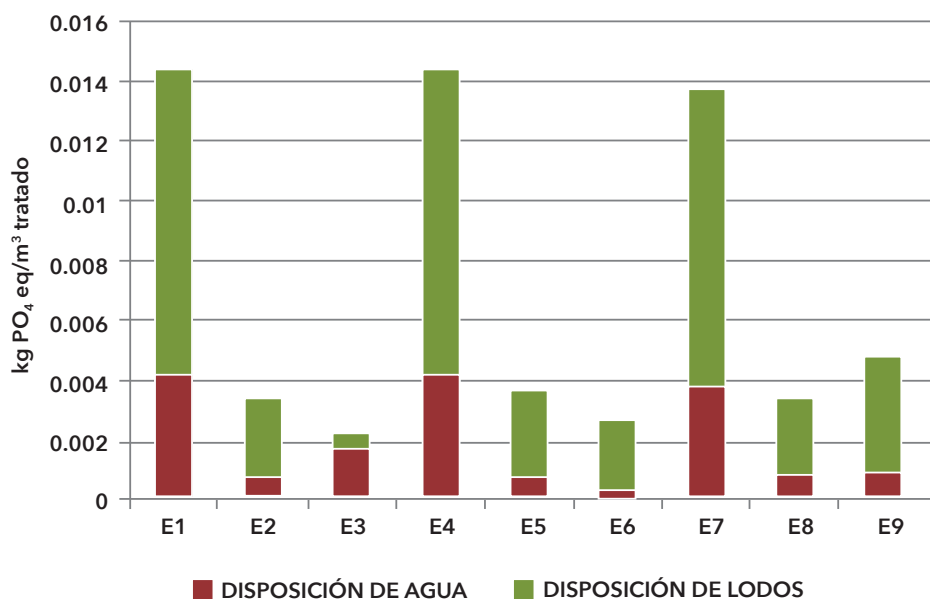


Figura II.1. Impacto por eutrofización (EU) para cada uno de los escenarios estudiados.

### CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se define como el impacto de las emisiones antropogénicas sobre las fuerzas radiativas (por ejemplo, la absorción de la radiación del calor) de la atmósfera. Esto puede generar efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y el estado de los materiales. La emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), tales como bióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, retienen radiación que debería disiparse fuera de la atmósfera terrestre, lo que causa un incremento de la temperatura en la superficial de la Tierra.

El Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés) de cada GEI es usado para convertir cada gas a dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) y así poder trabajar sobre una misma base. De esta forma, los equivalentes individuales de cada GEI pueden ser sumados para obtener un indicador común de gases invernadero.

La Figura II.2 presenta los resultados del ACV en la categoría de impacto cambio climático (generación de gases de efecto invernadero). Los escenarios E2, E5 y E8, correspondientes a lagunas de estabilización, son los que presentan mayores impactos debido a las emisiones de metano que se generan en las lagunas anaerobias (barras rojas). Así mismo, los escenarios que muestran también impactos importantes, son los que involucran la tecnología de lodos activados en su versión aireación extendida (E1 y E4), debido a la emisión de bióxido de carbono producido en el sitio de generación de la electricidad utilizada en el proceso de tratamiento para alimentar los aireadores del tanque de aireación, principalmente.

Es interesante notar que el escenario 7, correspondiente a lodos activados, tiene una mayor distribución de impactos por tipo de proceso, siendo visible la participación del tratamiento de lodos por digestión anaerobia debido al metano generado (barra azul claro).

En los escenarios anteriores se puede distinguir que la disposición de lodos también participa de forma importante en este impacto debido a las emisiones de  $\text{CO}_2$  producidas durante su transporte al sitio de disposición final y a la generación de metano una vez colocados en el relleno sanitario. En este sentido, los escenarios UASB que cuentan con retorno de lodos del postratamiento al tanque anaerobio (E3 y E9), donde son digeridos, tienen mucha menor generación de lodos para disponer y por lo tanto su contribución se concentra en el metano que se pierde en el mismo reactor anaerobio y por fugas e ineficiencia de quemado. Es importante señalar que en los cálculos que dan lugar a la figura II.2 se considera que el metano que sale disuelto en el efluente anaerobio es capturado y transformado a  $\text{CO}_2$  mediante su oxidación por los microorganismos aerobios presentes en el postratamiento en cada uno de los tres escenarios E3, E6 y E9.

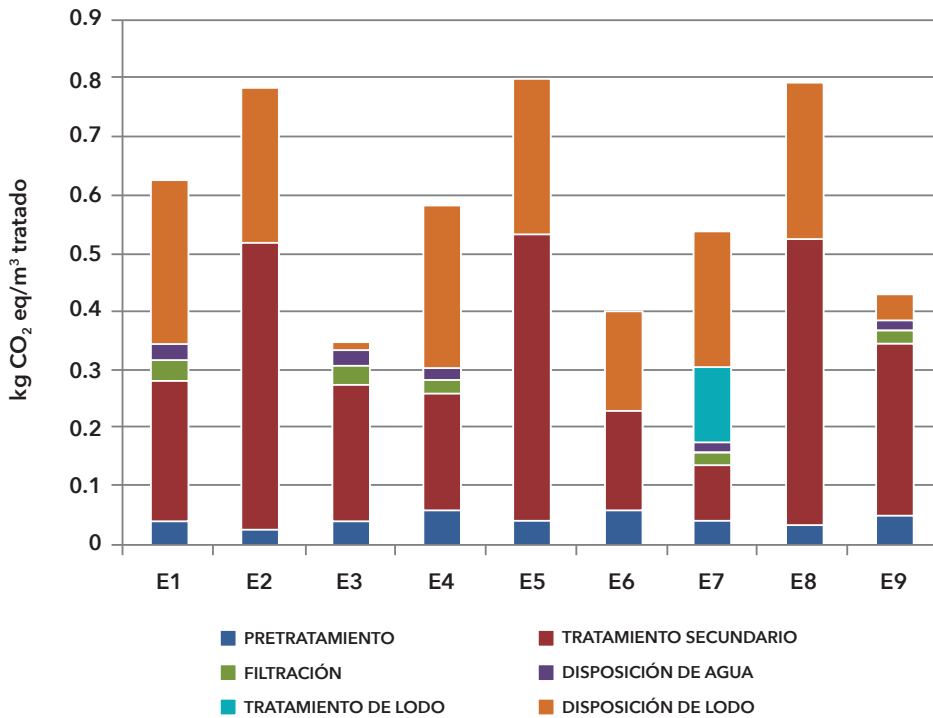


Figura II.2. Impacto por cambio climático (GWP) para cada uno de los escenarios estudiados.

### FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

La formación de foto-oxidantes, como el ozono, se refiere a la generación de determinados compuestos por la acción de la luz del sol a partir de ciertos contaminantes primarios. Estos compuestos pueden afectar a la salud humana, al ecosistema, a los materiales y a las plantas.

Los foto-oxidantes se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz y a través de reacciones de oxidación de precursores como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

El indicador de formación de foto-oxidantes se presenta en kg de etileno equivalente, el cual se obtiene al multiplicar los diferentes precursores por su respectivo potencial de fotooxidación, basado en la reactividad de cada compuesto.

En la Figura II.3 se puede observar que el proceso de pretratamiento tiene un comportamiento similar en todos los escenarios, debido a que la disposición de los residuos del cribado en relleno sanitario, genera emisiones de dicloro etano, el cual es un potente contribuyente al impacto en esta categoría.

Los escenarios con lagunas de estabilización (E2, E5 y E8), presentan los impactos más significativos debido al metano liberado.

Todas las tecnologías que involucran uso de electricidad tienen un impacto debido a las emisiones de dióxido de azufre producido en la generación de electricidad por el uso de combustibles fósiles, mientras que el impacto por el tratamiento de lodos, específicamente el digestor anaerobio, es asociado al metano escapado.

