

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

EXPERIENCES REVIEW IN DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT THROUGH UASB REACTORS IN COCHABAMBA-BOLIVIA COMPARED TO LATIN AMERICA, INDIA AND EUROPE

Vanessa Gandarillas R.^{a,c}, Oliver Saavedra^a, Ramiro Escalera^b y Renato Montoya^c

^aCentro de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Privada Boliviana

^bCentro de Investigaciones en Procesos Industriales, Universidad Privada Boliviana

^cFundación Agua Tuya, Cochabamba, Bolivia

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 08 de mayo 2017, aceptado para publicación el 16 de junio 2017)

RESUMEN

El proceso de tratamiento anaeróbico es cada vez más reconocido como opción viable para la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos y representa, combinado con otros métodos adecuados, un sistema de tratamiento de aguas residuales sostenible y apropiado para los países en vías de desarrollo. El tratamiento anaeróbico de aguas residuales se está utilizando con éxito en los países tropicales desde la década de los 80, y con resultados alentadores en las regiones subtropicales y templadas. En este estudio se revisan las principales características del tratamiento de aguas residuales domésticas, con énfasis en el Reactor Anaeróbico de Mantos de Lodos de Flujo Ascendente (RALF) o Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB de su sigla en inglés). Se revisaron las aplicaciones del proceso UASB en Europa, Asia y las Américas. En Latino América y en particular en Bolivia el uso de esta tecnología ha incrementado considerablemente debido a la pequeña demanda de terreno requerida para su implementación y a sus atractivos costos de inversión y operación. La revisión mostró, en base a la experiencia de operación de distintas plantas de tratamiento ubicadas en los valles de Cochabamba, que los reactores anaerobios de mantos de lodos de flujo ascendente apropiadamente diseñados, son adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en las regiones de los valles y llanos de Bolivia debido a que presentan condiciones ambientales que hacen que el uso de esta biotecnología anaerobia sea favorable bajo la perspectiva del desarrollo sostenible.

Palabras clave: Digestión Anaeróbica, Agua Residual Doméstica, UASB, Tecnologías en Plantas de Tratamiento.

ABSTRACT

The anaerobic treatment process is increasingly recognized as the basic method of advanced technology for the protection of the environment and the conservation of resources and, together with other appropriate methods, represents a sustainable and appropriate wastewater treatment system for developing countries. Anaerobic wastewater treatment has been successfully implemented in tropical countries since the 1980s, with encouraging results in subtropical and temperate regions. This paper reviews the main characteristics of domestic wastewater treatment, with special emphasis on the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). It reviews the application of the UASB process to the direct treatment of domestic wastewater, with examples from Europe, Asia and the Americas. In Latin America and Bolivia in particular, the use of this technology has increased considerably due to the small requirement of emplacement area and its attractive investment and operating costs. The review showed, based on the operating experience of different treatment plants located in the valleys of Cochabamba, that properly designed anaerobic upflow sludge blanket reactors are suitable for the treatment of domestic wastewater in the regions of valleys and plains of Bolivia because they present environmental conditions that make the use of this anaerobic biotechnology favorable from the perspective of sustainable development.

Keywords: Anaerobic Digestion, Domestic Wastewater Treatment, UASB, Water Treatment Technologies.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas construidos, para el tratamiento de aguas residuales domésticas son usualmente costosos y pueden fallar a corto plazo, especialmente en países en desarrollo donde no hay capital para la operación y mantenimiento de equipos [1]. A esto se suman las limitaciones en la elección de sistemas de tratamiento, ocasionadas

por los incrementos de costos y disponibilidad de terrenos como producto del crecimiento de la mancha urbana. En ese sentido, existe una gran necesidad de desarrollar tecnologías adecuadas que traten las aguas residuales domésticas en regiones tropicales [1].

El tratamiento de aguas residuales domésticas mediante el Reactor Anaeróbico de Mantos de Lodos de Flujo Ascendente (RALF) o UASB (de su sigla en inglés) presenta ventajas, que lo hace un proceso competitivo, tanto tecnológicamente como económicamente frente a otros procesos convencionales [1,2]. A escala industrial es el reactor anaeróbico más utilizado. Hace ya más de dos décadas, en un estudio mundial de instalaciones de tratamiento, los reactores UASB constituyeron 739 (64,5 %) de las 1229 unidades de tratamiento anaeróbico [3]. Japón, Alemania, Holanda, Estados Unidos e India eran los países líderes con 162, 115, 92, 83 y 79 instalaciones de tratamiento anaeróbico, respectivamente [3].

Las ventajas en la operación y mantenimiento de un reactor UASB lo hacen altamente atractivo ya que sus costos requieren menos del 1% de su costo de capital por año [3]. Además, su construcción cuesta entre 20 y 40 USD per cápita en comparación con los 60 y 120 USD per cápita para el sistema convencional de lodos activados [4]

La aplicación del reactor UASB en la depuración de efluentes domésticos se ha incrementado en América Latina [5], en donde es urgente resolver problemas sanitarios y de contaminación con tecnologías eficientes y costos accesibles. Es precisamente en algunos países tropicales como India [3] y otros países latinoamericanos con problemáticas similares, como Brasil [6, 7] y Colombia [8, 9], en donde se han construido plantas para tratar aguas residuales domésticas con reactores UASB. En estos casos se ha demostrado la aplicabilidad de este proceso anaeróbico y se ha obtenido información sobre criterios de arranque, diseño y operación de reactores UASB que tratan efluentes de este tipo.

El tratamiento de aguas residuales domésticas requiere de soluciones eficientes y económicas, que respondan a las necesidades de saneamiento específicas de Bolivia, de acuerdo a la disponibilidad de recursos del país. Es en este marco, que el tratamiento anaeróbico de aguas residuales se perfila como una opción tecnológica compatible con los requerimientos y restricciones de la problemática del manejo de las aguas residuales en Bolivia.

En este artículo se realizó una recopilación de información y revisión bibliográfica de ciertas experiencias en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas con reactores UASB, con especial atención en la operación de los procesos. La información obtenida tiene el objetivo de comparar características de operación y diseño de los reactores UASB en países en Latinoamérica (Brasil y Colombia) y países tropicales como India con la región de los valles de Cochabamba y Tarija con el fin de servir como fundamento en la aplicabilidad de este proceso en Bolivia e identificar las limitaciones y potencial de la tecnología aplicada a la depuración de aguas residuales domésticas.

2. LA TECNOLOGÍA UASB

El reactor anaeróbico de mantos de lodos de flujo ascendente, desarrollado entre los años 1976-1980 [7] por el Profesor Gatzke Lettinga de la Universidad de Wageningen en Holanda, es una tecnología que ha sido aplicada al tratamiento de una gran variedad de aguas residuales [8].

Debido a su efectividad y a sus ventajas económicas, el UASB se aplica de forma extensiva en aguas residuales con una alta carga orgánica tal como son los casos de efluentes de pulpa de celulosa [9], aguas residuales de granjas avícolas [10], efluentes orgánicos industriales [11], y la eliminación de sólidos [12, 13], entre otros. El funcionamiento del reactor UASB depende tanto de parámetros físicos como de los procesos biológicos [14], los cuales determinan la eficiencia de remoción y la conversión de los compuestos orgánicos [15, 16].

El éxito del reactor UASB se basa en el establecimiento de un denso lecho o capa de lodos en el fondo del reactor, en el que se llevan a cabo todos los procesos biológicos [17]. Este lecho de lodo se forma básicamente por la auto-inmovilización natural de bacterias sin la utilización de soporte sólidos como en el caso de las biopelículas [17]. La retención de lodo activo granular o floculante dentro del reactor UASB, en el que la turbulencia natural causada por el caudal del afluente y la producción de biogás proporciona un buen contacto entre las aguas residuales y la-biomasas, permite un buen rendimiento del tratamiento a altas tasas de carga orgánica [17, 18], mayores que en los procesos aeróbicos [19]. Por lo tanto, se requiere menos volumen y espacio del reactor, mientras que al mismo tiempo, energía de alto grado se produce como biogás.

