

## PERSPECTIVAS DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PAÍSES EN DESARROLLO

PATRICIA TORRES\*

### RESUMEN

En países con grandes problemas de saneamiento y pocos recursos, como los que están en vías de desarrollo, se requieren plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas –PTARD– apropiadas y sostenibles; dado que estos países se localizan en general en regiones de clima tropical y subtropical (temperaturas superiores a 20 °C), la digestión anaerobia es una tecnología clave que genera subproductos con valor agregado (bioenergía, nutrientes y agua para reúso). América Latina es la región con mayor número de PTARD anaerobias, siendo el reactor UASB el de mayor aplicación para el tratamiento del ARD; su implementación a escala tan grande como la de la PTARD Onça (Belo Horizonte, Brasil) demuestra que es una tecnología consolidada, con eficiencias de reducción entre 65 % y 80 % de DQO y TRH entre 6 y 10 horas. Sin embargo, es necesario continuar avanzando en el mejoramiento y perfeccionamiento de los actuales métodos de tratamiento que permitan soluciones tecnológicas respetuosas con el ambiente y adecuadas a las condiciones socioeconómicas y culturales propias de cada región. Este documento plantea un análisis y reflexión sobre el tratamiento anaerobio de ARD en países en desarrollo y sobre las perspectivas de aplicación en pequeña y gran escala.

**PALABRAS CLAVE:** aguas residuales domésticas; selección de tecnología; tecnologías apropiadas; tratamiento anaerobio.

## PERSPECTIVES OF ANAEROBIC TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER IN DEVELOPING COUNTRIES

### ABSTRACT

Appropriate and sustainable municipal wastewater treatments plants –WWTP– are strongly required in developing countries which face both sanitation problems and poverty. Anaerobic digestion, as a leading technology that generates value added products (i.e. bio-energy, nutrients and water for reuse) has proved to be suitable in those countries, which are mostly placed in tropical and subtropical regions with temperatures higher than

---

\* Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle; Magíster y Doctora en Ingeniería Civil, énfasis Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo, Brasil. Profesora Titular, integrante del Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia. patricia.torres@correounivalle.edu.co

20 °C. Latin America is the region with the highest number of anaerobic WWTP, being the UASB reactor the most common technology for municipal wastewater treatment. Onça WWTP (Belo Horizonte, Brazil) is an example of a large scale implementation, showing that UASB is a stabilized technology with COD removal efficiencies ranging from 65 % to 80 % and HRT between 6-10 hours. However, further research is highly needed in order to improve and upgrade the existing treatment methods; so as to achieve technological solutions that prove to be environmentally harmless and suitable to each particular socio-economic and cultural condition. This work is aimed at analyzing and discussing the anaerobic treatment of domestic wastewater issues and its application perspectives at both small and large scale in developing countries.

KEY WORDS: municipal wastewater; technology selection; suitable technologies; anaerobic treatment.

## PERSPECTIVAS DO TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

### RESUMO

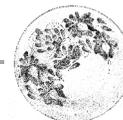
Em países com grandes problemas de saneamento e poucos recursos como os países que estão em desenvolvimento, se requerem estações de tratamento de esgotos –ETE– apropriadas e sustentáveis; dado que estes países localizam-se em geral em regiões de clima tropical e subtropical (temperaturas superiores a 20 °C), a digestão anaeróbia é uma tecnologia chave que gera subprodutos com valor agregado (bioenergia, nutrientes e água para reuso). América Latina é a região com maior número de ETE anaeróbias, sendo o reator UASB o de maior aplicação para o tratamento de esgotos domésticos; sua implementação em escala tão grande como a da ETE Onça (Belo Horizonte, Brasil) demonstra que é uma tecnologia consolidada, com eficiências de redução entre 65 % e 80 % de DQO e TRH entre 6 e 10 horas. No entanto, é necessário continuar avançando na melhoria e aperfeiçoamento dos atuais métodos de tratamento que permitam soluções tecnológicas respeitadas com o ambiente e adequadas às condições socioeconômicas e culturais próprias de cada região. Este documento propõe uma análise e reflexão sobre o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos em países em desenvolvimento e sobre as perspectivas de aplicação em pequena e grande escala.

PALAVRAS-CÓDIGO: esgotos domésticos; seleção de tecnologia; tecnologias apropriadas; tratamento anaeróbio.

### 1. INTRODUCCIÓN

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2009), en el 2025 la población mundial será del orden de 7.200 millones de personas y unas dos terceras partes se concentrarán en ciudades. Aunque la urbanización por sí misma no es un problema, los crecimientos mal planeados, por lo general, causan problemas ambientales, como agotamiento y contaminación de los recursos agua, aire y suelo por el vertimiento y manejo inadecuado de los residuos líquidos y sólidos generados (Troschinetz y Mihelcic, 2009).

Los países en desarrollo en general se ubican en regiones de clima tropical y subtropical y son los que presentan las más bajas coberturas en recolección y tratamiento adecuado de aguas residuales domésticas –ARD–, siendo las principales causas aspectos financieros y el desconocimiento o falta de reconocimiento de tecnologías alternativas de bajo costo, lo que compromete la sostenibilidad de los sistemas. Debido a las consecuencias ambientales y de efectos sobre la salud, el tratamiento de las ARD está recibiendo mayor atención de entidades como el Banco Mundial, los gobiernos y los organismos de control; por otro lado, las aguas residuales tratadas



representan un potencial de aprovechamiento principalmente en regiones con escasez de agua (El-Fadel, Zeinati y Jamali, 2000).

Mientras en los países europeos y norteamericanos la tecnología anaerobia es usada por lo general solo para el tratamiento de aguas residuales industriales –ARI– y en especial para la digestión de lodos de sistemas aerobios (GTZ, 1997), en países de clima tropical y subtropical como Brasil, Colombia, México, China, India, Portugal y otros, varias tecnologías han sido adaptadas y muchos esfuerzos han sido dirigidos al tratamiento anaerobio, destacándose la aplicación de reactores anaerobios de manto de lodos y flujo ascendente, conocidos como UASB por su sigla en inglés de upflow anaerobic sludge blanket (Torres, 2000; Kujawa-Roeleveld y Zeeman, 2006).