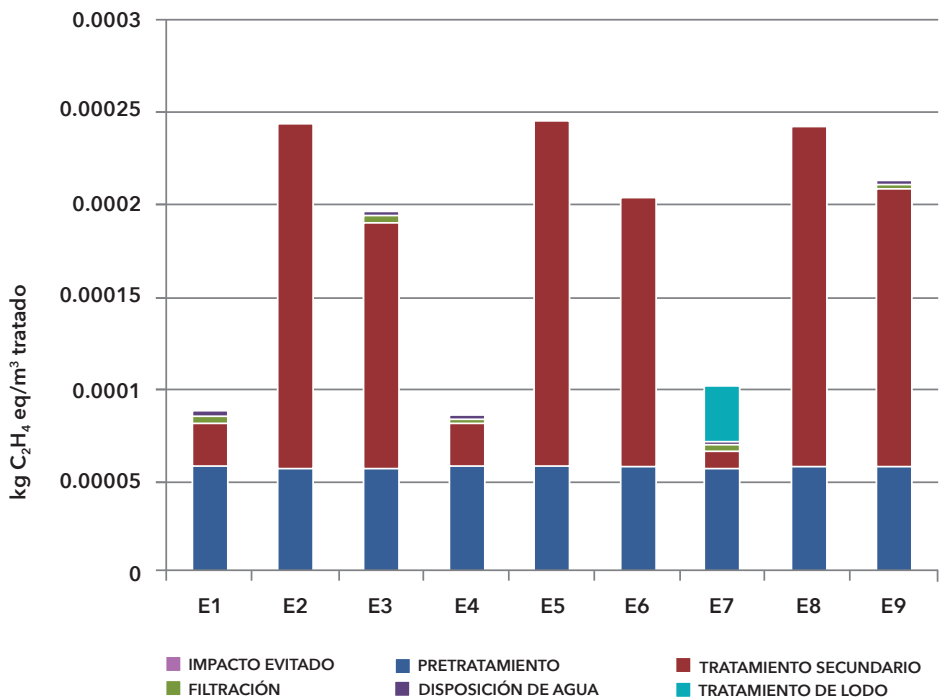


Figura II.3. Impacto por formación de oxidantes fotoquímicos (POF) para cada uno de los escenarios estudiados

## IMPLICACIONES PRÁCTICAS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

A partir del análisis de ciclo de vida realizado a los sistemas de tratamiento representativos de América Latina y el Caribe se pueden resaltar los siguientes aspectos:

Los sistemas de tratamiento de aguas con consumo eléctrico elevado como es el caso de los lodos activados, tienen una fuerte contribución al cambio climático debido a la emisión de bióxido de carbono producido en la generación eléctrica que se utiliza principalmente para la aireación. Este



impacto está determinado por la combinación de fuentes de energía usadas para generar la electricidad. En este caso se adoptó un valor promedio para América Latina y el Caribe que considera 56% de hidroeléctrica; pero si se adoptara la matriz energética de Brasil, que utiliza 65% de hidroelectricidad, o de Colombia, que usa 64%, los impactos ambientales en cambio climático por el uso de tecnologías de tratamiento mecanizadas, serían menores a lo reportado en este estudio

Los sistemas de lagunas de estabilización, y en particular su primer componente de tipo anaerobio, tienen los mayores impactos en las categorías de cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos por las emisiones de metano generadas. En contrapartida, los reactores anaerobios tipo UASB acoplados con un postratamiento presentan los menores impactos en estas dos categorías, debido a que la mayor parte del metano es captado y quemado, y a que presentan emisiones indirectas limitadas al tener bajos consumos de electricidad. Entre las tecnologías consideradas en este anexo, fueron los reactores UASB asociados con un postratamiento, los que menor huella de carbono presentaron.

Por su parte, los sistemas de tratamiento con lodos activados impactan en mayor medida en la categoría de eutrofización ya que producen mayor cantidad de lodos, lo cual implica un mayor impacto por los nutrientes liberados en el sitio de disposición. 💧





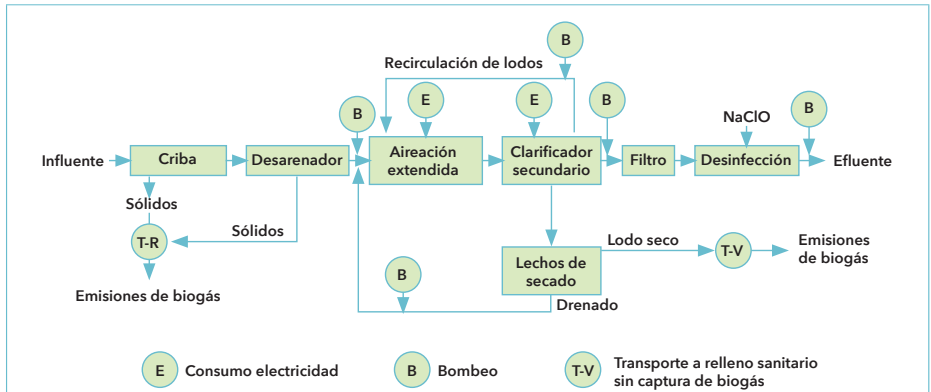
## FICHAS TÉCNICAS DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS 9 ESCENARIOS (TRENES DE TRATAMIENTO)

La información contenida en este anexo es un resumen de la parte correspondiente del informe final del proyecto "Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables", financiado por el International Development Research Center (IDRC) de Canadá y desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El informe puede ser consultado en: <http://proyectos.iingen.unam.mx/LACClimateChange/>

Entre los aspectos más relevantes se puede comentar lo siguiente:

- a) Los escenarios con uso de electricidad tienen mayores impactos en las categorías de acidificación, disminución de recurso abióticos, toxicidad humana y disminución de ozono estratosférico.
- b) Los escenarios con lagunas de estabilización tienen mayores impactos en las categorías de cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos. Para la mitigación de estos impactos se propone cubrir la primera laguna (anaerobia) y quemar el biogás captado.
- c) Así mismo, los escenarios con UASB presentan el menor impacto en la categoría de cambio climático, aunque mayores impactos en toxicidad humana debido a la concentración de metales en los lodos que serían dispuestos en un vertedero no controlado y a su vez en el suelo. Esto en el entendido que el biogás es colectado y quemado en antorcha. Estos escenarios toman en cuenta que entre un 25 y un 30% del total de metano producido en el reactor sale en forma disuelta en el efluente, lo que contribuye a la emisión de GEI del sistema.
- d) En cuanto a la categoría de eutrofización, los escenarios con mayor generación de lodos (los que involucran tecnología de lodos activados) son los que presentan mayores impactos debido a la disposición de nutrientes en un relleno sanitario sin captura de biogás y sin tratamiento de lixiviados. 💧

**E1- AIREACIÓN EXTENDIDA ACOPLADA CON LECHOS DE SECADO**

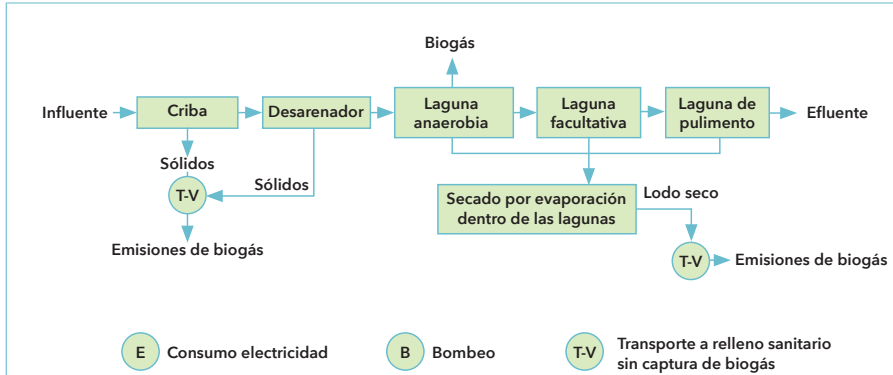


**DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO**

Este escenario, con un caudal de 13l/s, es un sistema de lodos activados de aireación extendida. Al ser un proceso mecanizado, requiere de un consumo de energía eléctrica importante. Los lodos generados, ya digeridos, son secados por evaporación en lechos de secado y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA		
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)	
ACIDIFICACIÓN	0.000691	kg SO <sub>2</sub> e	MEJORA PROPUESTA: NINGUNA	EMISIONES LÍNEA BASE	348
CAMBIO CLIMÁTICO	0.623732	kg CO <sub>2</sub> e		EMISIONES PROYECTO MEJORADO	No aplica
TOXICIDAD TERRESTRE	0.030108	kg 1,4-DB e		EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	0
EUTROFIZACIÓN	0.015152	kg PO <sub>4</sub> e		Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000090	kg 1,4-DB e			
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	4.6 E-08	kg CFC-11 e			
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.002580	kg Sb e			
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.					
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
		kWH/AÑO	0	326,310	0

## E2- LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN



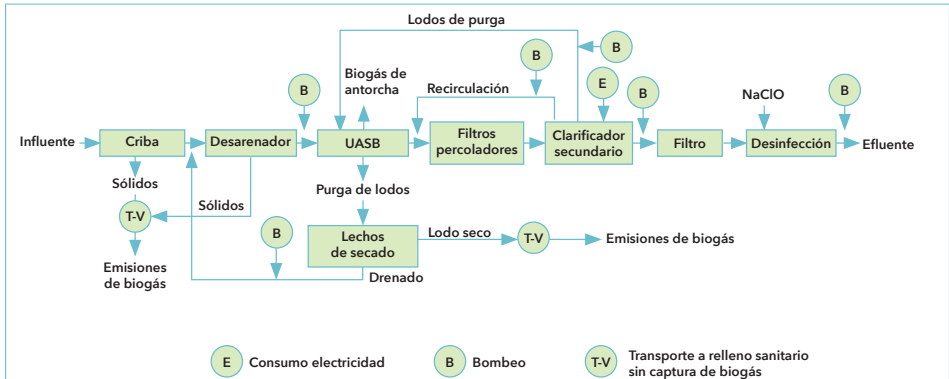
### DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO

Este escenario, con un caudal de 13 l/s, es un sistema lagunar (lagunas anaerobia, facultativa y de maduración o pulimento). No cuenta con ningún tipo de sistema de recuperación de gas, por lo que el gas es emitido directamente a la atmósfera. En este sistema, los lodos sedimentados en las lagunas son secados por evaporación dentro de la misma después de periodos variables en función del tipo de laguna (años), para después ser retirados y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000124	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	441
CAMBIO CLIMÁTICO	0.673423	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	304
TOXICIDAD TERRESTRE	0.067533	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	138
EUTROFIZACIÓN	0.003460	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000171	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	1.99 E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.000180	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	KWH/AÑO	19,691	0	19,691

MEJORA PROPUESTA: SE PROPONE CUBRIR LAS LAGUNAS ANAEROBIAS PARA CAPTURAR EL BIOGÁS Y QUEMARLO PARA PRODUCIR ENERGÍA.