En el reactor UASB (Figura 1), el afluente es alimentado y homogéneamente distribuido por el fondo del reactor y asciende a través de un lecho de lodos anaeróbicos, los cuales son expandidos por la velocidad ascendente del flujo y la producción de biogás [18]. En la parte superior de la zona de digestión se encuentra el separador gas-sólido-líquido (GSL), con las cuales se separan y descarga el biogás generado y se previene el lavado de la biomasa activa. En la zona superior del separador GSL (zona de sedimentación) se pule el efluente por la sedimentación de la biomasa y sólidos que hayan logrado pasar a este nivel del reactor. Finalmente, el efluente es descargado [18, 19].

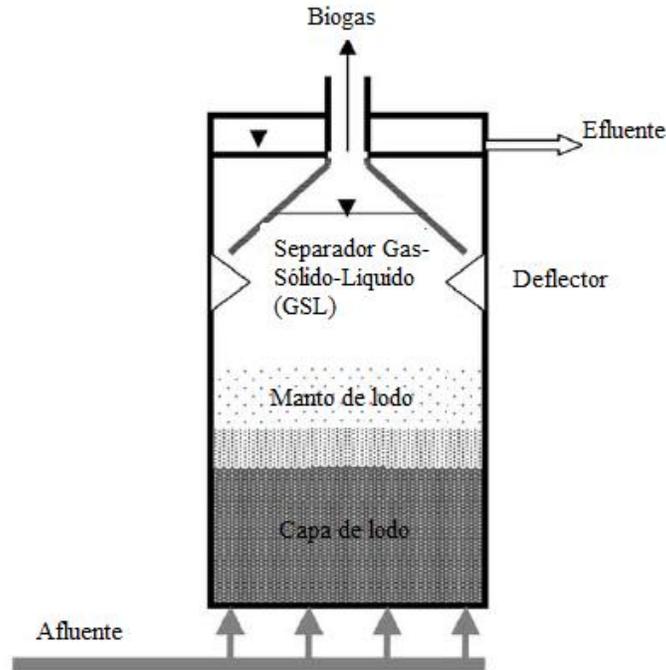


Figura 1 – Esquema de un Reactor UASB [20].

2.1. Puesta en marcha del reactor UASB

El reactor UASB se inocula normalmente con lodo proveniente de un digestor anaerobio de lodos activados y se alimenta en el modo de flujo ascendente. Después de 2-3 meses de funcionamiento, siempre que las temperaturas sean lo suficientemente altas, se desarrolla un lecho de lodo muy concentrado, 40-100 kg de sólidos suspendidos volátiles (SSV)/m³, cerca del fondo del reactor [21, 22].

Este lodo que se desarrolla es muy denso y puede ser de naturaleza granular, con una alta velocidad de sedimentación. Las partículas individuales pueden crecer hasta 1-2 mm de diámetro en ausencia de fuerzas transversales inducidas por la mezcla mecánica [22]. La Figura 2 muestra una fotografía que ilustra la morfología y tamaño de los gránulos anaerobios producidos en un reactor anaeróbico tipo intercambiador de calor, de configuración similar al de un UASB, luego de 94 días de puesta en marcha [23].

El desarrollo de los lodos granulares depende de las características de las aguas residuales y del lodo semilla inoculado al arrancar el reactor. Sobre la capa o lecho de lodo se encuentra una zona del manto de lodos de crecimiento más difuso con velocidades de sedimentación de partículas más bajas a concentraciones entre 15 y 30 kg SSV/m³ [21]. La eliminación del DQO ocurre a lo largo de toda la zona de reacción del lecho y manta de lodo donde el sistema se auto mezcla creando burbujas de gas. Las burbujas, que se producen en el reactor, se eliminan mediante un colector de gas. En la región alrededor y por encima de los separadores de sólidos de gas, la separación de líquidos sólidos tiene lugar en una zona de sedimentación [21, 22]. Todas las superficies en la zona de sedimentación se construyen con pendientes empinadas para permitir que los sólidos asentados se deslicen de vuelta a la región de manta de lodo [21, 22].

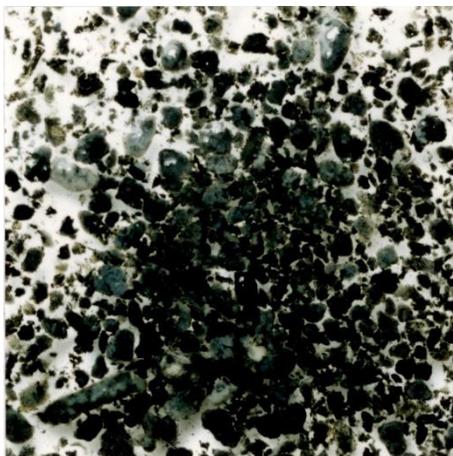


Figura 2 - Fotografía mostrando la morfología y tamaño de gránulos formados en un reactor anaerobio tipo intercambiador de calor [23].

2.2. Proceso anaeróbico del UASB

Existen principalmente cuatro etapas biológicas y químicas clave en el proceso UASB, la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

2.2.1. Hidrólisis

Mayormente la concentración orgánica de aguas residuales es de naturaleza compleja. Para que las bacterias en los digestores anaeróbicos accedan al potencial energético del material, estos componentes orgánicos complejos (polisacáridos, proteínas y lípidos) deben descomponerse en compuestos orgánicos más simples y solubles (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) [22], en un proceso llamado hidrólisis. Para este efecto, las bacterias fermentativas producen enzimas extracelulares que hidrolizan los biopolímeros fuera de la pared celular.

2.2.2. Acidogénesis

Los monómeros generados atraviesan fácilmente la pared de las bacterias acidogénicas para fermentarse adicionalmente, produciendo acetatos y ácidos grasos volátiles de cadena corta, tales como propionatos y butiratos. Además se producen amoníaco, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono e hidrógeno [24].

2.2.3. Acetogénesis

En esta tercera etapa, los ácidos grasos volátiles producidos a través de la fase de acidogénesis, son digeridos adicionalmente por las bacterias hetero-acetogénicas para producir en gran parte ácido acético, así como también dióxido de carbono e hidrógeno [24].

2.2.4. Metanogénesis:

La última etapa de la digestión anaerobia es el proceso biológico de la metanogénesis. Aquí, los metanógenos usan los productos intermedios de las etapas precedentes y los convierten en metano, dióxido de carbono y agua [24]. Estos componentes constituyen la mayor parte del biogás emitido por el sistema [24, 25]. La metanogénesis es sensible tanto al pH alto como al bajo y ocurre entre pH 6,5 y 8 [24]. La metanogénesis se produce por dos vías: la síntesis de metano a partir del dióxido de carbono y el hidrógeno generado en la acidogénesis debido a la actividad de los metanógenos litotróficos, causantes del 30% del metano producido y la descomposición del ácido acético hasta metano por medio de los metanógenos acetotróficos que se ocupan del 70% restante de metano.

Los metanógenos litotróficos deben mantener la presión parcial de hidrógeno en un nivel extremadamente bajo para permitir condiciones termodinámicas favorables para la conversión de los ácidos volátiles a acetato, de otro modo, los ácidos volátiles de cadena más larga tales como el ácido propiónico y ácido butírico se acumularán en el sistema [25]. La Figura 3 ilustra las etapas de degradación y tipos de bacteria que participan intervienen.