Este documento presenta una discusión y reflexión sobre la aplicabilidad de la tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales domésticas en los países en desarrollo, dado su alto potencial de aplicación en condiciones de clima tropical y subtropical, y hace un análisis de las perspectivas futuras de aplicación tanto a pequeña como a gran escala, mostrando resultados de desempeño de reactores en escala piloto y real en diferentes países y destacando los principales aspectos por mejorar.

## 2. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y NIVELES DE TRATAMIENTO

### 2.1 Aguas residuales domésticas –ARD–

Las ARD contienen material suspendido y disuelto orgánico e inorgánico que, de acuerdo con el tipo de constituyente, se clasifican en: i) *Convencionales* (sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica carbonácea, nutrientes y microorganismos patógenos); ii) *No convencionales* (orgánicos refractarios, orgánicos volátiles, surfactantes, metales, sólidos

disueltos) y iii) *Emergentes* (medicinas, detergentes sintéticos, antibióticos veterinarios y humanos, hormonas y esteroides, etc.). Los *no convencionales* y los *emergentes* pueden encontrarse en las aguas residuales, debido a la predominancia de sistemas de alcantarillado combinado y ante todo a la potencial mezcla con agua residual industrial –ARI– (Metcalf y Eddy, 2003).

Los riesgos asociados con las sustancias *emergentes* pueden constituir la mayor amenaza para la salud pública en el largo plazo y ser de más difícil manejo que el riesgo causado por agentes patógenos (Mara y Cairncross, 1990); sin embargo, en los países en desarrollo predominan los riesgos asociados a los constituyentes *convencionales*, siendo la presencia de patógenos en las fuentes de agua una de las principales causantes de enfermedades en la región (Reynolds, 2002; OPS-IDRC, 2005).

El ARD presenta valores de pH alrededor de la neutralidad, con una demanda bioquímica de oxígeno –DBO– constituida por 40 a 60 % de la demanda química de oxígeno –DQO–, la cual en general varía entre menos de 250 y 800 mg/L, dependiendo de la forma de recolección y disposición de las aguas residuales: *in situ*, en seco, por medio de redes de alcantarillado sanitario o combinado, etc. (Mendonça, 2000). Otro factor que incide en forma significativa en esta variación es el consumo de agua potable, que está definido por los hábitos de la población y por aspectos climáticos, culturales, socioeconómicos, entre otros. Los sólidos suspendidos (SS) varían entre 100 y 400 mg/L y pueden contribuir con un 30 a 70 % de la DQO; los nutrientes varían entre 10 y 100 mg N/L, 5-25 mg P/L y 10-40 mg K/L (Mara y Cairncross, 1990).

La cuantificación de los contaminantes presentes en el ARD es condición necesaria para seleccionar de manera apropiada la tecnología de tratamiento que garantice técnica y económicamente una calidad de agua residual tratada adecuada a su vertimiento o uso posterior y para minimizar el potencial riesgo a la salud pública y al ambiente.

## 2.2 Niveles de tratamiento

Los métodos de evacuación de ARD más comunes en la mayoría de ciudades de los países en desarrollo han sido el vertimiento directo a los suelos y a los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos y mares) y el riego; sin embargo, estas prácticas no respetan las regulaciones municipales para descarga ni los estándares de calidad para el agua de riego, representando problemas ambientales y riesgos para la salud (Von Sperling y Chernicharo, 2005). Sobre la primera técnica de manejo de ARD, Mara (2004) menciona que solo si se presenta una relación mayor de 500 entre el caudal del cuerpo receptor y el de

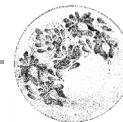
las aguas residuales para ser descargadas (factor de dilución), esta puede considerarse una forma adecuada de disposición de aguas residuales no tratadas.

Existen diversas clasificaciones para el tratamiento de las aguas residuales: por niveles, por operaciones y procesos, por grado de complejidad y tratamiento. En todos los casos, una adecuada selección y combinación permitirá dar cumplimiento a los requisitos del tratamiento (Noyola, 1998). La tabla 1 describe para cada nivel de tratamiento el tipo de contaminante removido, las eficiencias de reducción alcanzadas y el tipo de mecanismo predominante.

**Tabla 1.** Características de los principales niveles de tratamiento

Nivel de tratamiento	ÍTEM		
	Mecanismos predominantes	Contaminantes removidos	Eficiencias de reducción
<b>Preliminar</b>	Físico	Sólidos gruesos (basuras, arenas) Grasas Acondicionamiento químico (pH)	SS: <10 % DBO: <10 % Coliformes: ≈ 0 % Nutrientes: ≈ 0 %
<b>Primario</b>	Físico	Sólidos suspendidos sedimentables Materia orgánica suspendida (parcialmente)	SS: 40-50 % DBO: 25-35 % Coliformes: 30-40 % Nutrientes: < 20 %
<b>Primario avanzado</b>	Físico y químico	Sólidos suspendidos sedimentables y no sedimentables Materia orgánica suspendida (parcialmente) Fósforo	SS: 70-85 % DBO: 45-55 % Coliformes: 60-90 % Nutrientes: 20 %N; 50-95 % P
<b>Secundario</b>	Biológico o químico	Sólidos no sedimentables Materia orgánica suspendida fina/soluble (parcialmente) Nutrientes (parcialmente) Patógenos (parcialmente)	SS: 60-99 % DBO: 60-99 % Coliformes: 60-99 % Nutrientes: 10-50 %
<b>Terciario</b>	Biológico o químico	Contaminantes específicos Materia orgánica fina y soluble (pulimento) Nutrientes Patógenos (principalmente)	SS: > 99 % DBO: > 99 % Coliformes: > 99,9 % Nutrientes: > 90 %

Fuente: Adaptado de Von Sperling, 1996; Torres, 2000; Metcalf y Eddy, 2003; Jordão y Pessôa, 2005; Bratby, 2006 y van Haandel, 2008



Los procesos de tratamiento pueden ser físico-químicos o biológicos; en los primeros se hace uso de las diferencias entre las propiedades de las partículas y el agua, aplicando principios de separación como la sedimentación o flotación. En los procesos químicos se cambia la forma de las partículas que no pueden ser separadas por estos medios, mediante la aplicación de productos químicos para formar partículas de mayor densidad que luego puedan ser separadas por métodos físicos. Algunos aspectos favorables de estos procesos son la rápida adaptación a cambios en la calidad y cantidad del agua residual y su tamaño compacto cuando se utilizan sedimentadores de alta tasa; sin embargo, las siguientes características limitan su aplicación (Noyola, 1998):

- Prácticamente reducción nula de la materia orgánica soluble, ya que lo que ocurre es un traslado de los contaminantes de la línea de agua a la línea de lodos.
- Elevada producción de lodos primarios con materia orgánica putrescible, que deben ser tratados “digeridos” antes de su aprovechamiento o disposición final ( $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$  agua residual tratada (Mara, 2004)).
- Altos costos de operación
- Complejidad operativa (manipulación de químicos y necesidad de personal calificado)
- Dependencia de reactivos químicos en cantidades significativas (dosis promedio de  $50 \text{ mg/L}$  de agua tratada de sulfato de aluminio en base seca (Noyola, 1998);  $1 \text{ g/L}$  cal (Mara, 2004);  $10\text{-}30 \text{ mg/L}$  cloruro férrico (Jordão y Pessôa, (2005).