### E 3- UASB + FILTROS PERCOLADORES



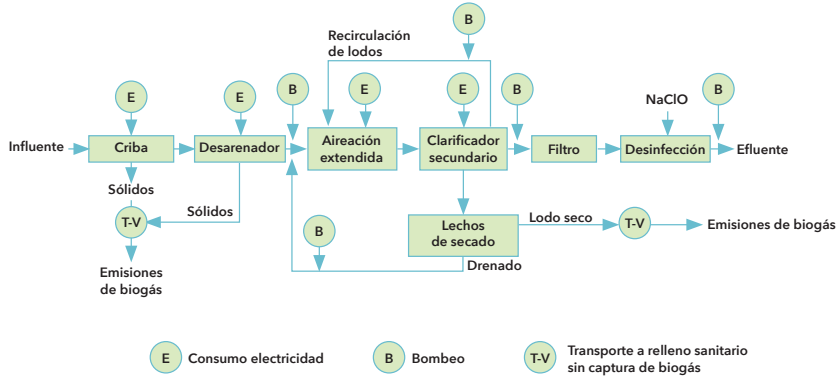
#### DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO

Este escenario, con un caudal de 13 l/s, es una combinación entre UASB con recuperación y quema de metano y un sistema de filtros percoladores. Los lodos generados por el filtro percolador son digeridos en el reactor UASB y retirados y secados por evaporación en los lechos de secado y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000421	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	250
CAMBIO CLIMÁTICO	0.971638	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	208
TOXICIDAD TERRESTRE	0.072117	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	42
EUTROFIZACIÓN	0.002467	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000303	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	3.38 E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.001457	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	KWH/AÑO	66,163	177,755	0

MEJORA PROPUESTA: ESTE ESCENARIO YA CUENTA CON CAPTURA Y QUEMA DE BIOGÁS POR LO QUE LA PROPUESTA ES GENERAR ELECTRICIDAD CON EL BIOGÁS UTILIZANDO UNA UNIDAD DE COGENERACIÓN.

**E4- AIREACIÓN EXTENDIDA ACOPLADA CON LECHOS DE SECADO**



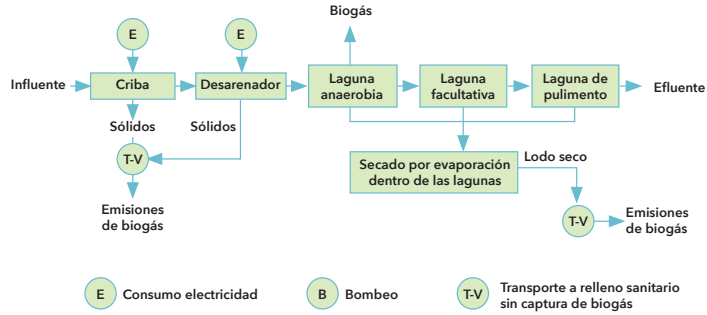
**DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO**

Este escenario, con un caudal de 70 l/s, es un sistema de lodos activados de aireación extendida. Al ser un proceso mecanizado, requiere de un consumo de energía eléctrica importante. Los lodos generados son secados por evaporación en lechos de secado y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000615	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	1,731
CAMBIO CLIMÁTICO	0.58057264	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	No aplica
TOXICIDAD TERRESTRE	0.030158	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	0
EUTROFIZACIÓN	0.015057	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.0000855	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	4.28E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.002260607	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	kWH/AÑO	0	1,519,495	0

MEJOR PROPUESTA: NINGUNA

**E5- LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**



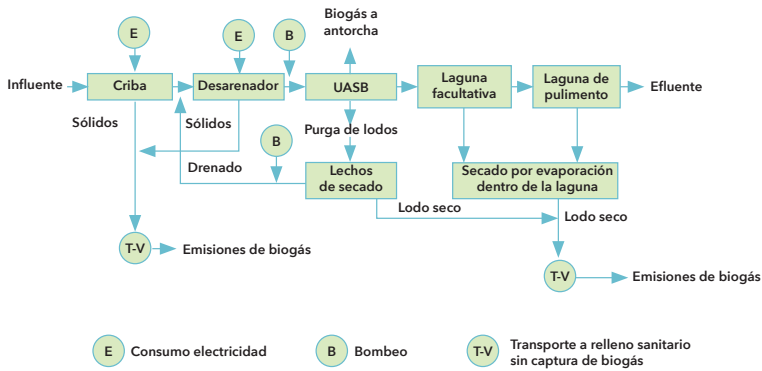
**DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO**

Este escenario, con un caudal de 70 l/s, es un sistema lagunar (lagunas anaerobia, facultativa y de maduración o pulimento). No cuenta con ningún tipo de sistema de recuperación de gas, por lo que el gas es emitido directamente a la atmósfera. En este sistema, los lodos sedimentados en las lagunas son secados por evaporación dentro de la misma después de periodos variables en función del tipo de laguna (años), para después ser retirados y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA									
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	MEJOR PROPUESTA: NINGUNA									
ACIDIFICACIÓN	0.000152	kg SO <sub>2</sub> e										
CAMBIO CLIMÁTICO	0.688708	kg CO <sub>2</sub> e										
TOXICIDAD TERRESTRE	0.067592	kg 1,4-DB e										
EUTROFIZACIÓN	0.003494	kg PO <sub>4</sub> e										
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000173	kg 1,4-DB e										
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	2.12E-08	kg CFC-11 e										
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.000296	kg Sb e										
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ESCENARIO</th> <th>EMISIONES (tCO<sub>2</sub>e)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EMISIONES LÍNEA BASE</td> <td>2,429</td> </tr> <tr> <td>EMISIONES PROYECTO MEJORADO</td> <td>1,688</td> </tr> <tr> <td>EMISIONES REDUCIDAS TOTALES</td> <td>741</td> </tr> </tbody> </table> <p>Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.</p>		ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)	EMISIONES LÍNEA BASE	2,429	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	1,688	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	741
ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)											
EMISIONES LÍNEA BASE	2,429											
EMISIONES PROYECTO MEJORADO	1,688											
EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	741											
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE							
		kWH/AÑO	106,029	84,315	21,714							



## E6- UASB + LAGUNA FACULTATIVA Y DE PULIMENTO



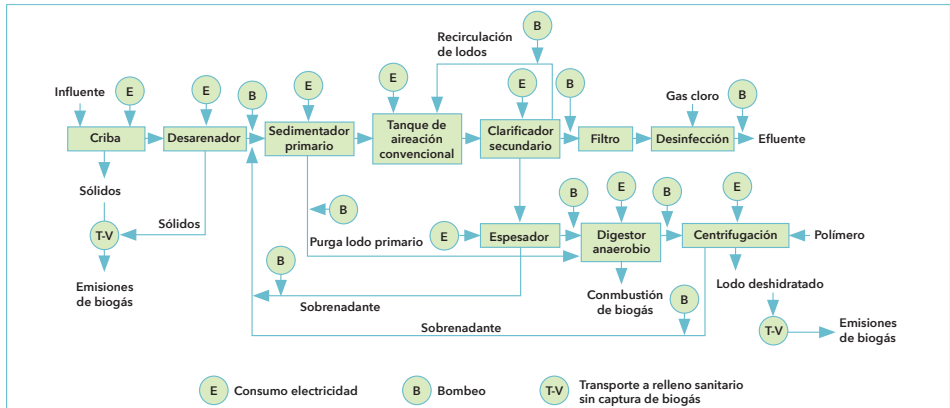
### DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO

Este escenario, con un caudal de 70l/s, es una combinación de un UASB con recuperación y quema de metano, y un sistema lagunar (lagunas facultativa y maduración). El diseño de las lagunas contempla el secado de lodos dentro de las propias lagunas por evaporación después de periodos variables en función del tipo de laguna (años) mientras que los lodos del UASB son llevados a lechos de secado. Ambos lodos son dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000177	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	1,410
CAMBIO CLIMÁTICO	0.992682	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	1,185
TOXICIDAD TERRESTRE	0.071585	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	225
EUTROFIZACIÓN	0.002796	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000309	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	2.26E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.000437	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	kWH/AÑO	356,260	201,115	155,145

MEJORA PROPUESTA: ESTE ESCENARIO YA CUENTA CON CAPTURA Y QUEMA DE BIOGÁS POR LO QUE LA PROPUESTA ES GENERAR ELECTRICIDAD CON EL BIOGÁS UTILIZANDO UNA UNIDAD DE COGENERACIÓN.