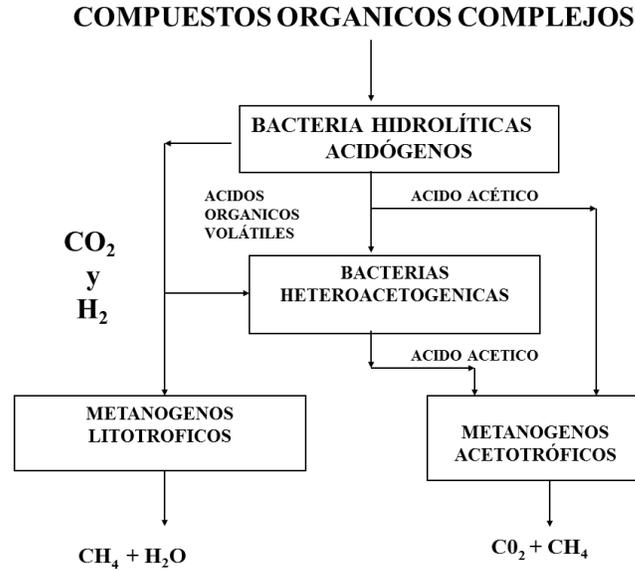


Figura 3 – Etapas de degradación y tipos de bacterias que participan en los procesos anaeróbicos en el reactor UASB, compilado de: [26-28].

2.3. Ventajas y desventajas del reactor UASB

El reactor UASB, como cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, tiene ventajas y desventajas que, según la aplicación particular, podrán afectar determinadamente su selección como opción de tratamiento [29]. De la experiencia en el arranque y operación de reactores UASB que tratan efluentes municipales o domésticos, se ha observado que este sistema anaeróbico presenta las ventajas y desventajas mostradas en la Tabla 1.

TABLA 1 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS PRINCIPALES DEL REACTOR UASB [29]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta eficiencia en la remoción, incluso con altas tasas de carga y bajas temperaturas ▪ No requiere de ningún tipo de soporte para la retención de biomasa, ni agitación mecánica. ▪ Con un inóculo apropiado puede arrancar casi inmediatamente. ▪ La producción de lodos en exceso es baja. ▪ El lodo generado tiene muy buenas características de compactación y está ya parcialmente estabilizado. ▪ El biogás producido puede en ciertos casos ser un subproducto energético valioso. ▪ Conserva los nutrientes en el efluente (N y P), punto atractivo en caso de re-uso en riego. ▪ El proceso en sí, no requiere de suministro de energía eléctrica (Muy bajos requerimientos energéticos en comparación con tratamientos convencionales). ▪ Proceso simple y económico en operación y mantenimiento. ▪ Soporta períodos sin alimentación (semanas e inclusive meses). ▪ Puede aplicarse a pequeña y gran escala ▪ Bajos requerimientos de espacio, el área necesaria para el reactor es pequeño. ▪ Construcción simple y de bajo costo, con muy limitados requerimientos de equipo electromecánico 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es efectivo para un tratamiento secundario completo, ya que remueve preferentemente compuestos orgánicos y sólidos suspendidos. Se requiere de un post-tratamiento para remover en mayor grado la materia orgánica. ▪ Eliminación parcial de patógenos con la excepción de huevos de helmintos, que se capturan efectivamente en el lecho del lodo. ▪ Poca experiencia en la aplicación del reactor a gran escala. ▪ Arranque lento si no se cuenta con el inóculo adecuado. Se ha comprobado que para aguas residuales domésticas o municipales el reactor puede arrancarse sin inóculo, aunque en un tiempo mayor, del orden de 8 meses. ▪ Como todo proceso biológico, es sensible a la temperatura del agua residual (inferior a 16 °C) y a cambios bruscos de pH fuera del intervalo de 6.5 a 7.5. ▪ Suele presentar olores debido al escape de gases, que pueden generar malos olores debido, principalmente, a fallos en la ventilación o sobrecargas.

De manera general, el reactor UASB tiene una aplicabilidad para el tratamiento de aguas domésticas, ya que con un buen diseño del reactor pueden contrarrestarse las desventajas y aprovechar muchas de sus cualidades. El reactor UASB es un proceso económico, que disminuye apreciablemente los costos de inversión y operación de un proyecto de una planta de tratamiento que involucre este proceso, inclusive con post-tratamiento. Esto se debe a que el reactor UASB no requiere de un gran consumo de energía eléctrica, su operación es sencilla, sin requerimientos de equipo electromecánico otro que una bomba de alimentación ni de equipo para el control de su operación y proporciona un pretratamiento confiable y eficiente. En sí, el reactor UASB es un proceso generador de energía (productor de CH₄), en lugar de un consumidor energético, como la mayoría de los procesos de depuración de aguas residuales

A pesar de que el reactor UASB es un proceso relativamente sencillo de operar con aguas de tipo doméstico, su simplicidad no implica que no se requiera de atención y cuidado en su diseño y operación. Existen ciertos factores al respecto que son importantes tener presentes. El buen diseño de un reactor UASB es esencial para su correcto funcionamiento [29]. No puede esperarse que un reactor con fallas en el diseño hidráulico tenga un buen desempeño. Un buen diseño de un reactor que trate aguas residuales domésticas debe partir de la carga hidráulica como parámetro de diseño fundamental y no de la carga orgánica, como sucede con reactores que tratan aguas concentradas [29].

Uno de los factores limitantes de la digestión anaerobia, que se hace evidente en el tratamiento de aguas residuales domésticas, es el límite en la remoción de materia orgánica. La limitante en la remoción de materia orgánica tiene su causa en la propia cinética anaerobia, la cual determina que exista una concentración mínima de sustrato para que el crecimiento y decaimiento de microorganismos esté en balance [29]. Para contrarrestar lo más posible esta característica, en un reactor UASB se tienen tiempos de retención de biomasa altos y el diseño debe proveer de una distribución homogénea del flujo del afluente, que con una velocidad ascendente adecuada, permita la expansión del lecho de lodos, dándose así el mayor contacto posible entre el sustrato y los microorganismos [29]. Si este aspecto es descuidado en el diseño de un reactor UASB que tratará efluentes domésticos, el proceso tendrá gran probabilidad de trabajar ineficientemente.

2.4. Post-tratamiento de efluentes de reactores UASB que tratan aguas residuales domésticas

El reactor UASB puede sustituir al decantador primario, el digester anaeróbico de lodos, el paso aeróbico (lodo activado, filtro percolador y otros), y el decantador secundario de una planta de tratamiento aeróbico convencional. Sin embargo, los efluentes de los reactores UASB necesitan usualmente un tratamiento adicional para eliminar la materia orgánica remanente, los nutrientes y los patógenos [30,31]. Este post-tratamiento se puede llevar a cabo en sistemas aeróbicos convencionales como estanques de estabilización, plantas de lodos activados y otros [30].

Las principales razones por las cuales el efluente de un reactor UASB puede requerir de un post-tratamiento son:

- Remoción de materia orgánica remanente en el efluente, debido a que la digestión anaerobia tiene un límite de remoción que depende, básicamente, de la cinética global de degradación, y por lo tanto de la temperatura, el contenido de biomasa activa y del grado de contacto entre el sustrato y los microorganismos [30,31].
- Remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), ya que la digestión anaerobia tiene bajos requerimientos de nutrientes y prácticamente no remueve nitrógeno ni fósforo. Esta remoción, sin embargo, puede no ser necesaria, ya que si el agua será usada para riego, la presencia de estos elementos puede ser muy valiosa como nutrientes de las plantas [30,31].
- Remoción de organismos patógenos, debido a que el reactor UASB no es eficiente en la remoción de bacterias y virus patógenos, aunque sí tiene capacidad de remoción de huevos y quistes de protozoarios, pero con un post-tratamiento se aseguraría una remoción del 100 %. Con excepción de las lagunas de oxidación, todos los procesos biológicos tienen, sin embargo, esta limitante [30,31].
- Remoción de sólidos sedimentables que hayan permanecido en el efluente o que se hayan descargado en una desestabilización del reactor [30,31].

La necesidad y el tipo post-tratamiento del efluente de un reactor UASB que trate aguas residuales domésticas está determinada, fundamentalmente, por los parámetros de calidad del efluente que la legislación haya fijado en particular [31]. Cabe aclarar que en ciertas ocasiones, sólo cierto tipo de post-tratamiento, aplicable también a cualquier proceso aerobio, será necesario para cumplir con los niveles de depuración establecidos [32].

3. METODOLOGÍA

Se realizó una comparación de datos en base a información bibliográfica proveniente del uso de los Reactores UASB en países Latinoamericanos (Brasil y Colombia) e India con resultados obtenidos de seis Plantas de Tratamiento de Aguas residuales domésticas construidas por la Fundación AguaTuya en Cochabamba-Bolivia.

