

Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant

Luis Salazar-Larrota ^a, Ludwing Uribe-García ^a, Luisa Gómez-Torres ^b & Carlos Zafra-Mejía ^c

^a *Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia.*
luis.salazar@estudiantes.umb.edu.co; ludwing.uribe@estudiantes.umb.edu.co

^b *Grupo de Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles, Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia.*
luisa.gomez@docentes.umb.edu.co

^c *Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.* czafra@udistrital.edu.co

Received: February 09th, 2018. Received in revised form: November 10th, 2018. Accepted: December 5th, 2018.

Abstract

The UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactors efficiency of a municipal wastewater treatment plant (WWTP) was evaluated over a period of 9 years. The WWTP treated an average flow of 500 l/s, with removal efficiencies of biochemical oxygen demand (BOD₅), chemical oxygen demand (COD), and suspended solids (SS) of 66 %, 52 %, and 60 %, respectively. The biogas production reached 37541 m³/month (82.4 % of methane), with a sludge production of 334 m³/month. The hydraulic retention time was among 7 and 8 hours, typical interval of UASB systems for a temperature of 26 °C. Removal of nitrogen and phosphorous was not found. The efficiencies, and similar results in Indonesia and Latin America, served to conclude that anaerobic digestion was a promising process for the pretreatment of wastewater in tropical countries.

Keywords: water pollution; municipal wastewater; anaerobic treatment; UASB reactors.

Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales

Resumen

Se evaluó la eficiencia de los reactores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales durante un periodo de 9 años. La PTAR trató un caudal promedio de 500 l/s, con eficiencias de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos (SS) de 66 %, 52 % y 60 %, respectivamente. La producción de biogás alcanzó 37541 m³/mes (82.4% de metano), y con una producción de lodo de 334 m³/mes. El tiempo de retención hidráulico estuvo entre 7 y 8 horas, intervalo típico de sistemas UASB para una temperatura de 26 °C. No se encontró remoción de nitrógeno y fósforo. Las eficiencias, y resultados similares en Indonesia y América Latina, sirvieron para concluir que la digestión anaeróbica fue un proceso promisorio para el pretratamiento de aguas residuales en países tropicales.

Palabras clave: contaminación del agua; aguas residuales municipales; tratamiento anaeróbico; reactores UASB.

1. Introducción

En ciudades tropicales y países en desarrollo las condiciones socioeconómicas limitan el avance tecnológico de obras de saneamiento; los vertimientos directos de aguas residuales municipales a las corrientes urbanas son frecuentes

y presentan dificultad para su reducción y eliminación en el corto tiempo, generando consecuencias ambientales desfavorables para la calidad de vida y la salud pública urbana [1,2]. En América Latina y el Caribe menos del 10 % de las aguas residuales domésticas de la población recibe tratamiento previo antes de ser descargadas a un cuerpo de

agua superficial, o se usan para riego agrícola. Existen comunidades que por su ubicación geográfica toman para su abastecimiento aguas no aptas para su consumo [3], por lo que las aguas residuales tratadas representan un potencial de aprovechamiento principalmente en regiones con escasez de agua [4].

Las aguas residuales domésticas se caracterizan por su elevada concentración de partículas en suspensión, materia orgánica, nutrientes, compuestos antropogénicos y patógenos que pueden causar eutrofización con daños a la vida acuática y la calidad de las fuentes hídricas [5]. Las tecnologías existentes para el tratamiento de aguas residuales municipales son relativamente costosas y dificultan su adopción en las comunidades urbanas localizadas en zonas tropicales, en donde es evidente un avance constructivo menor al de otras regiones del mundo, con obras e inversiones ejecutadas que presentan problemas de operación y conllevan al cierre parcial o total de los procesos de tratamiento [3]. Sin embargo, los tratamientos biológicos de tipo anaerobio son una posibilidad económica y práctica que deben ser considerados para evaluar problemáticas de saneamiento hídrico [6].

Con la baja cobertura existente se requiere incrementar la construcción de sistemas de tratamiento, fundamentada en tecnologías sostenibles de bajo costo de inversión y operación que sean asimilables a la cultura y condiciones climáticas de cada región [7]. Los sistemas de tratamiento anaerobio tipo UASB se destacan dentro del grupo de procesos convencionales porque han evolucionado en cumplimiento de exigencias ambientales con importantes ventajas técnicas, económicas y sociales sobre otros sistemas de tratamiento anaerobio y aerobio. Los reactores UASB fueron desarrollados en la década de los 70's como parte del proceso evolutivo del tratamiento anaerobio y fundamentado en el flujo ascendente a través de un manto de lodos que permite separar agua, biogás y lodo en condiciones de alta turbulencia [8-10].

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales es un proceso biológico en ausencia de oxígeno, que busca la remoción de carga contaminante mediante un consorcio de microorganismos que realizan los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [7,11,12] de la materia orgánica presente; y la convierten en lodo y biogás compuesto por metano (CH_4) y dióxido de carbono CO_2 , y trazas de H_2 , N_2 , O_2 y gas sulfhídrico (H_2S) [1]. Los UASB pueden ser diseñados en forma rectangular, cuadrada o circular. Se han construido en concreto reforzado, fibra de vidrio y acero inoxidable, con ventajas y desventajas relacionadas con los costos de inversión inicial y de operación [10].