Los procesos biológicos parten de los principios que ocurren de manera natural en ríos, lagos o suelos, donde los microorganismos presentes consumen la materia orgánica y generan nuevo material celular o gas; los objetivos principales son estabilizar la materia orgánica y coagular y remover los sólidos coloidales que no se sedimentan de manera natural. Dependiendo de las circunstancias locales, se pueden incluir otros objetivos tales como la reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y de otros compuestos orgánicos (Crites y Tchobanoglous, 2000; Metcalf y Eddy, 2003).

Los procesos biológicos son modalidades de tratamiento más competitivas que los físico-químicos, porque, además de un cambio en el estado de la materia orgánica, ocurre una reducción real o su estabilización (Noyola, 1998). Estos procesos pueden ser aerobios, anaerobios o facultativos, dependiendo de las exigencias de oxígeno molecular. La tabla 2 muestra el análisis comparativo de la conversión biológica en sistemas aerobios y anaerobios respectivamente.

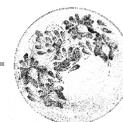
El análisis comparativo de las características de las tecnologías aerobia y anaerobia mostradas en la tabla 2 muestra que en general aspectos como menor consumo de energía, posibilidad de producción de energía (metano), generación de menores cantidades de lodo y de factores de emisión de GEI, simplicidad y bajos costos, entre otros, hacen de la tecnología anaerobia una opción más sostenible para el tratamiento y aprovechamiento del ARD (Foresti, 2002; Van Haandel *et al.*, 2006; Chernicharo, 2007; Noyola, 2007).

**Tabla 2.** Características de las tecnologías aerobia y anaerobia

PARÁMETRO	AEROBIO	ANAEROBIO
Reacción que gobierna	$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{biomasa}$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + \text{biomasa}$
$\Delta G^\circ$	-2840 KJ/mol glucosa	-393 KJ/mol glucosa
Energía (E)	60 % almacenada en nueva biomasa 40 % perdida como calor	5-7 % almacenada en nueva biomasa 3-5 % perdida como calor 90 % retenida como $CH_4$
Coefficiente de producción celular (Y)	Alto 0.40-0.50 gSSV/gDQO <sub>removida</sub>	Bajo Y <sub>1</sub> : Bacterias metanogénicas: 0,03 gSSV/gDQO <sub>removida</sub> Y <sub>2</sub> : Bacterias acidogénicas: 0,15 gSSV/gDQO <sub>removida</sub>
Requisito de nutrientes	Alto DBO <sub>5</sub> :N:P=100:5:1	Bajo Biomasa con bajo coeficiente Y (~0,05 gSSV/gDQO <sub>removida</sub> ), Ej. degradación de AGV; DQO:N:P= 1.000:5:1 Biomasa con alto coeficiente Y (~0,15 gSSV/gDQO <sub>removida</sub> ) Ej. degradación de carbohidratos DQO:N:P= 350:5:1
Requisito alcalinidad bicarbonática	Bajo - Moderado	Alto - Moderado
Requisito energía para aireación	Alto	No requiere
Requisito de área	Alto	Bajo
Costos de implementación	Altos	Bajos
Calidad lodo de exceso	Requiere estabilización	Lodo estabilizado
Periodo de arranque	Bajo - Medio	Medio - Alto
Tolerancia altas cargas orgánicas	Sí	Sí
Eficiencia tratamiento ARD	>80 %	65-80 %
Requisito etapa primaria de separación sólido-líquido	Frecuente	Poco frecuente
Necesidad de postratamiento para reducción de materia orgánica carbonácea	Poco frecuente	Frecuente
Necesidad de postratamiento para reducción de materia orgánica nitrogenada, fósforo y patógenos	Sí	Sí
Requisito etapa de separación sólido y líquido posterior	Frecuente	Poco frecuente
Requisito recirculación biomasa para mantener edad de lodo	Frecuente	No requiere
Almacenamiento de lodo activo	No	Sí (meses)
Producción de metano (combustible)	No	Sí
Potencial en la producción de hidrógeno (combustible, materia prima)	No	Sí**
Impacto ambiental (olores)	Bajo - Moderado	Alto - Moderado
Generación de gases efecto invernadero –GEI–	Alta	Baja***

\*En función de la concentración del ARD; \*\*Según estudios a escala de laboratorio; \*\*\* Siempre y cuando el biogás generado sea utilizado o incinerado

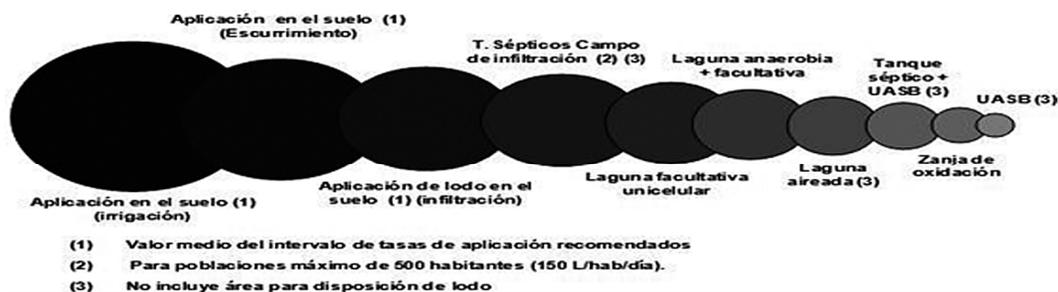
Fuente: Adaptado de van Haandel y Lettinga, 1994; Noyola, 1998; Torres, 2000; Gerardi, 2002; Metcalf y Eddy, 2003; Foresti, Zaiat y Vallero, 2006; Chernicharo, 2007; Li y Fang, 2007, y van Haandel y van der Lubbe, 2007



### 3. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE ARD

Existen varios factores primordiales para la selección de la tecnología que ofrezca ventajas significativas en comparación con otras y con relación a las exigencias de área. La figura 1 muestra una com-

paración entre diferentes tecnologías de uso común para el tratamiento del ARD en países en desarrollo para una población equivalente determinada y en las mismas condiciones de eficiencia de reducción esperadas. Las diferencias están asociadas a los tiempos de retención hidráulica de los sistemas que definen los volúmenes de reactores requeridos en cada caso.