Para este fin se compararon similitudes y diferencias de los parámetros de operación y diseño (Tiempo de retención hidráulica, Carga Orgánica Volumétrica (COV), Remoción promedio de Demanda Química de Oxígeno - DQO, Demanda Biológica de Oxígeno -DBO y Solidos Suspendidos Totales -SST).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas con reactores UASB en Latinoamérica y la India

4.1.1. Temperaturas bajas

La aplicación de los reactores UASB al tratamiento de aguas residuales bajo condiciones de baja temperatura se ha estudiado en los Países Bajos desde 1976 [33,34]. Lettinga *et al* (1983) [35] reportaron resultados obtenidos en reactores UASB de laboratorio con aguas residuales crudas usando aguas residuales digeridas y lodos cultivados de azucarera como material de siembra. Al mismo tiempo, un reactor UASB de 6 m³ sembrado con lodo de aguas residuales, fue operado a tiempos de retención hidráulica (TRH) de 14-17 h. La reducción de DQO alcanzó 85-65% y 70-55% a 20 y 13-17 ° C, respectivamente [35]. El estudio concluyo en que el concepto UASB era una tecnología simple, compacta y barata para el tratamiento de aguas residuales, incluso a temperaturas relativamente bajas. Fernandes *et al.* (1985) [36] confirmo sus resultados utilizando dos pequeños reactores UASB para tratar las aguas residuales domésticas asentadas.

Basado en una investigación realizada en los Países Bajos sobre diferentes reactores UASB de Man *et al.* (1986) [37] concluyeron que el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales domésticas crudas (COD = 500-700mg / l) se puede lograr a 12-18 ° C aplicando TRHs de 7-12 h con eficiencias de eliminación total de COD y DBO del 40-60% 50-70%, respectivamente [37].

4.1.2. Altas temperaturas

En los países tropicales, el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales tiene una mayor aceptación, además existen varias plantas a gran escala en funcionamiento. Un proyecto conjunto financiado por el gobierno holandés se llevó a cabo en Cali (Colombia) para probar la viabilidad técnica y financiera del proceso UASB para el tratamiento de aguas residuales a escala piloto y desarrollar criterios de diseño que fueron transferidos a instituciones colombianas para promover el uso de esta Tecnología en los países en desarrollo. La planta construida en Cali es considerada la primera de su tipo en el mundo [29].

Barbosa y Sant'Anna (1989) [38] informaron los resultados de 9 meses de funcionamiento de un UASB para tratar aguas residuales crudas con 627 mg/l de DQO y 357 mg/l de DBO a temperatura ambiente (19-28 ° C). La puesta en marcha se consiguió con éxito sin inoculación y el reactor fue operado a un tiempo de retención hidráulico de sólo 4 h durante todo el período experimental. Se observaron gránulos bacterianos esféricos después de un mes de operación. Al final del experimento se observaron gránulos de hasta 8 mm de diámetro. La eliminación de DQO, DBO y SST aumentó constantemente durante los primeros 4 meses de operación [29]. Después de eso, la eficiencia de eliminación mejoró lentamente, indicando el final del período de puesta en marcha. La rápida evolución del lecho de lodo se atribuyó al alto contenido de materia orgánica en suspensión de las aguas residuales entrantes (76% del DQO total del afluente). Después de la fase de arranque (últimos 5 meses de operación), se logró la eliminación de DBO total de alrededor del 78%, mientras que la remoción total de DQO alcanzó el 74%. La acumulación reportada de sólidos en el lecho de lodo fue casi 50% más rápida en los últimos 5 meses de operación que durante la puesta en marcha. Por otra parte, la concentración de SS en el efluente no dependió de las variaciones observadas en el afluente. Una observación similar fue reportada por Wang (1994) [39]. La remoción promedio de SS durante este período fue del 72%. La DQO fue eliminada principalmente a través del proceso físico de retención de SS en el lecho de lodo. La DQO disuelta fue responsable de la mayor parte de la producción de metano, pero a partir de los saldos de DQO se observó que también se producía algo de metano a partir de la hidrólisis y fermentación de la materia orgánica particulada [39]. El alto

contenido de materia orgánica no disuelta lentamente degradable de las aguas residuales utilizadas en este experimento y la alta capacidad de retención de sólidos en el reactor UASB promovieron una producción de exceso de lodos, que debe ser retirada del reactor y posteriormente tratada, secada o eliminada.

4.1.3. Plantas a gran escala

La aplicación a gran escala del proceso UASB se ha implementado con éxito en varios países. La cooperación bilateral entre la India y los Países Bajos condujo en 1985 al diseño y la construcción de un reactor UASB a gran escala para aguas residuales domésticas en la ciudad de Kanpur (India) [40], que está en funcionamiento desde abril de 1989. Esta planta fue diseñada para tratar 5000 m³ de aguas residuales por día. La puesta en marcha se llevó a cabo sin inóculo. Después de que se acumuló suficiente lodo en el reactor, se indicó que la calidad del lodo se mejoraba interrumpiendo la alimentación de la planta durante aproximadamente 2 semanas [40]. El período de puesta en marcha fue de unas 10 semanas. Las eficacias de remoción de DQO, DBO y SST son de 74, 75 y 75% respectivamente, se alcanzaron a una TRH nominal de 6 h. Sin embargo, con el fin de cumplir con los estándares indios de descarga en las aguas superficiales, post-tratamiento fue necesario [40].

Basándose en los resultados obtenidos en Kanpur (India), se diseñó una planta UASB a gran escala con una instalación de post-tratamiento consistente en un estanque con un tiempo de retención de un día para la ciudad india de Mirzapur [41]. Esta planta ha sido construida como parte del Proyecto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Holandés bajo el Plan de Acción de Ganga y ha estado en pleno funcionamiento desde abril de 1994 [41]. La temperatura del reactor también varió desde los 18 °C en invierno hasta los 32° C en verano, como en el caso de Kanpur descrito anteriormente. La tasa media de carga orgánica volumétrica durante el período reportado fue de aproximadamente 0,95 kg-DQO/m³/d para los reactores UASB y 0,13 kg DQO/m³/d para el estanque de pulido. En este estanque se mantuvieron los SST restantes, de tal manera que el efluente final cumplió con los estándares del plan de acción de Ganga (DBO = 30 mg/L, SST = 50 mg/l). La eficiencia total de remoción de la planta de tratamiento de aguas residuales de Mirzapur (India) para DQO, DBO y SST fue de aproximadamente 81, 86 y 89%, respectivamente [41].

En octubre de 1990 se puso en marcha en Bucaramanga, Colombia, una enorme planta de tratamiento de aguas residuales basada en la tecnología UASB [42]. La planta consistió en dos reactores UASB que funcionan en paralelo y un estanque facultativo en serie como post-tratamiento. Basándose en una operación de 3 años, se alcanzó una eficiencia de eliminación de la DQO de 70 a 77%, siendo los reactores UASB responsables del 45-50% de esa remoción [42, 43]. No se utilizó inóculo y el período de inicio duró alrededor de 6 meses. El diseño de esta planta de tratamiento a gran escala se basó en la operación de 4 años de un reactor UASB de 35 m³ de planta piloto [42]. Cabe mencionar que la planta de tratamiento de Bucaramanga, Colombia, probablemente constituye el sistema más grande del mundo que maneja efluentes municipales con reactores UASB. Actualmente esta planta (PTAR "Río Frío") posee tres (3) reactores UASB de 3360 m³ de volumen cada uno y dos (2) lagunas facultativas de 2,7 ha como post-tratamiento. En marzo de 2016, la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander (EMPAS), confirmó que espera invertir \$35 mil millones adicionales en los próximos años para consolidar la modernización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Río Frío (Anillo Vial) con el fin de pasar todo el tratamiento de un proceso anaeróbico (que genera malos olores) a uno que usa lodos activos (que no los genera) [44]. Además, esta inversión desea reducir drásticamente los malos olores generados por la planta que causan molestias entre los habitantes de sectores como Cañaveral y El Bosque [44].