Estudios exhaustivos en todo el mundo sobre la aplicación de tratamientos anaerobios de aguas residuales muestran que el tipo más común de reactor diseñado es el UASB (supera el 60 %), usado principalmente para efluentes de alimentos, cervecerías, destilerías y aguas residuales domésticas. Japón lidera con plantas industriales, seguido de Alemania, Holanda, USA e India. En América Latina el sistema UASB tiene mayor uso para tratamiento de aguas residuales domésticas y se destaca el funcionamiento por más de 20 años de esta tecnología en Brasil, México y Colombia

[8]. Los resultados obtenidos en la implementación en estos países reportan eficiencias de reducción de DBO_5 , DQO y SS en rangos de 70 al 90 %, junto con bajos costos de inversión y operación en relación con los tratamientos de tipo aerobio [2].

Con los proyectos ejecutados a nivel piloto y plantas municipales se ha obtenido información valiosa sobre criterios de diseño, arranque y operación de reactores UASB, sin embargo, con los ajustes y las mejoras permanentes debe continuarse evaluando el comportamiento integral para consolidar parámetros y demostrar la factibilidad de su implementación en casos particulares [13].

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la eficiencia del proceso primario anaerobio de los cuatro reactores UASB de una PTAR colombiana durante un periodo de nueve años (2007 a 2015). Se tuvo en cuenta la eficiencia de remoción de la materia orgánica en relación a los parámetros de DQO, DBO_5 y SS. Adicionalmente, se estudiaron las condiciones de pH y temperatura, junto con los siguientes parámetros operativos de seguimiento: remoción de nitrógeno y fósforo, relación entre ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad, producción de lodos y biogás, y actividad metanogénica. Se analizaron también las variaciones dimensionales y de ajuste geométrico de los dos tipos de reactores UASB construidos, con su repercusión en los resultados de eficiencia y parámetros operativos de seguimiento.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del lugar de la investigación

La investigación se llevó a cabo en una PTAR colombiana: Río Frío, Bucaramanga; la cual funciona desde 1990 [14]. Está ubicada a 900 msnm, con una temperatura media que oscila entre 20 y 30 °C. Es la primera planta construida en Colombia, con procesos primarios y secundarios de tipo anaerobio para tratar el 30 % del agua residual doméstica generada por la población del área metropolitana de la ciudad.

Tabla 1.
Características de las etapas de tratamiento en la PTAR Río Frío.

Etapas de tratamiento	Estructura	Características
Preliminar	Cribado grueso	Rejilla con espacios de 5 cm
	Cribado fino	Rejilla con espacios de 6 mm
		Rejilla con espacios de 3 mm
	Desarenador	Número de unidades: 1 con 2 módulos
Primario	Reactores UASB	Número de unidades: 4 en paralelo
		Superficie: 40 m x 20 m/reactor
		Profundidad: 4.1 m
Secundario	Laguna Facultativa	Volumen 3300 m ³ /reactor
		Número de unidades: 2
		Superficie 2.7 ha/Laguna
		Profundidad 1.5 m a 2.0 m
		Volumen 42000 m ³ /Laguna
		Número de baffles divisorios: 3

Fuente: Los Autores.

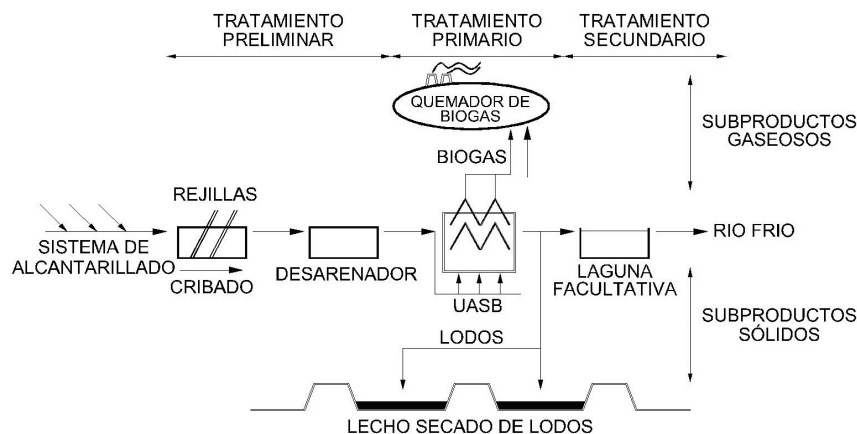


Figura 1. Esquema de procesos de la PTAR Río Frío.
Fuente: Los Autores.

Esta planta trata el drenaje sanitario urbano de los municipios de Bucaramanga (zona sur-10 %), Floridablanca (95 %) y Girón (1%), con una población equivalente cercana a los 325 mil habitantes para el año 2015 y una capacidad de servicio de 500 l/s, con proyección modular hasta un máximo crecimiento de 2000 l/s.