Fuente: CETESB (1990)

**Figura 1.** Comparación entre los tamaños aproximados de las áreas requeridas para diversas opciones de tratamiento de aguas residuales domésticas

En términos de la relación entre el costo de la tierra y la selección de la tecnología más favorable, Alaerts *et al.* (1993) encontró que si el primero es mayor de 8 US\$/m<sup>2</sup>, el sistema UASB seguido de cualquier alternativa de postratamiento resulta hasta 30 % más barato que el uso del proceso completamente aerobio. En términos de costos de inversión y operación, el sistema de lagunas es la solución más barata, si el costo del terreno no excede 12 US\$/m<sup>2</sup>. Por encima de ese valor, los sistemas combinados anaerobio-aerobio, como el compuesto de reactor anaerobio seguido de lagunas, son en lo financiero más atractivos (GTZ, 1997).

La tabla 3 muestra una comparación de costos de inversión y operación para diversos procesos de tratamiento, en la que se muestra que la configuración anaerobio-aerobio garantiza los mismos niveles de calidad de agua tratada, pero a costos menores que los de los sistemas convencionales de lodos activados.

La instalación de la planta de tratamiento de agua residual –PTAR– podrá crear impactos

ambientales como consecuencia de la generación de subproductos como residuos sólidos, arena, biogás y lodos; estos últimos son un aspecto de gran importancia para tener en cuenta, ya que su inadecuado tratamiento, manejo y disposición pueden generar problemas de aceptación de la PTAR por la comunidad y costos significativos. Una de las principales ventajas de los procesos anaerobios sobre los aerobios, en este aspecto, es la reducida tasa de producción de lodos, la cual puede ser entre tres y veinte veces menor que para los procesos aerobios (Rittman y Baskin, 1985).

Los países desarrollados y en desarrollo tienen diferentes percepciones en el nivel de importancia de los factores que determinan el tipo de tecnología de tratamiento de aguas residuales. En el caso latinoamericano, la tendencia en adopción de tecnologías es diferente en cada país, existiendo una división marcada entre las poblaciones de escasos recursos y de altos ingresos con respecto a los servicios de saneamiento y una alta diversidad económica, social y ambiental, tanto entre países como dentro de una misma nación (Reynolds, 2002).

**Tabla 3.** Costos de inversión y operación para diversos procesos de tratamiento

Procesos	Capacidad total de reducción de DBO (%)	Capacidad de reducción de SST (%)	Costo de inversión		Costo operación y mantenimiento (O&M)	
			US\$ / Habitante	Porcentaje de costo del lodo activado (%)	US\$ / Año / Habitante	Porcentaje de costo del lodo activado (%)
Lodo activado tradicional	80-90	80-90	80-100	100	4-5	100
Sistemas de lagunas tradicionales	70-90	70-90	20-40	25-40	0,2-0,4	5-8
Reactores UASB	60-80	70-80	20-40	25-40	1-1.5	25-30
Filtro anaerobio	70-80	70-80	10-25	15-25	0,8-1	15-20
Tratamiento primario avanzado	45-55	70-85	30-50	35-50	2-4	50-80
Humedales construidos	80-90	80-90	30-60	40-60	2-4	50-80
UASB - filtro anaerobio	90-95	80-95	5-30	6-30	1-1.5	25-30
UASB + Lodo activado	83-93	87-93	30-45	38-45	2,5-5,0	63-100
UASB + Filtro percolador de alta tasa	80-93	87-93	25-35	31-35	2,0-3,0	50-60

Fuente: Adaptado de Von Sperling y Chernicharo (2005) y Libhaber (2008)

Ejemplo de ello es la diferencia entre países como Chile y Brasil, ya que mientras en el primero se ha priorizado la implantación de lodos activados quizá por las condiciones climáticas más desfavorables comparadas con el resto de países de la región (Hidrosan, 2009), el segundo ha optado por los lodos activados en las grandes ciudades, aunque ha cobrado gran auge la utilización de sistemas anaerobios, en particular del UASB solo o combinado con sistemas como los filtros percoladores, contándose solamente en el Estado de Paraná con más de 1.000 PTAR con esta tecnología (Jordão e Além, 2004); además cuenta con la mayor PTAR con tecnología UASB del mundo, ubicada en la ciudad de Belo Horizonte, con un caudal de 700 L/s (Da Silva *et al.*, 2007).

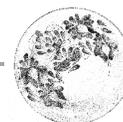
En general, un sistema de tratamiento que permita manejar el problema de la contaminación del agua debería, en lo posible, satisfacer requisitos como simplicidad en el diseño, uso de equipos o instalaciones no sofisticadas, bajo consumo de energía y alta eficiencia de tratamiento; sin embargo, no existe una solución milagrosa o perfecta que permita resolver cualquier tipo de problema de contaminación, pues cada uno presenta sus particularidades. De to-

dos modos, puede considerarse que toda tecnología es buena siempre y cuando se seleccione en forma cuidadosa y rigurosa y tenga en cuenta las implicaciones de la inevitable transferencia de contaminantes de un medio receptor a otro (Noyola, 1998).

#### 4. APLICACIONES DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Los sistemas anaerobios aplicados al tratamiento de ARD se han diseminado en el mundo entero y han encontrado una amplia aplicación en las regiones de clima tropical y subtropical, donde la temperatura es siempre mayor de 20 °C. En el intervalo de 12 a 20 °C existen diversas experiencias que demuestran que el proceso también es viable, pero deben determinarse condiciones óptimas de diseño y mayor control en el proceso (GTZ, 1997; Foresti, 2002; Kujawa-Roeleveld y Zeeman, 2006).