En Brasil, se han diseñado y construido reactores de UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Un ejemplo es la Planta de demostración a nivel piloto en São Paulo, Brasil con un reactor UASB de 120 m³ (4,8 m de altura, 5,2 m de diámetro inferior y 7,9 de diámetro superior) [22, 29].

En la Tabla 2 se presentan los parámetros de diseño y operación más importantes de algunos de estos reactores: Fecha de arranque y tiempo de operación, tren de tratamiento, tiempo de retención hidráulica y flujo de diseño. Los valores de eficiencias de remoción de DQO, DBO y SST, obtenidos al variar el TRH en los reactores, logran eficiencias de remoción de materia orgánica aceptables (alrededor de 60-75 %), con tiempos de retención relativamente bajos (TRH = 4-6 h). A pesar de estos resultados, las concentraciones de DBO y SST en el efluente están por arriba de 50 mg/L, que es la concentración máxima admitida en la mayoría de los estándares de calidad de efluentes [8, 33].

TABLA 2 - CRITERIOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE ALGUNAS PLANTAS CON REACTORES UASB QUE TRATAN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS [22, 29, 40, 42]

Planta	Tiempo y período de operación	Tren de tratamiento	TRH de diseño/Op.	Flujo de diseño
Planta a nivel piloto de demostración en Cali, Colombia. (Cali)	5 años y medio Fecha de arranque: 1983 Fecha de finalización: 1989	Cámara desarenadora Caja controladora de flujo (0 - 10 L/s o 0 - 36 m ³ /s) Reactor UASB de 64 m ³	2,8 - 8 h	23,8 m ³ /h
Planta a nivel piloto de demostración en São Paulo, Brasil. (São Paulo)	5 años Fecha de arranque: 1986 Fecha de finalización: 1991	Rejillas Estación de bombeo Cámara desarenadora Reactor UASB de 120 m ³	4h 4,4 - 14,5 h	30 m ³ /h 0,008 m ³ /s
Planta a escala real de Pedregal en Campina Grande, Brasil. (Pedregal)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: junio de 1989	Rejillas de 25 mm canal Parshall Doble canal desarenador Reactor UASB de 160 m ³	6 h 2,1 - 17,0 h	27 m ³ /h 0,0075 m ³ /s
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Río Frío" en Bucaramanga, Colombia. (Bucaramanga)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 1989	Rejillas (2 unidades en paralelo) Cámara desarenadora (3 unidades paralelas) 3 reactores UASB de 3300 m ³ cada uno 2 lagunas facultativas de 2,7 ha Lechos de secado de lodos	3 h - 5,2 h	1950 m ³ /h 0,54 m ³ /s
Planta a escala real en Kampur, India. (Kampur)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: abril de 1989	Caja control de flujo Rejillas Cámara desarenadora Caja de distribución de flujo Reactor UASB de 1200 m ³ Lechos de secado de lodos	6 h	208 m ³ /h 0,06 m ³ /s

Esta situación hace necesario un post-tratamiento. Sin embargo, estas eficiencias de remoción alcanzadas también ponen en claro la factibilidad tecnológica del reactor UASB para tratar este tipo de efluentes, sobre todo cuando no se requiere una calidad de agua tratada de nivel secundario. Un reactor UASB alimentado con aguas residuales domésticas con temperaturas mayores a 20 °C, entregará una calidad de agua tratada con un DQO entre 140 y 160 mg/L, DBO entre 40 y 50 mg/L y SST entre 50 y 60 mg/L [33].

En la Tabla 3 se muestra el desempeño de algunas de las plantas descritas en la remoción de DQO total, DBO total y SST, a distintas velocidades de carga orgánica volumétrica, COV.

TABLA 3 - DESEMPEÑO EN ESTADO ESTACIONARIO DE LOS REACTORES UASB DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LATINOAMERICA Y LA INDIA [22, 29, 40, 42]

Reactor	T, °C	TRH	COV, kg/m ³ -d	Remoción promedio de DQO _{total} , mg/L			Remoción promedio de DBO _{total} , mg/L			Remoción promedio de SST, mg/L		
				Af	Efl	%	Af	Efl	%	Af	Efl	%
Cali, Colombia	25	4 h 6 h	1, 28-2,19	365	135	62	137	36	74	1852	102	45
				321	109	65	161	31	81	12	41	81
Sn Pablo, Brasil	20-22	4,4 h 5 h	0,74-2,18	400	189	53	181	111	39	236	105	55
				393	280	32	201	121	42	207	78	62
				307	117	62	198	58	71	149	49	67
									67	24	67	

		5,1 h 6,1 h		188	83	56	104	42	60			64
Pedregal, Brasil	25	5,7 h	2,93	695	273 208	61 70	471	1461 13	69 76	472	276 152	42 68
Bucaramanga, Colombia	-	5 h	1,75	365	*132 ^128 139	63 64 63	171	40 40 44	76 76 75	225	58 52 61	74 76 72
Kampur, India		6 h		430	172	60	162	56	65		68	67
* con presencia de mamparas		6 h		471	179	62	161	50	69	1972	72	79
+flujo constante		*6h		450	135	70	161	50	69	1527	57	79
•fluctuaciones día/noche		+6h		706	274	61	272	88	69	1540	300	44
^T = 23 °C	20-23	•6 h	1,73-3,00	706	231	67	272	79	71	5406	174	68
°T = 20 °C		^6 h		749	220	71	274	81	70	21	17311	72
		6 h		458	135	70	159	50	69	519	1	79

Af- Afluente

Efl - Efluente

% - Eficiencia de remoción del sistema

4.2. Experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas con reactores UASB en Bolivia

En los últimos años, debido principalmente a los efectos adversos del cambio climático y el incremento de la escasez de agua en Bolivia, el gobierno plurinacional a través del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, priorizo el tema del tratamiento de aguas residuales, con una doble estrategia. Por una parte mejorar el saneamiento y conservación del medio ambiente; y por otra promover el re-uso en la agricultura de las aguas residuales tratadas.

De acuerdo a un estudio realizado por PROAGRO y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua-MMAyA el año 2013 [45], el (1%) del total de las tecnologías identificadas en las PTARs estudiadas en Bolivia pertenece al uso de los reactores UASB. Por otra parte, el (16%) (Figura 4), representa a los sistemas combinados que son principalmente reactores UASB (RALF) y tanques Imhoff acompañados de sistemas de lagunas, siendo de una mayor eficiencia ya que representan una mayor remoción de contaminantes debido a la combinación de tecnologías.



Figura 4 - PTARs en Bolivia [45].

En ese contexto, el uso de los reactores UASBs para el tratamiento de aguas residuales domésticas empieza a tener un uso bastante significativo en los sectores de los valles y llanos del país (Figuras 5 y 6). En los últimos años su implementación ha tenido mucha aceptación en varias ciudades del Valle Alto en el departamento de Cochabamba, demostrando ser una opción atractiva en poblaciones medianas y pequeñas.