La Tabla 1 presenta las características de los componentes de cada etapa de tratamiento. La Fig. 1 muestra las fases de tratamiento que conforman la planta y la secuencia hidráulica de sus procesos. La PTAR Río Frío se ha construido por etapas y para el caso del tratamiento primario se tienen cuatro reactores UASB; los dos primeros módulos funcionan desde el año 1990, el tercero desde 1997, y el cuarto desde el año 2006.

2.2. Sistema de recolección de la información

Se evaluaron los cuatro reactores UASB que conformaron el tratamiento primario de la PTAR Río Frío mediante los registros operativos de seguimiento de los parámetros de caudal y calidad del agua tomados periódicamente en el afluente al sistema preliminar y en el efluente de cada uno de los UASB que funcionaron integralmente desde el año 2006. Se tuvo información individual de cada reactor a excepción del UASB 4 que tenía dos compartimientos internos simétricos que identificaremos como UASB 4N y 4S.

En la operación de la planta se llevaron registros horarios manuales de caudal sobre el canal de entrada antes del tratamiento preliminar en un punto calibrado para tal fin, y en una estructura de repartición de flujo, denominada Pozo P-2, afluente a los cuatro reactores UASB. Las caracterizaciones principales en la planta se realizaron en el afluente al sistema preliminar, el efluente de cada UASB y en el vertimiento final. La toma de muestras se realizó dos veces a la semana (miércoles y domingo) en una jornada de 24 horas y posteriormente se integraron para su evaluación en un laboratorio acreditado.

Para la investigación se utilizaron los registros de parámetros de DQO, DBO₅, SS, alcalinidad, AGV y temperatura. El pH se tomó cada seis horas en los puntos

anteriormente mencionados. También se tuvieron en cuenta los registros de los subproductos de lodo y biogás generados en los reactores UASB (tomados con medidores tipo ST-98) para el promedio mensual. A nivel de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y actividad metabólica se realizaron muestras mensuales procesadas en laboratorio externo.

Adicionalmente, se cuenta con la cromatografía de gases de los años 2009, 2010 y 2012 en una jornada de 24 horas en un día del año, con doce muestras tomadas cada dos horas, que analizó la composición del biogás total de los reactores UASB antes de su llegada a las cinco chimeneas o teas de quemado. Se tuvieron periodos mensuales sin registros, los cuales correspondieron a los tiempos requeridos para el mantenimiento y reparaciones de un UASB que sale de servicio o algún equipo que presentó problemas en la toma de muestras. Para la investigación se trabajó con la información procesada y consolidada de los promedios mensuales en una base de datos para el periodo comprendido entre 2007 y 2015.

2.3. Análisis de la información

Los parámetros medidos y los resultados de las caracterizaciones y registros operativos se organizaron en una base de datos histórica. Con esta información se evaluó el comportamiento individual de los cuatro reactores y el conjunto del sistema UASB en un tiempo representativo de 9 años.

Con los registros comparativos del afluente al sistema preliminar y el efluente de cada reactor UASB, se estimó la eficiencia de remoción alcanzada mensualmente y se integraron los datos para obtener el promedio mensual, anual y sus variaciones extremas (mínimos y máximos) de DQO, DBO₅ y SS. Se analizaron los resultados obtenidos mediante herramientas gráficas y estadísticas que permitieron obtener correlación entre parámetros, comparación con sistemas similares, legislación e identificación de las razones que justificaron variaciones particulares de los datos consolidados [15,16].

Se evaluaron parámetros operativos que tuvieron repercusión en el funcionamiento y en la eficiencia de los reactores UASB, siendo de importancia en los sistemas anaerobios la temperatura, pH, relación AGV/Alcalinidad, producción de lodos, actividad metanogénica y composición del biogás. Se verificó si existió variación o remoción de nitrógeno y fósforo en los reactores UASB.

Se revisaron y evaluaron las diferencias estructurales y geométricas de dimensionamiento de los dos tipos de reactores UASB construidos, la rutina de mantenimiento y agentes externos atípicos que generaron alteraciones en el funcionamiento óptimo del sistema de tratamiento de los sistemas anaerobios tipo UASB. Los resultados fueron comparados con sistemas similares, variables de diseño, y normatividad y legislación de referencia.

3. Resultados y discusión

La Tabla 2 presenta los parámetros promedio operativos del sistema afluente a la PTAR Río Frío y del efluente de los cuatro reactores UASB del sistema de tratamiento anaerobio de tipo primario. Adicionalmente, también presenta los caudales aportantes, correspondientes al sistema de alcantarillado del sector sur de la ciudad de Bucaramanga y la totalidad de la zona urbana de Floridablanca; cuya composición es consistente con las características de aguas residuales de tipo doméstico de clase moderada a concentrada [13]. Existieron variaciones normales de los registros de entrada a la planta entre el caudal medio diario, máximo horario y otros aportes menores de tipo industrial y conexiones erradas pluviales conectadas a la red.