### E7- PROCESO CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS ACOPLADO CON ESPESADOR POR GRAVEDAD, DIGESTIÓN ANAEROBIA Y CENTRIFUGADO

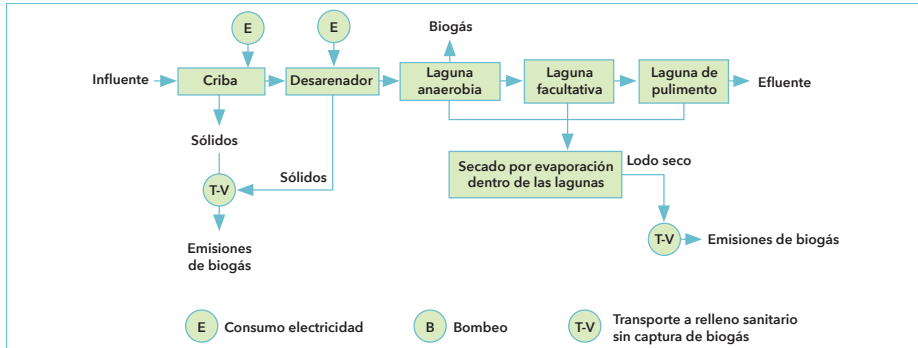


#### DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO

Este escenario, con un caudal de 620 l/s, cuenta con un sistema de lodos activados convencional. Para el tratamiento de lodos se utiliza un digestor anaerobio con recuperación de biogás, generación de calor para el biodigestor y quema del metano restante. Los lodos son secados por medio de una centrifuga y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1 M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA		
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)	
ACIDIFICACIÓN	0.000426	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	20,698	
CAMBIO CLIMÁTICO	0.523994	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	15,902	
TOXICIDAD TERRESTRE	0.029740	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	4,796	
EUTROFIZACIÓN	0.014190	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.		
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000108	kg 1,4-DB e			
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	3.4 E-08	kg CFC-11 e			
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.001460	kg Sb e			
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.					
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
		kWH/AÑO	3,942,961	8,652,325	0

## E 8- LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN



### DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO

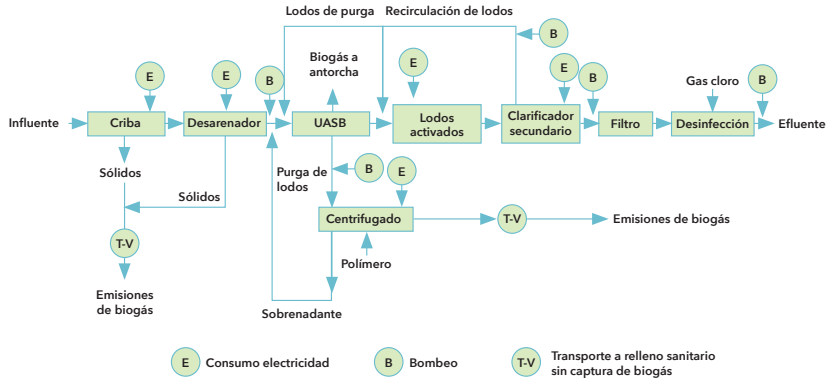
Este escenario, con un caudal de 620 l/s, es un sistema lagunar (lagunas anaerobia, facultativa y de maduración o pulimento). No cuenta con ningún tipo de sistema de recuperación de gas, por lo que el gas es emitido directamente a la atmósfera. En este sistema, los lodos sedimentados en las lagunas son secados por evaporación dentro de la misma después de periodos variables en función del tipo de laguna (años), para después ser retirados y dispuestos en relleno sanitario sin captura de biogás.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000138	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	21,287
CAMBIO CLIMÁTICO	0.681448	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	14,728
TOXICIDAD TERRESTRE	0.067564	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	6,559
EUTROFIZACIÓN	0.003478	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000172	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	2.06 E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.000241	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				

MEJORA PROPUESTA: SE PROPONE CUBRIR LAS LAGUNAS ANAEROBIAS PARA CAPTURAR BIOGÁS Y QUEMARLO PARA PRODUCIR ENERGÍA.

CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	kWH/AÑO	939,117	391,280	547,837

**E9- UASB + LODOS ACTIVADOS ACOPLADO CON CENTRÍFUGA**



**DESCRIPCIÓN DE ESCENARIO**

Este escenario, con un caudal de 620 l/s, es una combinación de un UASB con recuperación y quema de metano, y un sistema de lodos activados. Los lodos aerobios del sedimentador secundario son dirigidos al reactor UASB para su digestión y espesamiento. El lodo retirado del reactor UASB es secado por medio de una centrifuga y dispuesto en vertedero.

IMPACTOS AMBIENTALES DEL CICLO DE VIDA DE 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA			CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR 1M <sup>3</sup> DE AGUA TRATADA	
CATEGORÍA	IMPACTO	UNIDADES	ESCENARIO	EMISIONES (tCO <sub>2</sub> e)
ACIDIFICACIÓN	0.000331	kg SO <sub>2</sub> e	EMISIONES LÍNEA BASE	14,046
CAMBIO CLIMÁTICO	1.090215	kg CO <sub>2</sub> e	EMISIONES PROYECTO MEJORADO	11,544
TOXICIDAD TERRESTRE	0.088719	kg 1,4-DB e	EMISIONES REDUCIDAS TOTALES	2,503
EUTROFIZACIÓN	0.004988	kg PO <sub>4</sub> e	Las emisiones fueron calculadas mediante IPCC (2006), para un año de funcionamiento de la planta de tratamiento. Las emisiones del proyecto representan el cálculo de GEI considerando mejoras en el tren de tratamiento.	
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0.000342	kg 1,4-DB e		
DISMINUCIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO	3.2 E-08	kg CFC-11 e		
DISMINUCIÓN DE RECURSOS ABIÓTICOS	0.001080	kg Sb e		
Impactos calculados mediante el método CML 2000, con enfoque de análisis de ciclo de vida.				
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN	CONSUMO	SOBRANTE
	kWh/año	3,972,481	6,002,425	0

MEJORA PROPUESTA: ESTE ESCENARIO YA CUENTA CON CAPTURA Y QUEMA DE BIOGÁS POR LO QUE LA PROPUESTA ES GENERAR ELECTRICIDAD CON EL BIOGÁS UTILIZANDO UNA UNIDAD DE COGENERACIÓN.

**ANEXO**

**IV**

## **EJEMPLO DE LA OPERACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN**

Se desarrolla un ejemplo hipotético para ilustrar la operación de la matriz de decisión.

En la Tabla 1 se muestra la ponderación definida según el peso que se consideró adecuado para cada factor evaluado. El factor se determina de acuerdo con las condiciones en las que el proyecto de planta de tratamiento está siendo desarrollado. Una vez definida, la ponderación es independiente de las tecnologías a evaluar para un caso particular.

En este caso con fines de ejemplo, se considera un escenario de una pequeña ciudad, con 40,000 habitantes, lo que representa un caudal de 70 l/s.

Tabla IV.1. Ejemplos de valores de ponderación (la totalidad debe sumar 100)

FACTOR EVALUADO	COMENTARIOS DEL EVALUADOR	PONDERACIÓN DEL EVALUADOR
Aplicabilidad del proceso	Por las características del proyecto (70 l/s) se desea que el proceso seleccionado pueda operar en el intervalo de flujo dado, que sea tolerante a variaciones de flujo y que pueda tratar con eficacia el agua residual influente. Dentro de los procesos contemplados hay diferencias en este rubro, sin embargo, se asigna una ponderación de 5 puesto que las diferencias no son cruciales para el proyecto.	5
Generación de residuos	Uno de los aspectos más importantes a considerar en la selección de un sistema de tratamiento es la generación de residuos. En el municipio no se cuenta con un relleno sanitario en condiciones aceptables y el traslado de lodos a otro resultaría muy costoso. Por ello las autoridades municipales han decidido favorecer aquel proceso que genere la menor cantidad de residuos y el que genere una mejor calidad de lodo para su disposición como mejorador de suelos. En este último caso, los campesinos recogerían el lodo en la planta de tratamiento.	10
Aceptación por parte de la comunidad	En la comunidad se efectuó una intensa campaña de concientización sobre la necesidad de las obras de drenaje y de la planta de tratamiento. La población, al cabo de la campaña estuvo de acuerdo en apoyar su construcción. Por ello, este rubro posee una ponderación de cero, ya que la población no muestra preferencia por algún tipo de tecnología (el rubro no aplica en este caso).	0
Generación de subproductos con valor económico o de uso	Uno de los aspectos que más interesó a la población y que fue esencial para lograr su apoyo fue el hecho de que se les comunicó que la planta de tratamiento, además de generar agua apta para riego, podría generar lodos (biosólidos) mejoradores de suelos, lo cual resultaría en ahorro de recursos para la compra de fertilizantes químicos. Puesto que así se manejó la información, el cumplir con ello es de suma importancia para el presidente municipal por lo cual se le asignó una ponderación relativamente alta.	10
Vida útil	Se desea que la planta de tratamiento posea una vida útil lo más larga posible pues será difícil contar con recursos para renovar la planta de tratamiento en mediano plazo.	5
Requerimiento de área	Este rubro fue limitado por la disponibilidad de un terreno seguro, de acuerdo con el atlas municipal de riesgos naturales, por lo que únicamente podrán considerarse plantas de tratamiento compactas y no sistemas extensivos como las lagunas de estabilización, a pesar de ser una buena alternativa de tratamiento de aguas residuales municipales. Con esta restricción, este rubro carece ya de importancia, pues no hace diferencia.	0