Porcentaje PTARs en la Región de los Valles

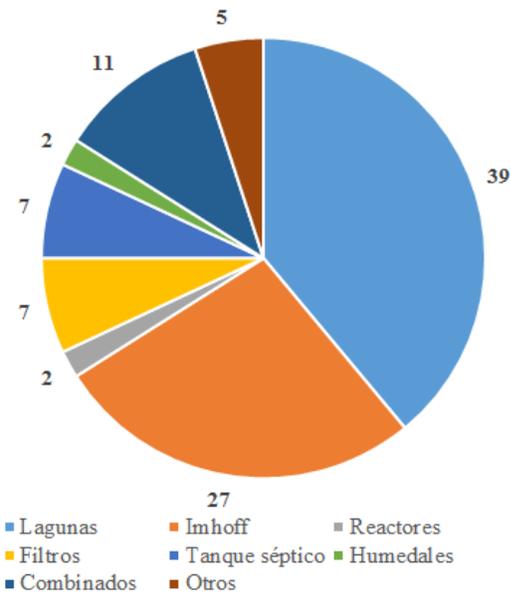


Figura 5 – PTARs identificadas en la región de los Valles [45]

Porcentaje PTARs en la Región de los Llanos

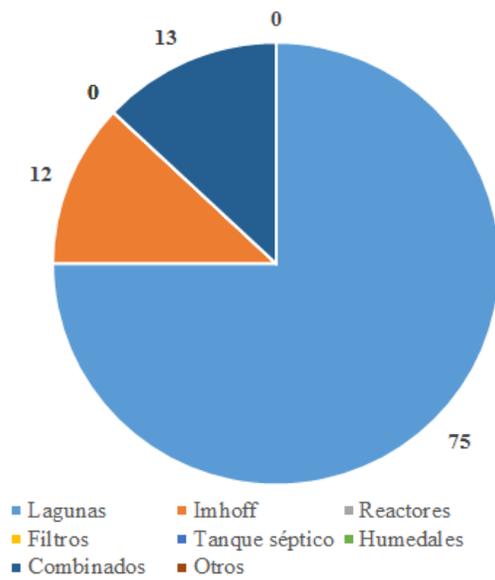


Figura 6 - PTARs identificadas en la región de los Llanos [45]

Por otra parte, en la región del Altiplano (Figura 7), por sus condiciones climáticas de bajas temperaturas durante todo el año, la aplicación de los reactores UASB es muy limitada. En esta región, el tratamiento se realiza en un alto porcentaje (56%) con lagunas de estabilización, debido a la topografía plana y la mayor disponibilidad de terrenos que presenta.

Porcentaje PTARs en la Región del Altiplano

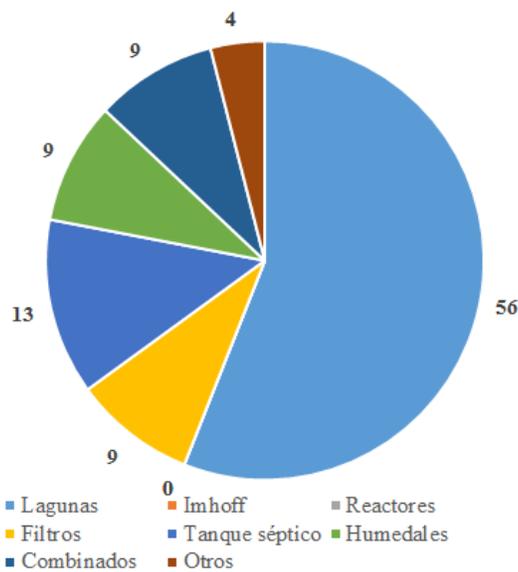


Figura 7 – PTARs identificadas en la región del Altiplano [45].

La Fundación Agua Tuya en coordinación con distintos municipios del valle Alto de Cochabamba y Tarija ha estado implementando la tecnología de los reactores UASB desde el año 2009. Esta tecnología de plantas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales domésticas está influyendo en la adaptación de esta tecnología en otros lugares del país, abordando los problemas de tratamiento de aguas residuales con una nueva y más accesible perspectiva. La Tabla 4

presenta los criterios básicos de diseño y operación de las plantas con reactores UASB en la región de los valles, construidos por la Fundación [46].

TABLA 4 - CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE ALGUNAS PLANTAS CON REACTORES UASB EN LA REGIÓN DE LOS VALLES (FUNDACIÓN AGUATUYA [46])

Planta	Tiempo y período de operación	Tren de tratamiento	THR total	Flujo de diseño
PTAR Challwamay, Vacas (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2016	Cámara de rejillas /desarenador; Desgrasadora 2 Reactores UASB 2 Biofiltros (Humedales artificiales) Tanque de Contacto 6 Filtros verdes Lecho de secado de lodos	3.5 días	10,38 m ³ /h 249 m ³ /d
PTAR Miraflores Sivingani (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2012	Cámara de rejillas; Separador de grasas 2 Reactores UASB 2 Biofiltros (Humedales artificiales de flujo horizontal y vertical) Lechos de secado de lodos	4 días	1,96 m ³ /h 47 m ³ /d
PTAR Maria Auxiliadora (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2011	Cámara de rejillas: Desgrasadora Reactor UASB 2 Biofiltros (Humedales artificiales de tipo subsuperficial de flujo horizontal) Lecho de secado de lodos	6 días	2,42 m ³ /h 58 m ³ /d
PTAR Lomas del Pagador (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad	Cámara de rejillas: Separador de grasas 2 Reactores UASB 2 Biofiltros (Humedales artificiales de tipo subsuperficial de flujo horizontal y vertical) Laguna de maduración 2 Lechos de secado de lodos	7 días	2,42 m ³ /h 58 m ³ /d
PTAR Centro Urbano Cliza (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2012	Cámara de rejillas: 5 Desgrasadoras 10 Reactores UASB 10 Biofiltros (Humedales artificiales de tipo subsuperficial de flujo horizontal y vertical) 4 Lechos de secado de lodos	3 días	23,67 m ³ /h 568 m ³ /d
PTAR Curubamba Alta, Sacaba (Cochabamba)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2016	Cámara de rejillas/cesto: Cárcamo de bombeo: Desgrasadora Reactor UASB Biofiltro (Humedal artificial de flujo horizontal y vertical) Tanque de contacto Lechos de secado de lodos	2 días	1,44 m ³ /h 34,66 m ³ /d
PTAR Centro Urbana Tolata (Cochabamba)	No se encuentra funcionamiento en la actualidad Fecha programada de arranque: Mayo de 2017	2 Cámaras de rejillas/cesto: Cárcamo de bombeo Tamiz rotativo Desgrasadora 2 Reactores de flujo pistón Aireación 4 Biofiltros ((Humedal artificial de flujo horizontal y vertical) Tanque de contacto 2 Lechos de secado de lodos	4.5 días	14,64 m ³ /h 351,40 m ³ /día
PTAR Canasmoro (Tarija)	En funcionamiento en la actualidad Fecha de arranque: 2017	Cámara de rejillas/cesto Cárcamo de bombeo Tamiz rotativo Desgrasadora 2 Reactores UASB Aireación 2 Biofiltros (Humedales artificiales de flujo horizontal) Tanque de contacto 2 Lechos de secado de lodos	3.5 días	6,66 m ³ /h 159,95 m ³ /día

Fuente: Adaptado en base a datos de Agua Tuya (2011-2017).

Los tiempos de retención hidráulica, las cargas orgánicas volumétricas, COV, las eficiencias de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en los reactores de las PTARs descritas previamente están detalladas en la Tabla 5.

TABLA 5 - DESEMPEÑO DE REACTORES UASB EN ALGUNAS PTAR DOMÉSTICAS EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA, FUNDACIÓN AGUATUYA [46]

Reactor	TRH medido, h	COV, kg-DQO/m ³ -d	Remoción promedio de DQO total, mg/L			Remoción promedio de DBO _{total} , mg/L			Remoción promedio de SST, mg/L		
			Afl	Efl	%	Afl	Efl	%	Afl	Efl	%
Challwamayú	28,3	0,72	854	417	51	502	218	57	201	10	95
Miraflores, Sivingani	14,2	2,19-3,25	1296 1925	295 419	77 78	387 804	176 384	55 52	620 525	205 116	67 78
Maria Auxiliadora	4,2	10,54	1844	397	78	861	141	84	587 757	212 44	64 94
Lomas del Pagador	9,6	5,26	2103	1289	39	1186	494	58	510	260	49
Centro Urbano Cliza*	10,1	1,16	487	117	76	366	88	76	2488	16	99
				172	65		47	87		130	94
				90	82		58	84		34	99
				176	64		90	75		35	98
63	87	50	86	75	97						
Curubamba Alta, Sacaba	9,3	1,17	455	249	45	240	180	25	183	58	68

Fuente: Adaptado en base a datos de AguaTuya (2011-2017)

Af- Afluente; Efl – Efluente; % - Eficiencia de remoción del sistema; * UASB + desgrasador