En la mayoría de los países de clima tropical y subtropical, y debido a las condiciones climáticas favorables, hay bastante interés, aparte de los



sistemas de lagunas de estabilización, en la utilización de tecnologías como la aplicación en el terreno de reactores anaerobios solos o combinados, como la configuración tanque séptico - filtro anaerobio y el reactor UASB o sus variaciones, que es el sistema anaerobio de mayor aplicación en el mundo. Esta configuración se usa sola o seguida de algún sistema de postratamiento; además sigue vigente la aplicación de sistemas de disposición de excretas *in situ*, como letrinas y tanques sépticos mejorados (Chernicharo, 2007).

A diferencia de los tanques sépticos y las lagunas anaerobias, el tiempo de retención hidráulica –TRH– del reactor UASB es mucho menor y la producción de malos olores puede ser controlada de manera más sencilla; además, presenta mayor eficiencia que el tanque séptico. Comparado con el filtro anaerobio, la ventaja es que no necesita relleño y, por tanto, no hay problemas de colmatación (Onofre, 1997).

La experiencia de dos países latinoamericanos debe ser destacada, la de Colombia y Brasil, que fueron los países pioneros en el mundo en la definición del potencial de aplicación de la tecnología anaerobia con reactores UASB para el tratamiento de ARD en condiciones de clima tropical: la primera planta piloto de 64 m<sup>3</sup> fue construida en Cali, Colombia en el año 1982 para tratar un ARD con características de agua residual diluida, habiéndose obtenido a una temperatura de 25 °C resultados satisfactorios, con eficiencias de reducción de DQO y DBO mayores de 75 % (Schellinkhout *et al.*, 1985; Lettinga *et al.*, 1987). Posteriormente se construyó la primera planta en escala real del país, la PTAR Vivero para una población equivalente de 20 mil habitantes (Sterling y Mora, 1998) y luego la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga –CDMB– (Schellinkhout *et al.*, 1985) construyó la planta de mayor escala del país con esta tecnología (población equivalente 300 mil habitantes) que en la actualidad reporta eficiencias

de reducción para DBO<sub>5</sub> del 73 % (Aparicio, 2008). En Brasil se destacan los estudios en escala piloto adelantados por Vieira y García (1992) en un reactor de 120 m<sup>3</sup> y Van Haandel y Lettinga (1994) en un reactor de 160 m<sup>3</sup>.

Estas experiencias fueron el referente mundial para la difusión e implementación de la tecnología UASB aplicada al tratamiento anaerobio de ARD, siendo Brasil, México y Colombia los países que han hecho mayor aplicación de la tecnología en América Latina. Otros países como Egipto, Islas Mauricio, China e India la han implantado a partir de los resultados latinoamericanos (Wiegant, 2001). A temperaturas mayores de 20 °C y TRH entre 6 y 10 horas, se han obtenido eficiencias de reducción de 65 a 80 % de DBO y DQO y de 67 a 90 % de SS (Wiegant, 2001; Foresti, 2002; van Haandel *et al.*, 2006). En 2006, van Haandel *et al.* desarrollaron, a partir de datos experimentales, expresiones empíricas para la reducción de DQO que confirman que el reactor UASB es uno de los más eficientes entre varias modalidades de tratamiento anaerobio, como se muestra en la tabla 4, con menores TRH requeridos para alcanzar la misma eficiencia, comparado con la laguna anaerobia y el filtro anaerobio y con valores similares al de un reactor de lecho expandido.

**Tabla 4.** Expresiones empíricas para la eficiencia de reducción de DQO (fracción) en función del TRH para diferentes tipos de reactores anaerobios

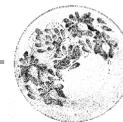
Tipo de Reactor	Expresión para la eficiencia de reducción de DQO (fracción)
Laguna anaerobia*	$E = 1 - 2,40(\text{TRH})^{-0,50}$
Filtro anaerobio	$E = 1 - 0,87(\text{TRH})^{-0,50}$
UASB	$E = 1 - 0,68(\text{TRH})^{-0,68}$
RALF	$E = 1 - 1,53(\text{TRH})^{-0,64}$
Lecho expandido	$E = 1 - 0,56(\text{TRH})^{-0,60}$

\* Eficiencia de reducción de DBO<sub>5</sub>.  
E: Eficiencia de reducción (fracción)  
RALF: UASB sin sedimentador interno

Fuente: van Haandel *et al.* (2006)

**Tabla 5.** Experiencias a escala piloto y real para el tratamiento anaerobio del ARD

PTAR	Inicio operación	T (°C)	Vol. (m³)	TRH (h)	COV (kgDQO/m³.d)	% Reducción			Autor
						DQO	DBO	SS	
Cañaveralejo (Cali, Colombia)	1982	25	64	6	-	75-86	80-90	-	Schellinkhout <i>et al.</i> , 1985; Lettinga <i>et al.</i> , 1987
Kampur (India)	1985	20-30	1.200	6	1,81	74	75	75	Draaijer <i>et al.</i> , 1992
São Paulo (Brasil)	1986		120	6,2	-	60	70	-	Vieira y García, 1992
La Rosita (Bucaramanga, Colombia)	1986-1987	23-26	34	5	1,98	66	80	71	Collazos, 1992
Pedregal (Campina Grande, Brasil)	1989		160	2,1-17	≤ 4,0	75	85	83	Van Haandel y Lettinga, 1994
Mirzapur (India)	1989	18-32	6.000	8	0,95	62-72	65-71	70-78	Haskoning, 1996 citado por Seghezzeo, 2004; Tare, Ahammed y Jawed, 1997
Tepeyanco-Atlamaxac (Tlaxcala, México)	1990	20	2.200	20,3	0,7		75-80		Monroy <i>et al.</i> , 2000
Río Frío (Bucaramanga, Colombia)	1991	23-26	13.200	5	0,6-4,0	65-70	73	60-65	Rodríguez, 1996; Aparicio, 2008
Fideicomiso Alto Río Blanco (México)	1992	22,5	83.700	18,6	3	80	-	-	Monroy <i>et al.</i> , 2000
Vivero (Cali, Colombia)	1994	24-30	1.000	6	0,41-1,35	67	71	79	Sterling y Mora, 1998
India			12.000	8	-	24-50	25-47	50-76	Tare, Ahammed y Jawed, 1997
Mangueira (Recife, (Brasil)	1997	30,8	810	9,4	-	75		51	Florenco <i>et al.</i> , 2001 citado por Seghezzeo, 2004
Restrepo (Valle del Cauca, Colombia)	1998	20	-	8,5	-	70-88	86-92	81-94	Rodríguez, Torres y Duque, 2011
Piracicamirim (Brasil)	2000		8.316	10-24	0,61-1,11	65	>80	72	Passig, Villela y Ferreira, 1999
Onça (Brasil)	2006		53.088			72	82	90	Da Silva <i>et al.</i> , 2007
Calima (Valle del Cauca, Colombia)	2007	20		8,5		67-83	87-94	71-94	Rodríguez, Torres y Duque, 2011
Riofrío (Valle del Cauca, Colombia)	2008	22		8,5		78-83	84-93	83-95	Rodríguez, Torres y Duque, 2011
-	-	-	67,5	20-40	0,65	72	81	81 (SSV)	Barijan, 1995, citado por Torres, 2000
Brasil	-	-	18	8	2,7	71-83	74-85	65-85	Villela, 1997
General	-	>20	Variable	6-10	<3	65-80	65-80	67-90	Torres y Foresti, 2001; Wiegant, 2001; Foresti, 2002; van Haandel <i>et al.</i> , 2006