Costo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión inicial. Aunque se cuenta con dinero para construir la planta de tratamiento que sea necesaria para resolver la problemática de la población, es importante considerar aquella tecnología que sea eficaz y eficiente en el tratamiento del agua, es decir que haga lo que tenga que hacer al menor costo posible para obtener un ahorro de recursos que podrían ser destinados a otras acciones. Debido a que hay disponibilidad de dinero, este rubro no es limitante para el proyecto por lo que se le asigna una ponderación baja.</li> <li>• Operación y mantenimiento. Este es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para seleccionar adecuadamente una tecnología. El municipio y la población desean un sistema con bajos costos de operación y mantenimiento, ya que esto incidirá en la tarifa que deberán cubrir por el servicio.</li> <li>• Requerimiento de reactivos. Esto puede representar una erogación fuerte al considerar que algunos reactivos son importados, generalmente son caros y que hay que trasladarlos al municipio recorriendo una distancia importante. Los reactivos más usados pueden ser el gas cloro, hipoclorito de sodio, dióxido de cloro y polímeros para poder manejar los lodos. Por tal motivo, se ha considerado dar una relativa importancia a este rubro y se favorecerán aquellos procesos cuyo requerimiento de reactivos sea el mínimo.</li> <li>• Requerimiento energético. Este aspecto se considera de gran importancia porque incide directamente en el costo fijo de operación del sistema. Cualquier ahorro en este sentido viabilizará la operación de la planta y liberará recursos para otros servicios municipales importantes. Se cuenta con información de plantas de tratamiento cercanas al municipio que se han abandonado por no poder cubrir el costo de energía que demanda su operación.</li> <li>• Gastos administrativos y de personal. Se favorecerá el sistema que tenga menores requerimientos de personal especializado, dado el contexto del mercado profesional del municipio.</li> <li>• Requerimiento de refacciones y material de mantenimiento. En el mismo sentido, el sistema con menores necesidades en estos insumos deberá ser favorecido.</li> </ul> <p>La situación económica y social de su localidad y la experiencia recabada en plantas de la región, llevan a asignar un peso específico particularmente alto a este aspecto, debido a su importancia en las finanzas municipales.</p>	35
Diseño y construcción	Se desea que la empresa que realice el trabajo sea seria y profesional con el cliente. Por otro lado, que existan criterios de diseño adecuados a las condiciones del municipio, que la tecnología se haya probado en otros lugares y que la construcción y equipamiento no sean complejos.	10
Operación	Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable, además de que una persona con poca capacitación pueda hacer la función de operador. Se deben encontrar centros de repuestos y servicios cerca de la población por cualquier descompostura del equipo que pudiera ocurrir. Debido a que todos estos factores condicionan la buena operación de la planta, se ponderó este rubro con un alto valor.	20
Entorno e impacto ambiental	La población fue concientizada de la necesidad de una planta de tratamiento, con lo cual estuvo de acuerdo. Sin embargo, la población, al no conocer detalles de lo que aprobaban, solicitó al presidente municipal que se cuidaran los aspectos de generación de ruido, malos olores y animales dañinos, así como minimizar los eventuales impactos ambientales negativos. Además, se le solicitó que se hiciera un esfuerzo adicional para que la planta fuera atractiva a la vista y se integrara al entorno del sitio.	5

## CALIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO

En este caso hipotético, se han recibido dos propuestas por parte de las empresas interesadas en la licitación. Una propone un sistema anaerobio seguido de un filtro percolador (UASB + FP) y otra empresa ofrece un sistema de lodos activados por aeración extendida (LAAE).

Tabla IV. 2. Calificación de los procesos de tratamiento

FACTOR EVALUADO	COMENTARIOS DEL EVALUADOR	CALIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
		UASB + Filtro percolador	Lodos activados
Aplicabilidad del proceso	Ambos procesos de tratamiento han sido aplicados en el ámbito mundial, el lodo activado extensamente. En el caso del reactor UASB, lo ha sido principalmente en el tercer mundo, Latinoamérica y el Sudeste Asiático. Ambos procesos son aplicados con éxito en el tratamiento de aguas residuales municipales en general y en particular en el flujo definido por el proyecto supuesto. Sin embargo, en términos generales, el reactor UASB es más sensible a variaciones en el caudal que el proceso de lodos activados. En este sentido, el filtro percolador como postratamiento, al ser un proceso de biomasa fija, permite soportar las variaciones de caudal. Ambos procesos cumplen con las condiciones de descarga. Sin embargo, con el proceso de lodos activados correctamente operado se obtiene una mayor calidad por lo cual se le asigna al UASB+FP una calificación menor.	3	5
Generación de residuos	La generación de residuos para la planta de lodos activados es casi del doble a la generada por el reactor UASB+FP	5	3
Aceptación por parte de la comunidad	Ambos procesos de tratamiento son bien aceptados por parte de la comunidad, debido a la campaña de comunicación adoptada.	5	5
Generación de subproductos con valor económico o de uso	Los lodos de ambos procesos de tratamiento podrían ser utilizados como mejoradores de suelos siempre y cuando cumplan con la normatividad vigente a este respecto. Ambos lodos se encuentran parcialmente digeridos y hay que estabilizarlos antes de su disposición. Se considera que el lodo anaerobio posee mejor calidad en cuanto a la concentración de nutrientes (N y P) mientras que el lodo aerobio será producido en mayor cantidad. En este rubro, se les asigna la misma calificación.	5	5
Vida útil	El sistema de lodos activados en la versión de aireación extendida tiene una vida útil menor que el reactor UASB+FP debido básicamente al equipamiento de aireación del sistema de lodos activados.	5	3
Requerimiento de área	Según las ofertas, el sistema de lodos activados requiere 2.4 veces más área que el reactor UASB+FP.	5	3



Costo de inversión inicial	Conforme a las propuestas, la diferencia de costo de inversión entre el reactor UASB+FP y el lodo activado es del 15%. Sin embargo, en el proyecto se cuenta con el apoyo para sufragar esta diferencia si así fuera requerido.	5	3
Costo de operación y mantenimiento	Las propuestas muestran que el costo de operación y mantenimiento del sistema de lodos activados es 2 veces mayor al costo de la tecnología UASB+FP.	5	3
Criterios de diseño	En la literatura hay gran cantidad de artículos, libros y folletos que describen el funcionamiento y criterios de diseño del sistema de lodos activados en su versión de aireación extendida y en menor medida del reactor UASB. Los criterios de diseño son confiables aunque por experiencia acumulada en su aplicación, se le asignará un valor más alto al lodo activado.	3	5
Experiencia del contratista	La empresa que propone el sistema de lodos activados posee una experiencia de 30 años en el campo de la ingeniería ambiental y podría ser catalogada como una empresa de desarrollo medio, mientras que la que propone el reactor UASB tiene una experiencia de 10 años y su tamaño es a nivel microempresa. Por este hecho, se le asigna una calificación superior a la empresa que propone los lodos activados.	1	5
Tecnología ampliamente probada	La tecnología de lodos activados ha sido utilizada ampliamente en el mundo, mucho más que la tecnología UASB que posee alrededor de 25 años de haber sido desarrollada para efluentes municipales.	1	5
Complejidad de construcción y equipamiento	La construcción y el equipamiento del sistema de lodos activados son más complejos que los del reactor UASB+FP debido sobre todo al equipo electro-mecánico involucrado.	5	1
Flexibilidad de la operación.	Aunque el sistema UASB es sensible a variaciones bruscas de caudal durante una operación normal de la planta de tratamiento, ofrece ventajas sobre el sistema de lodos activados en cuanto a soportar altas cargas orgánicas. Además, puede permanecer sin alimentación de agua residual por días sin que se afecte sensiblemente su capacidad de tratamiento. Adicionalmente, el filtro percolador le aporta capacidad de soportar caudales variables durante el día. Por su parte, el sistema de lodos activados requiere una alimentación continua y en cierto grado constante en calidad del agua residual además del suministro constante de oxígeno. Por estas razones, el sistema UASB+FP se considera como un sistema más flexible en operación que el sistema de lodos activados.	5	3
Confiabilidad del proceso	Se considera que el sistema aerobio proporciona una mejor calidad de agua además en forma constante. La calidad del agua tratada en el sistema UASB+FP podría presentar un espectro de variación más amplio que el sistema aerobio bien operado.	3	5
Complejidad de operación del proceso	El proceso de lodos activados en su versión de aireación extendida es más complejo de operar que el sistema UASB+FP.	3	1
Requerimiento de personal	Se considera que para operar el sistema UASB+FP se requiere de un operador por día y un vigilante, mientras que para operar el sistema de lodos activados se necesita un operador por turno de 12 horas con una mayor capacitación y un vigilante.	5	1

Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	El hecho de que el municipio se encuentre relativamente lejos de la capital del estado dificulta la disponibilidad de repuestos para los equipos rotatorios. Además, los centros de servicio se encuentran en ciudades con mayor movimiento industrial lo cual es ajeno a la población del proyecto. El sistema de lodos activados posee mayor equipamiento que el sistema UASB+F, por lo que la atención en cuanto a este aspecto es más difícil para el sistema de lodos activados.	5	1
Influencia de la temperatura	No hay problema con este rubro pues las variaciones de temperatura en la población permanecen en un intervalo adecuado para el funcionamiento de procesos biológicos.	5	5
Producción de ruido	Por los equipos rotatorios involucrados en el sistema de lodo activado hay mayor producción de ruido que en el sistema UASB+FP.	5	3
Contaminación visual	Ambos sistemas pueden contar con un diseño arquitectónico agradable e integrado al entorno.	5	5
Producción de malos olores	La oxidación aerobia de la materia orgánica favorece la no-proliferación de malos olores, por el contrario los procesos anaerobios tienden a formar H <sub>2</sub> S, principal compuesto responsable de malos olores.	1	5
Huella de carbono	De acuerdo con los resultados del proyecto desarrollado por el II-UNAM, el proceso UASB+FP presenta menor impacto en generación de gases de efecto invernadero que el sistema de lodos activados (ver anexo II de esta Guía)	5	3
Animales dañinos	Ambos procesos no favorecen la formación de animales dañinos.	5	5

## LLENADO Y OPERACIÓN DE LA MATRIZ

Tabla IV.3. Ejemplo de llenado y operación de la matriz

	A	B	C	D	E
#	%	PROCESO EVALUADO: UASB+FILTRO PERCOLADOR RUBROS EVALUADOS	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 3= adecuado 5= muy bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	D*A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	3	0.6	3
2	10	GENERACIÓN DE RESIDUOS	5	1	10
3	0	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD	5	1	0
4	10	GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REUSO	5	1	10
5	5	VIDA ÚTIL	5	1	5
6	0	REQUERIMIENTO DE ÁREA	5	1	0
7	35	COSTO			
7.1		Inversión	5		
7.2		Operación y mantenimiento	5		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 7.3 D		1	35
8	10	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
8.1		Criterios de diseño	3		
8.2		Experiencia del contratista	1		
8.3		Tecnología ampliamente probada	1		
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	5		
8.5		Sumar las casillas 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C y dividir el total entre 20. El resultado anotarlo en la casilla 8.5D		0.5	5
9	20	OPERACIÓN			
9.1		Flexibilidad de operación	5		
9.2		Confiabilidad del proceso	3		
9.3		Complejidad de operación del proceso	3		
9.4		Requerimiento de personal	5		
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	5		
9.6		Sumar las casillas 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 9.6D		0.84	16.8
10	5	ENTORNO			
10.1		Influencia de la temperatura	5		
10.2		Producción de ruido	5		
10.3		Contaminación visual	5		
10.4		Producción de malos olores	1		
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono)	5		
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	5		
10.7		Sumar las casillas 10.1C, 10.2C, 10.3C, 10.4C y 10.5C y 10.6 y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7D		0.87	4.4
11	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11E			89

#	A	B	C	D	E
	%	<b>PROCESO EVALUADO: Lodos Activados Tipo Aireación Extendida</b> <b>RUBROS EVALUADOS</b>	<b>CALIFICACIÓN</b> 0= no aplica 1= deficiente 3=adecuado 5=muy bueno	<b>C/5</b> (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	<b>D*A</b>
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	5	1	5
2	10	GENERACIÓN DE RESIDUOS	3	0.6	6
3	0	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD	5	1	0
4	10	GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REUSO	5	1	10
5	5	VIDA ÚTIL	3	0.6	3
6	0	REQUERIMIENTO DE ÁREA	3	0.6	0
7	35	<b>COSTO</b>			
7.1		Inversión	3		
7.2		Operación y mantenimiento	3		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 7.3 D		0.6	21
8	10	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>			
8.1		Criterios de diseño	5		
8.2		Experiencia del contratista	5		
8.3		Tecnología ampliamente probada	5		
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	1		
8.5		Sumar las casillas 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C y dividir el total entre 20. El resultado anotarlo en la casilla 8.5D		0.8	8
9	20	<b>OPERACIÓN</b>			
9.1		Flexibilidad de operación	3		
9.2		Confiabilidad del proceso	5		
9.3		Complejidad de operación del proceso	1		
9.4		Requerimiento de personal	1		
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	1		
9.6		Sumar las casillas 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 9.6D		0.44	8.8
10	5	<b>ENTORNO</b>			
10.1		Influencia de la temperatura	5		
10.2		Producción de ruido	3		
10.3		Contaminación visual	5		
10.4		Producción de malos olores	5		
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono)	3		
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	5		
10.7		Sumar las casillas 10.1C, 10.2C, 10.3C, 10.4C y 10.5C y 10.6 y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7D		0.87	4.3
11	100	<b>SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11E</b>			66.1

Como es posible observar, la opción basada en un reactor UASB + Filtro percolador es más atractiva que la de lodos activados en su versión de aireación extendida para las condiciones particulares de este proyecto supuesto.

Los resultados obtenidos en la matriz de decisión dependen en gran medida de la ponderación efectuada a cada rubro. Es por ello que el procedimiento para fijar los pesos de cada rubro debe surgir de un consenso entre las personas que participarán en el llenado de la matriz. Los pesos podrán variar en función de las limitaciones o las prioridades que se presenten para un proyecto determinado. La objetividad y conocimiento técnico de los procesos y del proyecto son pilares fundamentales para la toma de una decisión acertada basada en la matriz de decisión.

La matriz de decisión propuesta para la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales es un instrumento eficaz y fácil de manejar que permite una toma de decisión objetiva basada en fundamentos técnicos generales e información de ingeniería básica de las tecnologías evaluadas. Constituye además una herramienta para la comunicación de la decisión a los actores involucrados, ya que presenta en forma clara los elementos de información que llevaron a tal resultado, lo que atiende criterios de objetividad, imparcialidad y transparencia. 💧



## GLOSARIO

**ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.** Se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden reducir el daño o aprovechar sus aspectos benéficos.

**AEROBIO.** Medio acuoso con presencia del oxígeno molecular disuelto.

**AGUAS GRISES.** Aguas residuales domésticas compuestas por agua con detergentes y jabones procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos y lavaderos. No incluye la proveniente de sanitarios.

**AGUAS NEGRAS.** Aguas que contienen excretas humana o de animales. Una particularidad importante es que su contenido de microorganismos potencialmente patógenos es muy alto.

**AGUAS RESIDUALES BRUTAS.** Aguas residuales sin tratar, también conocidas como crudas.

**AIREACIÓN.** Técnica que se utiliza en el tratamiento de aguas para incorporar oxígeno al agua. La fuente de oxígeno es el aire y su transferencia hacia el líquido es por medios de aireadores mecánicos o sopladores a través de difusores de aire comprimido.

**ALGAS.** Organismos uni o multicelular que se encuentran comúnmente en el agua superficial. Producen su material celular por medio de la fotosíntesis, generando además oxígeno durante el día. Son una fuente de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua naturales. El crecimiento excesivo de las algas puede hacer que el agua tenga olores o gusto indeseables, o hasta generar compuestos tóxicos para la vida acuática.

**ANABOLISMO.** Proceso del metabolismo celular responsable de sintetizar nuevas y más complejas sustancias orgánicas, a partir del consumo de un sustrato, del cual toma la energía necesaria para llevarse a cabo (catabolismo). A través de este proceso, se crean nuevas células.

**ANAEROBIO.** Medio acuoso caracterizado por la ausencia de oxígeno molecular disuelto, así como combinado en forma de ion nitrato o nitrito.

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV).** Metodología mediante la cual se realiza una identificación, cuantificación y evaluación de las entradas y salidas, así como de los impactos ambientales potenciales, de la producción de un producto o la prestación de un servicio a través de su ciclo de vida (incluye desde la obtención de las materias primas, hasta la disposición final del producto o el término de la vida útil de la infraestructura de servicio).

**ANÓXICO.** Medio acuoso caracterizado por la ausencia de oxígeno molecular disuelto, pero con la presencia de nitrógeno oxidado en forma de nitratos y nitritos. Es un estado intermedio entre el medio aerobio y el anaerobio.

**BACTERIAS.** Las bacterias son microorganismos unicelulares que presentan un tamaño de unos pocos micrómetros (entre 0,5 y 5  $\mu\text{m}$ , por lo general) y diversas formas incluyendo esferas (cocos), barras (bacilos) y hélices (espirilos). Su función en los sistemas de tratamiento de aguas residuales es el consumir la materia orgánica biodegradable, para la síntesis de nuevas células (reproducción) o la generación de gases (metano) y de esta forma, retirarla del agua en tratamiento.

**BACTERIA FACULTATIVA.** Bacteria que puede vivir bajo condiciones aerobias o anaerobias.

**BIODEGRADABLE.** Sustancia que puede ser descompuesta o degradada por la acción de microorganismos o seres vivos.

**BIOMASA.** Denominación genérica del conjunto de microorganismos que se desarrolla en un sistema de tratamiento de aguas residuales. Puede también llamarse lodo biológico o simplemente lodo.



**BIOPELÍCULA.** Población de microorganismos de diverso género adheridos a una superficie. En tratamiento de aguas residuales se aplica en reactores de biomasa fija o biopelícula, utilizando un soporte inerte para el desarrollo de la misma.