El caudal medio de tratamiento osciló entre 400 y 500 l/s y se identificaron caudales de trabajo de cada reactor UASB entre 120 a 130 l/s. El rango mesofílico de temperatura de la zona en donde se localizó la planta y de todas las etapas del sistema de tratamiento estuvo entre 22 y 31 °C, que junto al pH (extremos entre 6.0 y 8.0) permitieron condiciones de estabilidad para las bacterias metanogénicas y un ambiente reductor favorable para los procesos anaerobios [13,17].

3.1. Eficiencia del sistema UASB

Una vez consolidados los registros de las diferentes variables, se encontró mediante la prueba de coeficiente de correlación de Pearson que la DQO presentó la mejor correlación (entre media y fuerte) tanto en las condiciones del afluente a la PTAR ($r = 0.83$, p -valor < 0.05 , DBO_5 ; y $r = 0.48$, p -valor < 0.05 , SS), como en el efluente ($r = 0.83$, p -valor < 0.05 , DBO_5 ; y $r = 0.86$, p -valor < 0.05 , SS) de los UASB; ratificándose en este estudio como la variable representativa de los tratamientos anaerobios. Investigaciones en sistema de tratamiento anaerobio también han reportado resultados similares [19].

Los resultados de la eficiencia media de los parámetros de DQO, DBO_5 y SS se encontraron en el límite inferior de los rangos exigidos en documentos normativos [18] y de recomendaciones de diseño [19] para aguas residuales domésticas de baja carga orgánica: DQO entre 60 y 70 %, DBO_5 entre 60 y 80 %, y SS entre 60 y 70 %; y por debajo de los reportados en reactores usados para el tratamiento de aguas residuales de tipo industrial [2,17,20,21]; cuyas eficiencias tendieron a ser mayores en relación a las eficiencias en aguas residuales de tipo doméstico.

Tabla 2.
Valores promedio operativos anuales - Afluente a PTAR Río Frío y reactores UASB 1 a 4.

Parámetro	Unidad	Afluente PTAR	UASB					Promedio UASB
			1	2	3	4N	4S	
Caudal	m ³ /mes	1230167	342.3	310.2	310.2	133.7	133.7	
	l/s	475	132	120	120	52	52	
DQO	mg/l	766	367	356	327	396	395	
	Eficiencia (%)		52	53	57	48	48	52
DBO_5	mg/l	374	128	119	111	138	137	
	Eficiencia (%)		66	68	71	63	64	66
DQO/DBO_5		2.0	2.9	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9
SS	mg/l	328	134	129	106	142	142	
	Eficiencia (%)		59	61	67	57	57	60
Temperatura	°C	26	26	26	26	26	26	26
pH		7.7	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Nitrógeno Kjeldahl Total	mg/l	62.5	62.6	64.0	58.0	63.8	63.3	62.4
Fósforo Total	mg/l	10.2	10.1	10.5	9.7	10.3	10.3	10.2
AGV/Alcalinidad			0.24	0.22	0.23	0.22	0.22	0.22
Lodos	m ³ /mes		418	498	506	125	157	334
Biogás	m ³ /mes		41200	33954	44995	24933	DNR	37541
Actividad Metanogénica	gDQO/gSSV-d		0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12

Fuente: Los Autores.

Esta tendencia de comportamiento de trabajo de los UASB se evidenció en algunos periodos mensuales con las concentraciones máximas del afluente a la planta, 990 mg/l de DQO, 483 mg/l de DBO₅, y 459 mg/l de SS; que permitieron evaluar las mejores eficiencias mensuales de los reactores UASB: 69 % (DQO), 80 % (DBO₅) y 77 % (SS).

Adicionalmente, el lodo tuvo la capacidad de adaptación a las variaciones frecuentes del sistema para asimilar altas cargas sin alterar la actividad microbiológica; en situaciones cuyos caudales a tratar tuvieron características superiores de carga a las condiciones medias de las aguas residuales domésticas que manejó esta planta municipal.

Con las exigencias normativas de control de vertimientos de aguas residuales domesticas en Colombia, DQO entre 150 y 180 mg/l, DBO₅ entre 70 y 90 mg/l, y SS entre 70 y 90 mg/l [18], y ante la limitación en la remoción restante de materia orgánica (patógenos) y nutrientes que no permitiría alcanzar los valores límites al utilizar únicamente reactores anaerobios tipo UASB, se justificó implementar una fase posterior de tratamiento [22,23]. En el caso de la PTAR se encuentran posteriormente dos lagunas facultativas. La relación DQO/DBO₅ con rangos entre 2.0 y 3.0 mostró que el agua residual es apta para ser depurada a través de tratamiento biológico [24] y debido a esto se alcanzaron eficiencias superiores al 80 % para DBO₅ y SS.