En algunos casos, dependiendo de la disposición final del efluente y de la legislación local sobre su calidad mínima, los niveles de tratamiento que se alcanzan con la etapa anaerobia son suficientes; cuando esto no ocurre, un tratamiento posterior es necesario. Según van Haandel y Lettinga (1994), un análisis detallado de las posibilidades de acoplar los procesos de lodos activados convencionales (LAC) con reactores UASB mostró que el volumen de tanques en un sistema combinado anaerobio-aerobio puede ser 48 % del volumen de un sistema LAC; además el consumo de oxígeno y la producción de lodo son menores, ya que la mayor proporción de materia orgánica y sólidos se reduce en la fase anaerobia y el lodo aerobio puede ser digerido en el mismo reactor UASB.

Algunos de los tratamientos complementarios al tratamiento anaerobio más comunes son disposición en el suelo, lagunas de estabilización, filtros percoladores, lodos activados de flujo continuo o intermitente con estabilización del lodo aerobio en el reactor UASB (Torres, 2000; Foresti, 2002; van Haandel *et al.*, 2006; Chernicharo, 2007). Estos sistemas complementarios permiten reducción adicional de materia orgánica carbonácea y algunos también favorecen la reducción de nutrientes y de patógenos del efluente final.

En la tabla 5 se presentan algunas de las experiencias más conocidas en el mundo sobre la aplicación de sistemas para el tratamiento anaerobio de ARD, destacándose la gran diferencia entre escalas de aplicación, desde plantas piloto hasta PTAR para poblaciones equivalentes a un millón de habitantes. Adicionalmente, se observa que en los sistemas combinados gran parte de la materia orgánica y los sólidos son removidos en la unidad anaerobia, lo que representa beneficios técnicos, económicos y ambientales.

## 5. PERSPECTIVAS FUTURAS DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA ANAEROBIA EN LOS PAÍSES EN DESARROLLO

A continuación se presentan algunas consideraciones que, de acuerdo con las experiencias

propias y las reportadas por otros autores, hacen importante considerar la opción del empleo de tecnologías sostenibles como las anaerobias solas o combinadas con otras tecnologías para la realidad de estos países, pero además se muestran algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta para su implementación.

- A pesar de las condiciones ambientales favorables de los países en desarrollo en general, los cuales se encuentran en regiones de clima tropical y subtropical, existe baja cobertura de tratamiento debido, además de aspectos financieros, al desconocimiento o falta de reconocimiento de tecnologías alternativas de bajo costo y de los beneficios del reúso de aguas residuales tratadas (Mara, 2004).
- La mayoría de las PTAR de estos países no son eficientes debido a la falta de transferencia tecnológica que ha generado fallas en su diseño y construcción, deficiencias en el entendimiento de los procesos de tratamiento, inadecuada operación y mantenimiento, y aplicación de tecnologías no apropiadas a las condiciones sociales y económicas de la región, lo que origina una situación insostenible. Ejemplo de ello son los estudios reportados por autores como von Sperling y Oliveira (2008) y Rodríguez, Torres y Duque (2011).
- En este sentido, tal vez el país que más ha mejorado la capacidad de tratamiento de sus aguas residuales es Brasil el cual, a través de la organización gubernamental FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) del Ministerio de Ciencia y Tecnología, financió en varias etapas el “Programa de Saneamiento Básico para Brasil PROSAB”, que ha involucrado al sector académico de todo el país (universidades) para la ejecución de programas de investigación enfocados en aspectos como el mejoramiento de procesos relacionados con la temática de agua potable, aguas residuales, residuos sólidos y lodos (Jordão y Além, 2004). Apuestas de país como el PROSAB han permitido producir importante información técnica y criterios de

diseño para reactores anaerobios aplicables a la realidad brasilera y latinoamericana.

- A pesar del reconocimiento del potencial de la tecnología anaerobia, donde el reactor UASB es la unidad anaerobia de mayor aplicación para el tratamiento de ARD, son evidentes algunas limitaciones de esta configuración. De acuerdo con Foresti, Zaiat y Vallero (2006) y Chernicharo y Stuetz (2008), se han desarrollado diversas estrategias para optimizar la eficiencia del tratamiento en reactores anaerobios como el UASB, que comprenden desde el pretratamiento del agua residual para reducir la concentración de sólidos suspendidos hasta mejoras en el diseño.
- La situación presentada muestra que la aplicación de la tecnología anaerobia, antes de competir con los sistemas de tratamiento convencionales, los complementa, reduce costos y permite que se logren resultados mejores de los que se podría esperar con el uso de las tecnologías que trabajan de modo independiente.
- Así como es importante la construcción de PTAR, también lo son la selección de la tecnología adecuada, la evaluación y optimización de las PTAR existentes, la implementación y continuidad en los programas de aforo, muestreo y caracterización para verificar el desempeño de los sistemas de tratamiento, así como el entrenamiento y capacitación del personal encargado del manejo y mantenimiento, con el fin de optimizar los procesos.