4.3. Análisis comparativo de las experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas con reactores UASB en Bolivia y Latinoamérica/India

Efectuando una comparación del desempeño entre las PTAR ubicadas en Cochabamba y las instaladas en Latinoamérica e India, se puede observar los siguientes aspectos:

- Las concentraciones de DQO y DBO en Cochabamba son mayores a las de Latinoamérica e India. Las razones de esta característica son diversas, una de las cuales puede estar relacionada con los bajos consumos de agua per cápita en las poblaciones pequeñas servidas de Cochabamba, comparados con los de las grandes ciudades como Kampur y Bucaramanga
- Las COVs en PTARs de Latinoamérica e India varían entre 0,74 y 3,00 kg-DQO/m³-d y las ubicadas en poblaciones pequeñas de Cochabamba varían entre 0,72 y 3,25 kg-DQO/m³-d en 4 de las 6 plantas que actualmente funcionan. Estos valores de COV basados en la DQO son los típicos recomendados para aguas residuales domésticas de baja concentración de DQO (hasta 750 mg-DQO/L), tratadas por reactores UASB (1 -3 kg-DQO/m³-d) [47]
- Las PTAR de Lomas del Pagador y Maria Auxiladora operan a COV altas, 5,26 y 10,54 respectivamente, debido principalmente a las concentraciones altas de DQO del afluente, cercanas a 2000 mg-DQO/L. A pesar de ello, la eficacia de la PTAR de Maria Auxiladora es todavía alta (78%) en comparación de la de Lomas del Pagador (39%)
- Las eficacias de remoción de DQO, DBO y SST a las temperaturas de operación en ambas regiones son similares. Sin embargo, en la PTAR de Cliza, los SST en los efluentes son comparativamente bajos a pesar de las altas concentraciones de SST en el afluente (alta fracción de sólidos inorgánicos en los sólidos suspendidos totales). Esto puede atribuirse a las buenas velocidades de sedimentación de los sólidos inorgánicos en los reactores UASB y al excelente desempeño de sus separadores de tres fases.

Sobre la base de estas observaciones se puede afirmar que los supuestos de diseño, condiciones de operación y desempeño de las plantas ubicadas en los valles de Cochabamba son esencialmente similares a otras regiones templadas de Latinoamérica y la India.

5. NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

La aplicación de sistemas UASB, para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas está limitada hasta ahora a regiones con condiciones de temperaturas templadas y relativamente calientes, como son las regiones del valle y llanos en Bolivia. Sin embargo, para menores temperaturas (regiones andinas) su aplicación es escasa, situación que plantea un reto a los expertos e investigadores de tratamiento de aguas residuales en formular, desarrollar y adaptar nuevos conceptos dentro del área tecnológica, como respuestas viables a los problemas de contaminación.

Las prácticas de re-uso de aguas residuales tratadas y no-tratadas en agricultura son comunes en Bolivia, lo cual atenta con la salud pública que consume productos regados con aguas no –tratadas o que no cumplen con los niveles de remoción esperados. En este sentido nuevas tecnologías de tratamiento como UASB son necesarias donde el re-uso de los efluentes de estas plantas debe ser reglamentado [45]

El éxito de los reactores UASB depende principalmente del tiempo de retención de los lodos [9, 10], que es el factor clave que determina la cantidad final de hidrólisis y metanogénesis en un sistema UASB en ciertas condiciones de temperatura [9, 10]. La retención de lodos debe ser lo suficientemente larga como para proporcionar suficiente actividad metanogénica en las condiciones prevalecientes. La retención de lodos está determinada por la tasa de carga, la fracción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el afluente, la eliminación de SST en el lecho de lodo y las características de los SST (biodegradabilidad, composición, etc.) [9, 10]. El efecto de la temperatura sobre los diferentes factores que afectan a la retención de lodos todavía no está completamente clarificado. La acumulación de SST se hace significativa a temperaturas inferiores a 12-18 ° C debido a una hidrólisis muy lenta, lo que obliga a una reducción de la tasa de carga [35]. La acumulación de SST no degradada puede inducir una reducción de la actividad metanogénica del lodo, un deterioro de los agregados bacterianos y la formación de capas de escoria, lo que conduce a una sobrecarga del reactor.

A pesar de la existencia de trabajo dedicado a la clarificación de los mecanismos de eliminación de SST e hidrólisis, tanto los procesos físicos como los biológicos de un tratamiento anaeróbico necesitan investigación adicional. El modelado matemático del sistema, incluyendo los procesos físicos y biológicos, puede ayudar a obtener más información sobre el proceso, y sin duda proporcionará una base racional para el manejo adecuado de la retención de lodos en los reactores UASB en países subtropicales y templados (en desarrollo).

6. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una revisión bibliográfica resumiendo las principales características del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante el uso de reactores RALF o UASB. Se revisó la aplicación de dicho proceso en países desarrollados (Holanda) países en desarrollo (Brasil, Colombia y India) y Bolivia (región del valle de Cochabamba y Tarija). La revisión mostró, en base a la experiencia de operación de distintas plantas de tratamiento ubicadas en los valles de Cochabamba, que los reactores anaerobios de mantos de lodos de flujo ascendente apropiadamente diseñados, son adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en las regiones de los valles y llanos de Bolivia debido a que presentan condiciones ambientales que hacen que el uso de esta biotecnología anaerobia sea favorable bajo la perspectiva del desarrollo sostenible.

Las características compactas y la facilidad de operación de sistemas basados en tecnología anaeróbica de reactores UASB tienden a favorecer la opción de sistemas pequeños descentralizados en lugar de las grandes plantas de tratamiento. Además los costos de construcción, instalación y funcionamiento son más atractivos en comparación a otro tipo de tecnologías.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado la Universidad Privada Boliviana (UPB) y por el equipo técnico de la Fundación AguaTuya, Bolivia. En particular, nos gustaría agradecer los comentarios del Ing. Gustavo Heredia y el apoyo técnico del Ing. Ariel Aldunate. Este estudio es parte de un proyecto de investigación sobre el “Monitoreo del Desempeño de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Cliza y Tolata” dentro el convenio AguaTuya-UPB.