Los reactores UASB tuvieron una alta capacidad de asimilar variaciones de concentración, pero la eficiencia en la remoción de la materia orgánica se pudo alterar por razones de tipo microbiológico y de operación, dado que el ambiente varió continuamente en el paso del fluido por el reactor, de modo que la población microbiológica se vio obligada a realizar continuas readaptaciones [13]. Esta situación se presentó en el año 2009 por problemas operativos de seguimiento y control durante varios meses, producto de actividades puntuales de reparación con una inadecuada manipulación de insumos tóxicos que erróneamente se introdujeron en los UASB 1 a 4 durante los trabajos en las cubiertas de los reactores. Esto probablemente afectó de manera significativa la digestión anaerobia y, por

consecuente, disminuyó la eficiencia a lo largo de dicho año. Según reportes operativos, posteriormente se realizó la purga de los lodos y cambio de lodo anaeróbico que volvió a elevar los niveles de eficiencia a condiciones normales en los años siguientes.

La Tabla 3 presenta el comportamiento de las eficiencias de los parámetros principales de calidad del agua de cada uno de los 4 reactores UASB a lo largo de los 9 años de registros mensuales analizados.

3.2. Seguimiento operativo a otros componentes

Los resultados comparativos de las caracterizaciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el afluente a la planta y el efluente de los UASB (Tabla 2), permitieron ratificar que este tipo de sistemas anaerobios no hicieron remoción de estos compuestos y fue necesaria una fase posterior de tratamiento para su reducción [1]. La legislación colombiana aplicable en el periodo de operación de la planta no exigía límites de control para estos compuestos, no obstante, la nueva legislación estableció su análisis y reporte [22].

La relación entre AGV/Alcalinidad (rangos entre 0.02 y 0.40) permitió establecer que se tuvo estabilidad en el proceso anaerobio, indicando un equilibrio entre la acidogénesis y metanogénesis al interior del reactor [13,15]. Las cromatografías de tres años (2009, 2010 y 2012) tomadas en la red de conducción de biogás antes de las teas de quemado (Tabla 4), permitió establecer que el biogás producido en los reactores UASB estuvo compuesto por metano-CH₄ (82.6%), nitrógeno-N₂ (8.6%), dióxido de carbono-CO₂ (8.0%), oxígeno-O₂ (0.6%) y sulfuro de hidrógeno-H₂S (0.2%). La legislación vigente sobre calidad del aire también estableció controles por olor ofensivo asociado al H₂S. Los valores extremos registrados de H₂S en la conducción al efluente de los UASB y antes del quemado del biogás (entre 0.03 % a 0.5 %) estuvieron por debajo del umbral del nivel máximo permisible establecido; de superarse estos valores, se podría implementar un plan de reducción acordado con la autoridad ambiental [25].

Tabla 3.
Eficiencias de remoción promedio (%) de DQO, DBO₅ y SS en los reactores UASB.

Año	UASB1			UASB2			UASB3			UASB4 N			UASB4 S		
	DQO	DBO ₅	SS	DQO	DBO ₅	SS	DQO	DBO ₅	SS	DQO	DBO ₅	SS	DQO	DBO ₅	SS
2007	54	69	63	55	67	63	56	71	68	57%	72%	70%	56%	72%	72%
2008	57	72	64	57	71	63	57	72	64	51%	67%	57%	49%	65%	54%
2009	41	55	46	DNR	DNR	DNR	48	60	54	25%	31%	39%	24%	30%	36%
2010	47	63	50	DNR	DNR	DNR	54	70	60	46%	60%	54%	43%	58%	47%
2011	57	69	68	60	74	71	62	74	76	50%	68%	53%	53%	71%	60%
2012	49	67	52	48	66	50	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR
2013	53	67	65	50	65	61	57	73	72	47%	66%	58%	50%	69%	62%
2014	54	67	62	52	64	58	59	72	72	52%	68%	60%	54%	68%	61%
2015	55	67	62	53	65	58	62	71	72	55%	68%	61%	54%	68%	60%

DNR: Datos No Reportados.

Fuente: Los Autores.

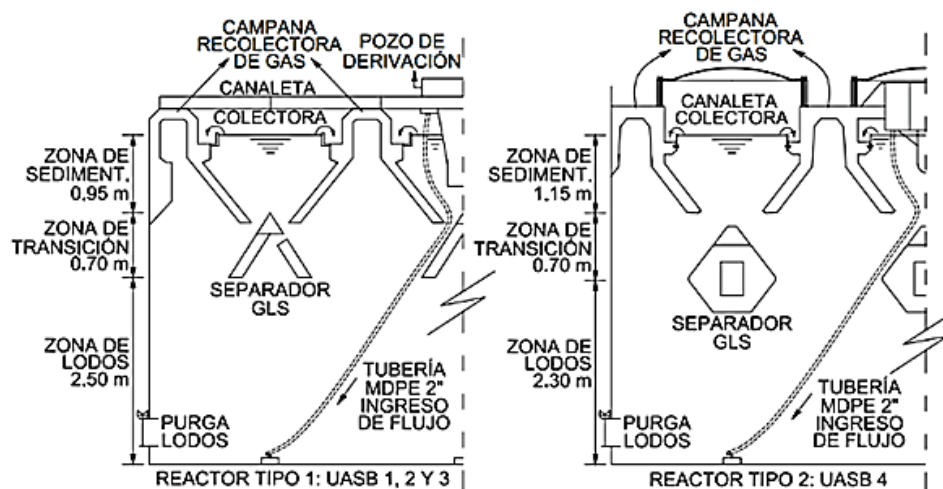


Figura 2. Sección típica de los reactores UASB tipo 1 y tipo 2.
Fuente: Los Autores.