**CAMBIO CLIMÁTICO.** Es la consecuencia sobre los patrones del clima debido al calentamiento global de la atmósfera producido por el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero y el incremento de su concentración en la atmósfera. Este fenómeno está muy relacionado con los niveles de consumo de energía de la sociedad moderna, generada a partir de combustibles fósiles, así como con la actividad agrícola, ganadera e industrial.

**CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA.** Cantidad de masa del contaminante (normalmente expresado como DBO<sub>5</sub> o DQO) que se introduce a un sistema por unidad de volumen del tanque o reactor biológico en un tiempo determinado (por lo general un día).

**CATABOLISMO.** Proceso del metabolismo celular que transforma moléculas orgánicas en productos más simples, y por el cual la célula obtiene energía para sus funciones vitales, entre ellas la síntesis de nuevas células (anabolismo). Ambos procesos, catabolismo y anabolismo, integran el conjunto conocido como metabolismo.

**CICLO DE VIDA.** Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

**COAGULACIÓN.** Desestabilización de partículas coloidales por la adición de un reactivo químico, llamado coagulante. Esto ocurre a través de la neutralización de las cargas eléctricas.

**CONCENTRACIÓN.** La cantidad de material disuelto o en suspensión en una unidad de volumen de solución, por ejemplo, expresado en mg/l.

**CONTAMINACIÓN POR NUTRIENTES.** Contaminación de las fuentes de aguas por una excesiva presencia de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. En aguas superficiales, su presencia provoca la excesiva producción de algas y su eutrofización de los cuerpos de agua. La fuente de estos nutrientes son las descargas de aguas residuales y las aguas de drenaje agrícola.

**CONTAMINANTES BIOLÓGICOS.** Organismos vivos tales como virus, bacterias, hongos y parásitos que pueden causar efectos dañinos sobre la salud de los seres humanos o animales

**CONTAMINANTES TÓXICOS DEL AGUA.** Compuestos que no son encontrados de forma natural en el agua y vienen dados en concentraciones que causan la muerte, enfermedad, o defectos de nacimiento en organismos que los ingieren o absorben.

**COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.** Compuestos orgánicos sintéticos los cuales tienen fácil evaporación y a menudo provocan cáncer. Se volatilizan a condiciones medio ambientales de presión y temperatura. En su mayoría son combustibles y solventes derivados del petróleo.

**DBO<sub>5</sub> (DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO).** La cantidad de oxígeno (medido en mg/l) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por bacterias, bajo condiciones de una prueba estandarizada, en un tiempo de 5 días e incubada a 20°C. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales. Frecuentemente se refiere solo como DBO.

**DECANTAR.** Retirar la capa superior de un líquido después de que materiales pesados (un sólido o cualquier otro líquido) se haya depositado.

**DESASTRE.** Situación o evento que sobrepasa la capacidad local, que requiere apoyo de nivel nacional o internacional con asistencia externa. Un evento imprevisto y a menudo repentino que causa grandes daños, destrucción a la población, a la infraestructura y al medio natural.

**DESGASIFICACIÓN.** El proceso de eliminación de gases disueltos en agua.

**DESNITRIFICACIÓN.** Eliminación biológica de nitritos y nitratos del agua para producir nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) que es inocuo al medio ambiente.

**DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO).** Cantidad de oxígeno (medido en mg/l) que es consumido en la oxidación de materia orgánica, ya sea biodegradable o no, bajo condiciones de una prueba estandarizada. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. La DQO siempre es mayor a la DBO<sub>5</sub>, ya que contempla la oxidación total de la materia orgánica, no sólo la degradable por microorganismos.

**ESCHERICHIA COLI (E. COLI).** Bacteria asociada con el hombre y desechos de animales, que se encuentra en el intestino. Es usada como indicador de contaminación fecal en el agua.

**EUTRÓFICO.** Estado referente al agua que está enriquecida en nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

**EUTROFIZACIÓN ACELERADA.** Se debe a la alta presencia de nutrientes en el agua, lo cual causa un crecimiento excesivo de plantas acuáticas e incrementan la actividad de microorganismos anaerobios. Como resultado, los niveles de oxígeno disminuyen rápidamente, haciendo la vida imposible para los organismos acuáticos aerobios.

**FILTRACIÓN.** Separación de sólidos y líquidos usando un medio granular o poroso que sólo permite pasar al líquido a través de él.

**FLOCULACIÓN.** Acumulación de partículas coloidales desestabilizadas y pequeñas partículas que conlleva a la formación de flóculos de tamaño deseado, para su posterior separación por sedimentación o flotación.

**FLÓCULO.** Masa densa de materia que es formada por la acumulación de partículas suspendidas y coloidales.

**FLOTACIÓN.** Proceso de separación sólido-líquido o líquido-líquido, el cual es aplicado para partículas cuya densidad es más pequeña que la densidad del líquido que las contiene. Hay tres tipos: flotación natural, ayudada e inducida.

**GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI).** Gases que se encuentran presentes en la atmósfera y que dan lugar al fenómeno denominado efecto invernadero y al cambio climático. Los gases de efecto invernadero, de origen natural o antropogénico, incluyen al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), al metano ( $\text{CH}_4$ ), al óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y a los gases fluorados, principalmente.

**METABOLISMO.** Es el conjunto de reacciones bioquímicas y físico-químicas que realiza una célula (y por extensión, un organismo) para realizar sus funciones vitales (crecimiento, reproducción, mantenimiento, supervivencia, defensa, etc.). Se integra de dos procesos contrarios pero complementarios: el catabolismo (producción de energía) y el anabolismo (síntesis de material celular).

**MITIGACIÓN.** Intervención humana para reducir los gases de efecto invernadero producto de las actividades antropogénicas o para fomentar los sumideros que capturan dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero de la atmósfera.

**NITRIFICACIÓN.** Proceso biológico aerobio durante el cual bacterias nitrificantes convierten el amonio en nitrato.

**NUTRIENTE.** Cualquier sustancia que promueve el crecimiento de organismos vivos. El término es generalmente aplicado para el nitrógeno y el fósforo en aguas residuales, pero es también aplicado a otros elementos esenciales y elementos traza.

**PARTES POR MILLÓN.** Expresado como ppm; medida de la concentración. Un ppm es una unidad de peso de soluto por peso de solución. En análisis de agua un ppm es equivalente a mg/l o g/m<sup>3</sup>.

**PATÓGENO.** Algún elemento o agente que puede producir enfermedad o daño al organismo de un huésped, sea éste humano, animal o vegetal.

**POTENCIAL IMPACTO EN CAMBIO CLIMÁTICO.** Refleja la contribución de emisiones de gases a la atmósfera que incrementan el efecto del calentamiento global. Se representa en kg de CO<sub>2</sub> equivalentes (kgCO<sub>2</sub>e).

**POTENCIAL IMPACTO EN EUTROFIZACIÓN.** Refleja la contribución de un grupo de compuestos como nitratos y fosfatos, a la acumulación de nutrientes en el ambiente, lo cual redundaría en el deterioro de cuerpos de agua. Se representa en kg de PO<sub>4</sub> equivalentes (kgPO<sub>4</sub>e).

**POTENCIAL IMPACTO EN FORMACIÓN DE FOTO-OXIDANTES.** Refleja la contribución de varias emisiones para la formación de sustancias foto-oxidantes principalmente ozono y peroxilacetil-nitrato vía oxidación fotoquímica. Se representa en kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalentes (kgC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>e).

**PRECIPITADO.** Producto insoluble de una reacción química en un medio acuoso, que se separa por sedimentación o filtración.

**RESILIENCIA.** La capacidad de un sistema para recuperarse o ajustarse frente a los cambios ambientales.

**RIESGO.** Un evento de amenaza, o la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de daño potencial dentro de un período de tiempo dado y un área determinada.

**SEDIMENTACIÓN.** Asentamiento de partículas sólidas en suspensión en un sistema líquido debido a la gravedad.

**SIMBIOSIS.** Relación de beneficio mutuo entre dos organismos de diferente especie.

**SÓLIDOS DISUELTOS.** Es el material soluble en un líquido.

**SÓLIDOS FIJOS.** Conocidos también como cenizas, es el residuo que queda después de pasar la muestra a 550°C.

**SÓLIDOS SUSPENDIDOS.** Partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución o en el agua residual.

**SÓLIDOS TOTALES.** Todos los sólidos en el agua residual, incluyendo sólidos suspendidos y sólidos filtrables o disueltos.

**SÓLIDOS VOLÁTILES.** Los sólidos de naturaleza orgánica que se volatilizan (se queman) a 550°C según una prueba estandarizada.

**SOLUBILIDAD.** La cantidad de masa de un compuesto que puede disolverse por unidad de volumen de agua.

**SOLUTO.** Materia o compuesto que se disuelve en un líquido como el agua.

**SOLVENTE.** Sustancia (usualmente líquida) capaz de disolver una o más sustancias. El agua se conoce como el solvente universal.