## 6. CONCLUSIONES

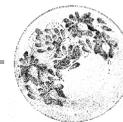
Se debe continuar fomentando el desarrollo y uso de tecnologías compatibles con las condiciones de los países en desarrollo. El serio problema de tratamiento de las aguas residuales en estos países podrá ser enfrentado de manera responsable y sostenible con la aplicación de tecnologías eficientes pero de bajo costo. La investigación tecnológica puede ser una parte importante del sector que permita identificar soluciones apropiadas.

No existe un sistema de tratamiento de aguas residuales que pueda ser recomendado como el mejor para todas las situaciones, pero se obtiene la más alta relación costo/beneficio (respetando el aspecto ambiental) cuando se selecciona con criterio un sistema que se adapta a las condiciones locales y a los objetivos que se desean alcanzar en cada caso. Por tal razón, es indispensable conocer y entender las diferentes opciones para seleccionar la más adecuada de acuerdo con los objetivos del tratamiento.

La aplicación de reactores UASB resulta una alternativa simple, asequible y manejable para el tratamiento de aguas residuales domésticas la cual, en términos de costos de inversión y operación, puede ser preferida sobre los sistemas aerobios e incluso en muchos casos también sobre los sistemas de lagunas. Las ventajas comparativas de los reactores UASB, como el no requerir las unidades de tratamiento primario y de espesamiento y digestión de lodos, además de la mínima exigencia de equipos mecánicos y de energía para aireación en las unidades de postratamiento aerobio, entre otros, garantizan la instalación de sistemas de tratamiento de aguas residuales más sostenibles sin comprometer la eficiencia.

El reactor de manto de lodos UASB y todos los reactores anaerobios pueden ser asociados a otras unidades de tratamiento para producir un efluente de mejor calidad y con costos menores. En el caso del tratamiento de las aguas residuales domésticas, los niveles de calidad alcanzados implican, en general, su complementación con otros procesos. La inclusión de una etapa de postratamiento simple a menudo es suficiente para garantizar la eficiencia esperada de acuerdo con los estándares impuestos para vertimiento o reúso.

Intentar aplicar tecnologías propias de países desarrollados de forma indiscriminada y sin estudiar la adaptación necesaria a una nueva realidad ha creado problemas notables, como el bajo nivel de saneamiento y del tratamiento de las aguas residuales. El compromiso de los técnicos y tomadores de decisión es entender más los procesos y alternativas

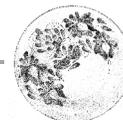


disponibles que sean adecuados a las condiciones locales, como es el caso de la tecnología anaerobia, que combinada con los reactores anaerobios, permite alcanzar las mismas o mayores eficiencias con menores costos, en comparación con el uso independiente de los sistemas de tratamiento aerobio convencionales.

## REFERENCIAS

- Alaerts, G. J.; Veenstra, S.; Bentvelsen, M. and van Duijl, L. A. (1993). "Feasibility of anaerobic sewage treatment in sanitation strategies in developing countries". *Water Science and Technology*, vol. 27, No. 1, pp. 179-186.
- Aparicio, C. *Experiencia exitosa de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Río Frío*. Seminario Interamericano sobre "Manejo de Vertimientos Líquidos para Contribuir a la Mitigación del Cambio Climático" Acodal. Cali, Colombia, 2008.
- Bratby, J. *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. London: IWA, 2006. 407 p.
- Chemicharo, C. A. L. *Anaerobic reactors*. Biological Wastewater Treatment Series. Vol. 4. London: IWA, 2007. 175 p.
- Chernicharo, C. A. L. and Stuetz, R. M. *Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: Management of gaseous emissions*. IX Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Isla de Pascua, Chile, 2008.
- Collazos, C. J. Tratamiento de aguas residuales domésticas en Bucaramanga (Colombia), mediante reactores UASB y lagunas facultativas. Segundo Taller Latinoamericano sobre Digestión Anaerobia en América Latina, La Habana, Cuba, 1992.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental -CETESB-. *Opções para tratamento de esgotos de pequenas comunidades*. Série Manuais. São Paulo, 1990. 36 p.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 2000. 776 p.
- Da Silva, L. C.; Chernicharo, C. A. L.; De Oliveira, J. M.; De Souza, O. J. e Rodrigues, J. *Avaliação de desempenho da pré-operação dos reatores UASB da ETE Onça: Capacidade instalada 2,05 m<sup>3</sup>/s*. 24<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- Draaijer, H.; Maas, J. A. W.; Schaapman, J. E. and Khan, A. (1992). "Performance of the 5 MLD UASB reactor for sewage treatment at Kanpur, India". *Water Science and Technology*, vol. 25, No. 7, pp. 123-133.
- El-Fadel, M.; Zeinati, M. and Jamali, D. (2000). "Water resources in Lebanon: Characterization, water balance, and constraints". *International Journal of Water Resources Development*, vol. 16, No. 4, pp. 615-638.
- Foresti, E. (2002). "Anaerobic treatment of domestic sewage: Established technologies and perspectives". *Water Science and Technology*, vol. 45, No. 10, pp.181-186.
- Foresti, E.; Zaiat, M. and Vallero, M. (2006). "Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges". *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 5, pp. 3-19.
- Gerardi, M. *Settleability problems and loss of solids in the activated sludge process*. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2002. 179 p.
- GTZ, Sectorial Project (1997). Anaerobic trends. IAWQ Conference Review, WQI, July/August. p. 31-33.
- Hidrosan (2009). *Experiencia del tratamiento de aguas residuales en Chile*. 52<sup>o</sup> Congreso Acodal. Desarrollo, Vulnerabilidad y Gestión del Sector Agua, Saneamiento y Ambiente (Santa Marta, Colombia).
- Jordão, E. y Além, P. (2004). *Investigación y experiencia con el postratamiento para reactores UASB en Brasil* [consultado el 20 de agosto de 2011]. 6 p. Disponible en: <<http://www.agualatinoamerica.com/docs/PDF/111204%20Nivel%.pdf>>.
- Jordão, E. e Pessôa, C. *Tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 683 p.
- Kujawa-Roeveld, K. and Zeeman, G. (2006). "Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 5, pp. 115-139.
- Lettinga, H.; De Man, A.; Grin, P. and Hulshoff Pol, L. W. (1987). "Anaerobic wastewater treatment as an appropriate technology for developing countries". *La Tribune du Cebedeau*, vol. 40, pp. 21-32.
- Li, C. and Fang, H. H. P. (2007). "Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes by mixed cultures". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, No. 1 (January), pp. 1-39.
- Libhaber, M. *Appropriate technology for wastewater treatment and reuse of effluents for irrigation*. Seminario In-