Tabla 4.
Composición del biogás generado en la PTAR Río Frío.

Componente	Variación	% Molar			Promedio
		Año de Análisis			
		2009	2010	2012	
Metano CH ₄	Promedio	84.4	80.3	83.1	82.6
	Mínimo	82.3	78.7	81.5	80.8
	Máximo	86.2	81.2	85.3	84.2
Oxígeno O ₂	Promedio	0.45	0.67	0.54	0.55
	Mínimo	0.31	0.50	0.44	0.42
	Máximo	0.63	1.04	0.64	0.77
Nitrógeno N ₂	Promedio	6.56	11.29	7.85	8.57
	Mínimo	4.35	10.35	4.61	6.44
	Máximo	9.04	12.91	10.10	10.68
Dióxido de Carbono CO ₂	Promedio	8.11	7.66	8.21	7.99
	Mínimo	7.56	7.33	7.53	7.47
	Máximo	9.04	7.89	9.17	8.70
Sulfuro de Hidrógeno H ₂ S	Promedio	0.52	0.04	0.05	0.20
	Mínimo	0.48	0.03	0.03	0.18
	Máximo	0.56	0.05	0.08	0.23
Q Tratado (l/s)	Promedio	DNR	698	331	514
	Mínimo	DNR	614	0	307
	Máximo	DNR	808	448	628
Flujo de Biogás (m ³ /h)	Promedio	DNR	188.3	200.5	194.4
	Mínimo	DNR	183.1	149.5	166.3
	Máximo	DNR	193.0	253.9	223.5

Fuente: Los Autores.

En la actualidad el biogás se quema en una chimenea artesanal y se proyecta la posibilidad de uso futuro como generador de energía para apoyar la fase secundaria de la PTAR Río Frío, que cambiará las lagunas facultativas por un sistema aerobio de lodos activados. A pesar de tener un sistema integral de captura, transporte y quemado de biogás, se observan fugas menores de biogás que generan incomodidad en el entorno industrial y residencial de la planta, por lo cual se toman medidas de mejora para la mitigación de olores ofensivos debido al H₂S (p.ej. cercas vivas).

Con los datos integrados de caudales y dimensiones volumétricas de los UASB, como complemento de la investigación para establecer el comportamiento y

calibración de parámetros hidráulicos y de diseño, se calculó el tiempo de retención hidráulico-TRH (Θ). Este varió entre 6.9 y 8.9 horas (7.8 h promedio), encontrándose dentro de los rangos de diseño reportados por la literatura (7 a 9 h de 22 a 26°C) [19], y siendo mayor a las 6 h; tiempo recomendado por la normatividad colombiana. En otras evaluaciones desarrolladas en los primeros años de puesta en funcionamiento de la PTAR Río Frío se obtuvieron TRH de 6 h [26]. En este estudio, la velocidad ascensional media fue de 0.5 m/h y la carga volumétrica de 1.2 m³/m²*d. En general, estos resultados se mantienen dentro de los rangos recomendados de diseño [20].

3.3. Dimensionamiento de los UASB e influencia en la eficiencia

Las razones probables de la diferencia en la eficiencia de remoción de materia orgánica entre los cuatro reactores UASB, posiblemente estuvieron asociadas con las diferencias en estructura, geometría y operatividad de éstos. En la Fig. 2 se presenta un corte general de los dos tipos de reactores con sus características particulares.

Los dos tipos de reactores UASB en estudio cumplieron con las recomendaciones normativas y de diseño hidráulico. Sin embargo, el reactor tipo 1 (usado en los UASB 1, 2 y 3) presentó mayor altura en la zona de lodos, facilitando la velocidad ascensional del flujo y reduciendo el tiempo de retención hidráulica-TRH (Θ). Los reactores tipo 1 tuvieron una eficiencia media en DQO mayor al reactor tipo 2. La campana inferior del reactor tipo 1 (separador de gas-líquido-sólido-GLS) probablemente permitió una mejor captura del biogás, pero su estructura estuvo más expuesta al ataque corrosivo por parte del H₂S, siendo pertinente usar materiales menos vulnerables que el concreto reforzado. Aunque el reactor tipo 2 usado en el UASB 4 en sus dos compartimientos internos fue más hermético, la abertura en la parte superior requerida para actividades de limpieza lo expuso posiblemente a fugas del biogás. Este reactor tipo 2 fue dividido en dos módulos simétricos (UASB 4N y 4S), que le otorgaron posiblemente una ventaja funcional y operativa

de mantenimiento independiente, aprovechando el 50 % de la capacidad instalada que no tuvo el reactor tipo 1. Un aspecto operativo que probablemente influyó en los resultados de variación de las eficiencias fueron las paradas o cortes de servicio por mantenimiento total del reactor, los cuales para el arranque usaron lodo inóculo de otro reactor y requirieron entre 2 y 3 meses para su estabilización.