8. REFERENCIAS

- [1] L. Borzacconi y I. López, "Relevamiento de Reactores Anaerobios en América Latina". III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". 25-28 de octubre de 1994. Montevideo, Uruguay, 1994, pp. 263 - 279.
- [2] H. Draaijer, J. A. W. Maas, J. E. Schaapman and A. Khan, Performance of the 5 MLD UASB Reactor for Sewage Treatment at Kanpur, India. *Wat. Sci. Tech.*, vol. 25, No. 7, pp. 123-133, 1992.
- [3] A. C. Van Haandel and G. Lettinga, Anaerobic Sewage Treatment. A practical guide for regions with a hot climate. John Wiley and sons. Gran Bretaña, 1994.
- [4] S. M. M. Vieira, Anaerobic Treatment of Domestic Sewage in Brazil - Research Results and Full-scale Experience. *Anaerobic Digestion, 1988. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion*. 22-26 de mayo de 1988. Boloña, Italia. IAWPRC, pp. 185-195, 1988.
- [5] A. Schellinkhout and C. J. Collazos, Full-scale Application of the UASB Technology for Sewage Treatment. *Wat. Sci. Tech.*, vol. 25, No. 7, pp. 159-166, 1992.
- [6] A. Schellinkhout and E. Osorio, Long-term Experience with the UASB Technology for Sewage Treatment on Large Scale. *7th International Symposium on Anaerobic Digestion*. 23-27 de enero de 1994. Ciudad del Cabo, Sudáfrica. Oral and Posterpaper preprints, pp. 251-252, 1994.
- [7] G. Lettinga and J. N. Vinken, Feasibility of the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) process for the treatment of low-strength wastes. *35th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings*, pp. 625-634, 1980.
- [8] G. Lettinga, A. F. M. van Nelsen, S. W. Hobma, W. de Zeeuw, & A. Klapwijk, Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 22, pp. 699- 734, 1980.
- [9] A.P. Buzzini, E.C. Pires, Cellulose Pulp Mill Effluent Treatment in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Process Biochem.* vol. 38, pp. 707-713, 2002.
- [10] P.C. Chavez, L.R. Castillo, L. Dendooven and E.M. Escamilla-Silva, Poultry Slaughter Wastewater Treatment with an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Bioresour. Technol.* vol. 96, pp. 1730-1736, 2005.
- [11] L. Kasum, A. Kansal, M. Balakrishnan, K.V. Rajeswari and V.V.N. Kishore, Assessment of Biomethanation Potential of Selected Industrial Organic Effluents in India. *Resour. Conserv. Recycl.* vol. 35, pp.141-161, 2002.
- [12] G. Lettinga, J. Field, J. Vanlier, G. Zeeman and L.W. Hulshoff-Pol, Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in the Near Future. *Water Sci. Technol*, vol. 35, no. 10, pp. 5-12, 1997.
- [13] N. Mahmoud, G. Zeeman, H. Gijzen and G. Lettinga, Solids Removal in Upflow Anaerobic Reactors, a Review. *Bioresour. Technol.* vol. 90, pp. 1-19, 2003.
- [14] Metacalf, Eddy. *Wastewater Engineering-Treatment, Disposal, Reuse*. Third edition. New York, USA. McGraw Hill, 1991.
- [15] R.F. GonCalves, A.C. Cha-Lier and F. Sammut, Primary Fermentation of Soluble and Particulate Organic Matter for Wastewater Treatment. *Water Sci. Technol.*, pp. 53-62, 1994.
- [16] W.M. Wiegant, Experiences and Potential of Anaerobic Wastewater Treatment in Tropical Regions. *Water Sci. Technol*, vol. 44, No. 8, pp. 107-113, 2001.
- [17] Y. Liu, H.L., Xu, K.Y. Show and J.H. Tay, Anaerobic granulation technology for wastewater treatment. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 18, No. 2, pp. 99-113, 2002.
- [18] M. Tiwari, S. Guha and C. Harendranath, Enhanced granulation in UASB reactor treating low-strength wastewater by natural polymers. *Water Science and Technology*, vol. 50, No. 6, pp. 235-240, 2004.
- [19] M. Tandukar, A. Ohashi and H. Harada, Performance comparison of a pilot-scale UASB and DHS system and activated sludge process for the treatment of municipal wastewater. *Water Research*, vol. 41, No. 12, pp. 2697-2705, 2007.
- [20] C. Chernicharo, Anaerobic Reactors, *Biological Wastewater Treatments Series*, vol. 4, IWA Publishing, pp. 175, 2007.
- [21] S. Aiyuk, J. Amoako, L. Raskin, A. van Haandel and W. Verstraete, Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. *Water Research*, vol. 38, No.13, pp. 3031-3042, 2004.
- [22] S. Aiyuk, I. Forrez, D.K. Lieven, A. van Haandel, W. Verstraete, Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates: A review. *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 17, pp 2225-2241, 2006.
- [23] R. Escalera. Formación de gránulos anaerobios sin lodos inoculados en un reactor de biopelícula anaerobia tipo intercambiador de calor (RBAIC). *Investigación & Desarrollo*, Vol. 1, No. 12, pp. 48 – 56, 2012

- [24] M. M. Powar, V.S. Kore, S.V. Kore and G.S. Kulkarni, Review on Applications of UASB Technology for Wastewater Treatment. *International Journal of Advanced Science, Engineering and Technology*. vol. 2, no. 2, pp. 125-133, 2013.
- [25] R. Escalera. Reactor de Biopelícula Anaerobia Tipo Intercambiador de Calor (RBAIC). *Investigación & Desarrollo*, vol.1, No. 4, pp. 58-68, 2004.
- [26] F. E. Mosey. "Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process. Regulatory Mechanisms for the Formation of Volatile Fatty Acids from Glucose", *Water Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 209, 1983.
- [27] J. G. Zeikus. "Microbial Populations in Digestors," in *Anaerobic Digestion*, Applied Science Publishers, London, pp. 61-90, 1980.
- [28] J. G. Zeikus. "Chemical and Fuel Production by Anaerobic Bacteria", *Ann. Rev. Microbiol.*, vol. 34, pp. 423-464, 1980.
- [29] L. Seghezzi, G. Zeeman, J.B. van Lier, H.V.M. Hamelers and G. Lettinga, A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology*, vol. 65, pp. 175-190, 1998.
- [30] J.T. de Sousa, A. C. van Haandel, A and A. V. Guimaraes, Posttreatment of anaerobic effluents in constructed wetland systems. *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 4, pp. 213-219, 2001.
- [31] G. Kassab, M. Halalsheh, A. Klapwijk, M. Fayyad and J. B. van Lier, Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater - A review. *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 10, pp. 3299-3310, 2010.
- [32] A.A. Khan, R.Z. Gaur, V.K. Tyagi, A. Khurshed, B. Lew, I. Mehrotra and A. A. Kazmi, Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 12, pp. 1232-1251, 2011.
- [33] Y.J. Chan, M.F. Chong, C.L. Law and D.G. Hassell, A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, vol. 155, no. 1-2, pp. 1-18, 2009.
- [34] G. Lettinga, R. Roersma, P. Grin, W. de Zeeuw, L. Hulshof Pol, L. van Velsen, S. Hobma, and G. Zeeman, Anaerobic treatment of sewage and low strength waste wasters. *Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion*, Travemunde, Germany, Eds. Hughes *et al.*, pp. 271-291, 1981.
- [35] G. Lettinga, R. Roersma and P. Grin, Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor *Biotechnology and Bioengineering*, vol.25, pp.1701-1723, 1983.
- [36] X. A. Fernandes, A. D. Cantwell and F. E. Mosey, Anaerobic biological treatment of sewage. *Water Pollution Control*, vol.84, pp. 99-110, 1985.
- [37] A. W. A. de Man, P. C. Grin, R. E. Roersma, K. C. F. Grolle and G. Lettinga, Anaerobic treatment of municipal wastewater at low temperatures. Anaerobic treatment. A grown-up technology. Conference papers (Aquatech '86), Amsterdam, 1986, pp. 451-466.
- [38] R. A. Barbosa and G. L. Jr. Sant'Anna, Treatment of raw domestic sewage in an UASB reactor. *Water Research*, Vol. 23, No.12, pp.1483-1490, 1989.
- [39] K. Wang, Integrated anaerobic and aerobic treatment of-sewage. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1994.
- [40] Haskoning Consulting Engineers and Architects. 36 MLD UASB treatment plant in Kanpur, India. Evaluation report on process performance. Internal report, 1996.
- [41] Haskoning Consulting Engineers and Architects. 14 MLD UASB treatment plant in Mirzapur, India. Evaluation report on process performance. Internal report, 1996
- [42] A. Schellinkhout, and C. J. Collazos, Full-scale application of the UASB technology for sewage treatment, *Water Science and Technology*, vol.25, no. 7, pp. 159-166, 1992.
- [43] A. Schellinkhout and E. Osorio, Long-term experience with the UASB technology for sewage treatment on large scale. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Anaerobic Digestion*, Cape Town, South Africa, pp. 251-252, 1994.
- [44] Empresa Pública de Alcantarillado de Santander S.A. E.S.P (EMPAS). Plan Estratégico de Gestión de EMPAS S.A., Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [45] Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO) & Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). Sistematización sobre tratamiento y reuso de aguas residuales. *Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO), el Programa para Servicios Sostenibles de Agua Potable y Saneamiento en Áreas Periurbanas (PERIAGUA)*, La Paz, Bolivia, 2013.
- [46] AguaTuya (AT). Datos de Monitoreo y diseño PTARs Cochabamba y Tarija, Cochabamba, Bolivia, 2017.
- [47] K. K. Gangesh, M. Neha and R. B. Vijay, Optimization of Municipal Wastewater Treatment by UASB Reactor and Polishing Pond, *Biolife*, vol. 1, No. 4, 2013.