- teramericano sobre Manejo de Vertimientos Líquidos para Contribuir a la Mitigación del Cambio Climático. Acodal. Cali, Colombia, 2008. 32 p.
- Mara, D. *Domestic wastewater treatment in developing countries*. UK-USA: Earthscan, 2004. 293 p.
- Mara, D. y Cairncross, S. *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud –OMS–, 1990. 220 p.
- Mendonça, S. R. *Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Bogotá: McGraw-Hill, 2000. 370 p.
- Metcalfe and Eddy. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.
- Monroy, O.; Famá, G.; Meraz, M.; Montoya, L. and Macarie, H. (2000). "Anaerobic digestion for wastewater treatment in México: State of the technology". *Water Research*, vol. 34, No. 6, pp. 1803-1816.
- Noyola, A. (1998). "Anaerobio vs aerobio, un debate (casi) superado. Biológico vs primario avanzado, el nuevo debate?". *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, vol. 10, No. 34, pp. 10-14.
- Noyola, A. *Agua y saneamiento en América Latina: Los retos frente a los objetivos del milenio*. En: Quiroga, E.; Rojas, J.; Galvis, A.; Valencia, A.; Pérez, M.; Madera, C. y Álvarez, J. (eds.) *Saneamiento básico y ambiental en América Latina*. Cali, Colombia: CAF, 2007. p. 13-26.
- Onofre, C. *Sistemas simples para tratamiento de esgotos sanitários: Experiência brasileira*. Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. 299 p.
- Organización Panamericana de la Salud y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, OPS-IDRC. *Validación de lineamientos para formular políticas sobre gestión del agua residual doméstica en América Latina*. Perú, 2005. p. 14.
- Passig, F. H.; Villela, L. C. H. e Ferreira, O. P. (1999). *ETE Piracicamirim. Nova conceição de sistema de tratamento de esgotos sanitários – Partida, operação e monitoramento de desempenho*. Anals do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil. 8 p.
- Reynolds, K. A. (2002). *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica* [consultado el 10 de agosto de 2011]. Disponible en: <<http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/DeLaLaveSepOct02.pdf>>
- Rittman, B. E. and Baskin, D. E. (1985). *Theoretical and modeling aspects of anaerobic treatment of sewage*. Proceedings of the Seminar/Workshop on Anaerobic Treatment of Sewage. Switzenbaum MS (Amherst, USA). p. 55-94.
- Rodríguez, J. *Experiencias en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales domésticas*. IV Seminario-Taller Latinoamericano sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Bucaramanga, Colombia, 1996. 24 p.
- Rodríguez, J.; Torres, P. and Duque, A. (2011). "Evaluation of UASB reactor followed by trickling filter for domestic wastewater treatment in Valle del Cauca, Colombia". Ponencia en X Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Ouro Preto, Brasil (23-27 octubre), 8 p.
- Schellinkhout, A.; Lettinga, H.; Van Velsen, L. and Louwe, J. (1985). *The application of UASB reactor for the direct treatment of domestic wastewater under tropical conditions*. Proceedings of the Seminar/Workshop on Anaerobic Treatment of Sewage. Switzenbaum MS (Amherst, USA), pp. 259-276.
- Seghezzo, L. *Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions*. Trabajo de grado (Doctorado). The Netherlands: Wageningen University, 2004. 172 p.
- Sterling, C. E. y Mora, L. H. *Experiencias en el funcionamiento de la planta depuradora UASB Vivero Municipal durante los últimos cuatro años Cali- Colombia*. V Taller y Seminario Latinoamericano Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Viña del Mar, Chile, 1998).
- Tare, V.; Ahammed, M. and Jawed, M. (1997). *Biomethanation in domestic and industrial waste treatment: An Indian scenario*. Proceedings of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion. Sendai, Japan (25-29 May), vol. 2, 255-262 pp.
- Torres, P. *Tratamento de esgoto sanitário em sistema combinado anaeróbio-aeróbio (UASB-RSB)*. Teses de doutoramento (Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (São Carlos), 2000. 136 p.
- Torres, P. and Foresti, E. (2001). "Domestic sewage treatment in a pilot system composed of UASB and SBR reactors". *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 4, pp. 247-253.
- Troschinetz, A. and Mihelcic, J. (2009). "Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries". *Waste Management*, vol. 29, No. 2 (February), pp. 915-923.
- United Nations Environment Programme –UNEP–. (2009). *Global environment outlook (GEO) 3 Data Portal* [Consultado el 1 de octubre de 2011] Disponible en: <<http://geodata.grid.unep.ch/>>



- Van Haandel, A. *Trends in tertiary wastewater treatment*. En: Saneamiento básico y ambiental en América Latina. Cali, Colombia: Corporación Andina de Fomento / Universidad del Valle, 2007. pp. 50-63.
- Van Haandel, A. and Lettinga, G. *Anaerobic sewage treatment: A practical guide for regions with a hot climate*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1994. 226 p.
- Van Haandel, A.; Kato, M. T.; Cavalcanti, P. F. F. and Florencio, L. (2006). "Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 5, No. 1 (February), pp. 21-38.
- Van Haandel, A. and Van Der Lubbe, J. *Handbook biological waste water treatment: Design and optimisation of activated sludge systems*. Leidschendam, The Netherlands: Quist, 2007. 537 p.
- Vieira, S. M. M. and García Jr., A. D. (1992). "Sewage treatment by UASB reactor. Operation results and recommendations for design and utilization". *Water Science and Technology*, vol. 25, No. 7, pp. 143-157.
- Villela, L.C.H. *Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) protótipo: Desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas*. Tese de doutoramento (Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (São Carlos), 1997. 153 p.
- Von Sperling, M. (1996). "Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries". *Water Science and Technology*, vol. 33, No. 3, pp. 59-72.
- Von Sperling, M. and Chernicharo, C. A. L. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. London: IWA, 2005. 1452 p.
- Von Sperling, M and Oliveira, S. *Comparative performance evaluation of full-scale anaerobic and aerobic wastewater treatment processes in Brazil*. IX Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Isla de Pascua, Chile, 2008.
- Wiegant, W. M. *Anaerobic digestion for sustainable development*. Wageningen, The Netherlands, 2001. pp. 111-118.