4. Conclusiones

En este estudio, los resultados muestran que las eficiencias de remoción de materia orgánica de los UASB son 52 % para DQO, 66 % para DBO₅ y 60 % para SS. Se observa que como sistema único no es posible alcanzar los límites normativos colombianos para DQO (60 a 80 %), DBO₅ (65 a 80 %) y SS (60 a 70%). Las menores eficiencias de remoción observadas durante el año 2009 están entre 24-25 % para DQO, 30-31 % para DBO₅ y entre 36-39 % para SS. Estas eficiencias son observadas en el reactor UASB4 y se observan durante periodos de arranque. Las mayores eficiencias de remoción se observan durante el año 2011, cuando los caudales a tratar tienen concentraciones superiores (766 mg/l de DQO, 374 mg/l de DBO₅ y 328 mg/l de SS) en relación al comportamiento promedio de los parámetros de calidad del agua considerados.

El reactor anaerobio tipo 1 conformado por los UASB 1, 2 y 3, presenta mejores resultados de eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos en suspensión (54 %-DQO, 68 %-DBO₅ y 62 %-SS) en relación al reactor tipo 2 del UASB4 (48 %-DQO, 63.5 %-DBO₅ y 57 %-SS). Factores como el caudal tratado y su TRH (Θ), la menor altura de la zona de lodos, la estructura y geometría de la zona de transición gas-líquido-sólido (GLS), junto con los elementos de los canales de salida en la zona de sedimentación probablemente pueden estar influyendo en esta diferencia de remoción de materia orgánica y sólidos en suspensión.

A pesar de que los cuatro reactores UASB tienen un volumen de servicio similar (3300 m³), los registros muestran que no existe una distribución uniforme de caudales; enviando un mayor caudal de tratamiento hacia los reactores UASB tipo 1 (entre 120-130 l/s) en relación a los reactores UASB tipo 2 (entre 100-110 l/s). Esto lleva a tiempos de retención hidráulica-TRH (Θ) entre 6.9-7.7 h en el primer caso y de 8.9 h en el segundo. La mayor eficiencia observada en los reactores UASB 3 se obtuvo con un TRH de 7.7 h, valor superior a las 6 h recomendadas en documentos normativos, de diseño y otras investigaciones similares para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico.

Finalmente, este estudio se constituye en un punto de referencia para las empresas de servicios públicos y diseñadores en escenarios de tratamiento anaerobio de aguas residuales mediante la tecnología de reactores UASB.

Agradecimientos

A la Empresa Pública de alcantarillado de Santander-EMPAS S.A. E.S.P. por la información suministrada y el apoyo permanente a lo largo de la investigación, especialmente a los profesionales Ruth Islena Ardila y Sergio Paredes.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- [1] Seghezze, L., Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions, PhD Thesis, Environmental Sciences, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2004.
- [2] Torres, P., Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA, 9(8), pp. 115-129, 2012.
- [3] León-Suematsu, G. y Moscoso-Cavallini, J., Curso de tratamiento y uso de aguas residuales. Lima, OPS/CEPIS, 1996, 151 P.
- [4] El-Fadel, M., Zeinati, M. and Jamali, D., Water resources in Lebanon: characterization, water balance and constraints. International Journal of Water Resource Development. 16(4), pp. 615-38, 2000. DOI: 10.1080/713672540
- [5] Rodríguez-Gómez, R., Upflow anaerobic sludge blanket reactor: modelling, Lic. Thesis, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2011.
- [6] Bermúdez, R.C., Rodríguez, S., Martínez, M de la C. y Terry, A.I. Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Tecnología Química, 23(2), pp. 37-44, 2003.
- [7] Gandarillas, V., Saavedra, O., Escalera, R. y Montoya, R., Revisión de las experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante reactores UASB en Cochabamba-Bolivia comparadas con las de Latinoamérica, India y Europa. Investigación & Desarrollo, 1(17), pp. 83-98, 2017. DOI: 10.23881/idupbo.017.1-71
- [8] Karthikeyan, K. and Kandasamy, J., Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor in wastewater treatment, in: Vigneswaran, S., Encyclopedia of life support systems: water sciences, Engineering and Technology Resources, II, Oxford, United Kingdom: EOLSS Publishers Co. Ltd.; 2009, pp.180-198.
- [9] Lettinga, G., Van Velsen, A., Hobma, S.W., De Zeeuw, W. and Klapwijk, A., Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22(4), pp. 699-734, 1980. DOI: 10.1002/bit.260220402
- [10] Van Haandel A.C. and Lettinga, G., Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate, Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons, 1994, 190 P.
- [11] Ruggeri, B., Tommasi, T. and Sanfilippo, S., Ecological mechanisms of dark H₂ production by a mixed microbial community, in BioH₂ & BioCH₄ through anaerobic digestion: from research to full-scale applications, Springer London, London, 2015, pp. 1-24. DOI: /10.1007/978-1-4471-6431-9_1
- [12] Stronach, S.M., Rudd, T. and Lester, J.N., The biochemistry of anaerobic digestion, in: Stronach, S. and Rudd, T., Lester, J.N., Eds., Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment, Heidelberg Springer, Berlin, 1986, pp. 1-20. DOI: 10.1007/978-3-642-71215-9_1
- [13] Orozco-Jaramillo, A., Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño, 2^a Ed., Acodal, Bogotá, Colombia, 2014, 407 P.
- [14] Schellinkhout, A. and Collazos, C.J., Full-scale application of the UASB technology for sewage treatment. Water science and technology, 25(7), pp.159-166, 1992.
- [15] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, Resolución 635 de 2015. [en línea]. [Consultado: 4 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=64489>
- [16] Ministerio de Agricultura. Usos del agua y residuos líquidos, Decreto 1594 de 1984, [en línea]. [Consultado: 4 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=18617>