**SUSTRATO.** En ingeniería bioquímica se refiere a la sustancia que sirve de fuente de energía o de carbón (alimento) a un microorganismo. En los procesos de tratamiento de aguas residuales se trata de las sustancias de naturaleza orgánica que serán consumidas y removidas por medio de la biomasa microbiana.

**TIEMPO DE RETENCIÓN CELULAR.** Tiempo de permanencia de los microorganismos en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

**TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA.** Tiempo que tarda una "partícula" de agua en salir de un tanque con un volumen determinado.

**UNIDAD FUNCIONAL.** Unidad de referencia para cuantificar y comparar el desempeño ambiental de un producto con base en un Análisis de Ciclo de Vida.

**VIRUS.** La más pequeña forma de vida conocida, que no es una célula de forma natural. Viven dentro de células de animales, plantas y bacterias y usualmente causan enfermedades.

**VULNERABILIDAD.** La incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre.

## LECTURAS RECOMENDADAS

- Banco Mundial (2008). Análisis probabilista de riesgos para Centro América, CAPRA (Probabilistic Risk Assessment Initiative). Disponible en: <http://www.ecapra.org>
- Banco Mundial. World Development Indicators Database, 2011. Disponible en: <http://data.worldbank.org/news/WDI-2011-database-and-publication-available?print>
- BID, PNUMA, World Bank Institute (2013). Plataforma sobre financiamiento de carbono para América Latina. Disponible en: <http://finanzascarbono.org>
- Brown-Salazar D. (2004). Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales, PROARCA (Programa Ambiental Regional para Centroamérica) y USAID (United States Agency for International Development). Disponible en: [http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/085\\_guia\\_aguas\\_residuales/guia\\_aguas\\_residuales%20PROARCA%202004.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/085_guia_aguas_residuales/guia_aguas_residuales%20PROARCA%202004.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (2011). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, SEMARNAT, MÉXICO. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>
- COP 16. CMNUCC (2010). Agua y Adaptación al Cambio Climático en las Américas. Soluciones del Diálogo Regional de Política (DRP). Resumen Ejecutivo. Disponible en: [http://www.waterclimatechange.org/fotos/evento\\_elemento/0folletoD7espanol.pdf](http://www.waterclimatechange.org/fotos/evento_elemento/0folletoD7espanol.pdf)
- Frechen F. B. (1988). Odour emissions and odour control at wastewater treatment plants in West Germany. Water Sci. Technol. 20, 4/5, 261-266

- ICLEI European Secretariat (2011). Adapting Urban Water Systems to Climate Change—A Handbook for Decision Makers at the Local Level. ICLEI European Secretariat GmbH. Alemania. Disponible en: [http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch\\_training/files/Resources/Loftus\\_2011\\_Adaptation\\_handbook\\_for\\_decision\\_makers\\_at\\_the\\_local\\_level.pdf](http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch_training/files/Resources/Loftus_2011_Adaptation_handbook_for_decision_makers_at_the_local_level.pdf)
- Marín Ocampo Armando, Osés Pérez Manuel (2013). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados. Tomo I y II. CEA Jalisco Dirección de operación de plantas de Tratamiento de aguas residuales. Disponible en:  
[http://www.ceajalisco.gob.mx/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/FinalDownload/DownloadId-2B11939C5BD5880D08706793FBAD3C2F/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/publicaciones/pdf/plantas\\_tratam\\_tomo1.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/FinalDownload/DownloadId-2B11939C5BD5880D08706793FBAD3C2F/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/publicaciones/pdf/plantas_tratam_tomo1.pdf)  
[http://www.ceajalisco.gob.mx/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/FinalDownload/DownloadId-91BB4AF9C8B797CEDB6F77A2DA014DF8/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/publicaciones/pdf/plantas\\_tratam\\_tomo2.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/FinalDownload/DownloadId-91BB4AF9C8B797CEDB6F77A2DA014DF8/5B533FA0-C0E1-4241-AF42-C40D622DBA23/publicaciones/pdf/plantas_tratam_tomo2.pdf)
- Metcalf & Eddy Inc. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. McGraw Hill. México.
- Monvois J.; Gabert J.; Frenoux C.y Guillaume M. (2010). How to Select Appropriate Technical Solutions for Sanitation. Cotonou and Paris: Partenariat pour le Développement Municipal (PDM) and Programme Solidarité Eau (pS-Eau). Disponible en:  
[http://www.pseau.org/outils/ouvrages/pdm\\_ps\\_eau\\_cms\\_guide\\_n\\_4\\_how\\_to\\_select\\_appropriate\\_technical\\_solutions\\_for\\_sanitation\\_2010.pdf](http://www.pseau.org/outils/ouvrages/pdm_ps_eau_cms_guide_n_4_how_to_select_appropriate_technical_solutions_for_sanitation_2010.pdf)
- Nolasco, D. A. (2010). Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en:  
<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35521814>
- Noyola Adalberto, Güereca Leonor Patricia, Morgan-Sagastume Juan Manuel, Hernández-Padilla Flor, Padilla-Rivera Alejandro, Carius Estrada Chantal, Cisneros Ortiz Margarita, Villalba Pastrana Elena (2013) Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables. Informe final proyecto IDRC.UNAM. Disponible en:  
<http://proyectos.iingen.unam.mx/LACClimateChange/>



- Noyola Adalberto, Heller Leo, Otterstetter Horst, (2010). Los desafíos para la universalización del saneamiento básico, en Determinantes Ambientales y Sociales de la Salud, Luiz Augusto Galvão, Jacobo Finkelman y Samuel Henao (OPS) Editores. McGraw-Hill Interamericana, 367-381.
- Noyola Adalberto, Padilla-Rivera Alejandro, Morgan-Sagastume Juan Manuel, Güereca Leonor Patricia y Hernández-Padilla Flor, 2012. Typology of wastewater treatment technologies in Latin America. CLEAN – Soil, Air, Water, 40 (9): 926-932.
- Organización Panamericana de la Salud (1998). Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario. Guías para el análisis de vulnerabilidad. Disponible en: [http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex\\_files/PAHO/PAHO1%20-%20MitigCompleto.pdf](http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex_files/PAHO/PAHO1%20-%20MitigCompleto.pdf)
- PNUMA (2004). Lineamientos sobre el manejo de aguas residuales municipales, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2004. Disponible en: [http://esa.un.org/iys/docs/san\\_lib\\_docs/lineamientos\\_sobre\\_el\\_manejo\\_spanish.pdf](http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/lineamientos_sobre_el_manejo_spanish.pdf)
- Rolim Mendoza Sergio (2000). Sistemas de lagunas de estabilización. Primera edición, McGraw Hill. Colombia.
- Romero Rodríguez Blanca (2003). El ACV y la gestión ambiental, Tendencias Tecnológicas, Boletín IIE, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/tend.pdf>
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2008). Guía general para la preparación y presentación de estudios de evaluación socioeconómica de proyectos para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. SHCP México. Disponible en: [http://www.shcp.gob.mx/EGRESOS/ppi/Proyec\\_hidraulicos/guia\\_acb\\_ptar.pdf](http://www.shcp.gob.mx/EGRESOS/ppi/Proyec_hidraulicos/guia_acb_ptar.pdf)







**ESTA OBRA ES** resultado de varios años de experiencia con plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, tanto en aspectos de diseño conceptual, como en capacitación de personal técnico y diagnósticos de operación. Se ha integrado con el objeto de apoyar a los responsables de la toma de decisiones en materia de tratamiento de aguas residuales en el ámbito municipal, quienes, a pesar de no ser necesariamente especialistas en el tema, deben contar con criterios para una adecuada elección de la tecnología para resolver su problema de manejo de aguas residuales.

La creciente conciencia de la sociedad y del gobierno para atender debidamente la protección del ambiente y la recuperación de recursos, abre una oportunidad para aplicar tecnologías de tratamiento de agua residual que atiendan las características específicas del caso, que sean innovadoras, que cumplan con las legislaciones locales y que presenten una menor huella de carbono. Bajo este contexto, los criterios de toma de decisiones para seleccionar la tecnología adecuada para un caso específico se amplían, debiendo integrar la sustentabilidad y la mitigación del cambio climático, así como aspectos sociales, a los técnico-económicos convencionales.

Este documento se orienta fundamentalmente a los pequeños y medianos sistemas operadores de agua y saneamiento, los cuales con frecuencia no cuentan con una adecuada asesoría o capacidad técnica para enfrentar la responsabilidad de la selección de su sistema de tratamiento de aguas residuales. Para ello, se presentan las posibles opciones tecnológicas y la definición de los elementos mínimos a solicitar en las ofertas de proyectos, se proporciona una guía para evaluar dichas propuestas y así llegar finalmente a una selección objetiva y transparente de la más adecuada al caso específico.

Sin ser un límite absoluto, se considera que la guía es aplicable para sistemas municipales con caudales menores a 200 l/s (alrededor de 100,000 habitantes equivalente). Para plantas mayores a ese caudal, se presume que el tamaño del organismo operador responsable implicaría contar con expertos en varias áreas técnicas y para quienes este documento sería elemental.

La obra además cuenta con información valiosa sobre el estado del tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe y en particular con los resultados de aplicar la metodología de análisis de ciclo de vida a diversos procesos de tratamiento representativos de la Región.