- [17] Pérez, J., Aldana, G., Useche, M., Rincón, N., Bracho, N. y Mesa, J., Evaluación del modelo de dispersión axial de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) a escala de laboratorio. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 33(3), pp.213-223, 2010.
- [18] Ministerio de Desarrollo Económico. Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, RAS, Resolución 1096 de 2000. [en línea]. [Consultado: 4 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-agua/reglamento-tecnico-del-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable>
- [19] Romero-Rojas, J.A., Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño, 3ra. edición, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Colombia, 2004.
- [20] Caldera, Y.A., Madueño, P.I., Griborio, A.G., Gutiérrez, E.C. y Fernández, N.M., Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos. *Multiciencias* [en línea]. 3(1), 2003. [Fecha de consulta: 22 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90430105>
- [21] Rincón, N., Cabrera, I., Fernández, N., Chacín, E. y Díaz, A., Tratamiento anaerobio de proteína mediante un reactor UASB. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 23(2), pp. 141-149, 2000.
- [22] Cervantes-Zepeda, A.I., Cruz-Colín, M.R., Aguilar-Corona, R., Castilla-Hernández, P. y Meraz-Rodríguez, M., Caracterización físico-química y microbiológica del agua tratada en un reactor UASB escala piloto. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), pp. 67-77, 2010.
- [23] Morgan-Sagastume, F., Morgan-Sagastume, J.M. y Noyola-Robles, A., Aplicabilidad de la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales municipales, en Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), pp. 1-8, 1996.
- [24] Cisterna, P. y Peña, D., Determinación de la relación DQO/DBO₅ en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región, [en línea]. pp. 1-19, 2010 [Consulta: 4 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-l2.pdf>
- [25] Terry-Brown, A., Fernández-Boizán, M. y Zenia-Almeida, D., Consideraciones generales para el desarrollo de una estrategia de granulación en reactores UASB. *Tecnología Química*, 28(1), pp. 70-79, 2008.
- [26] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones, Resolución 1541 de 2013. [en línea]. [Consulta 4 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://diario-oficial.vlex.com.co/vid/permisibles-generan-olores-ofensivos-476637678>
- [27] Collazos-Chávez, C.J. y Cala, J., PTAR "Río Frío" exitosa aplicación de la tecnología UASB, a escala real, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en Bucaramanga (Colombia). En: Segundo Taller Regional Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en América Latina. La Habana. Cuba, pp. 1-1, 1992.
- Sostenibles, SYRAS, de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia y se desempeña como docente en la Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental de la Universidad Manuela Beltrán.
ORCID: 0000-0002-4700-5939
- C.A. Zafra-Mejía, es Dr. en Ingeniería Ambiental, 2012, de las Universidades de Cantabria y El País Vasco, España. Es profesor titular de Ingeniería Ambiental en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. En la actualidad pertenece a los grupos de Investigación en Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles (SYRAS) de la Universidad Manuela Beltrán, Colombia y de Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia; y se desempeña como docente invitado de la Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental de la Universidad Manuela Beltrán.
ORCID: 0000-0002-4061-4897



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

L.C. Salazar-Larrota, es Esp.en Aguas y Saneamiento Ambiental, 2017, de la Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, Colombia. En la actualidad se desempeña como consultor en proyectos de alcantarillado y saneamiento básico.

ORCID: 0000-0002-5050-8262

L. Uribe-García, es Esp. en Aguas y Saneamiento Ambiental, 2017, de la Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, Colombia. En la actualidad presta asesoría en recursos hídricos y planificación de desarrollo territorial sostenible en el Área Metropolitana de Bucaramanga, y en proyectos de agua y saneamiento. Bogotá, Colombia.

ORCID: 0000-0003-4400-6722

L.M. Gómez-Torres, es Dra. en Ingeniería Química, 2015, de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. En la actualidad pertenece al grupo de investigación Sistemas y Recursos Ambientales