

EVALUACIÓN DEL SISTEMA UASB - LAGUNA PARCIALMENTE AIREADA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO EL MAGUEY, PUERTO LA CRUZ, VENEZUELA

UASB - PARTIAL AERATED LAGOON SYSTEM EVALUATION IN THE TREATMENT PLANT EL MAGUEY, PUERTO LA CRUZ, VENEZUELA

ANA GHANEM^{1,3}, JOSEFINA CARMONA², PETRA RODRÍGUEZ^{2,3}, ALEXIS MUÑOZ^{2,3}

Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, ¹Departamento de Ingeniería Civil, ²Departamento de Ingeniería Química, ³Centro de Estudios Ambientales, Barcelona, Venezuela
E-mail: ana_ghanem@hotmail.com

RESUMEN

Se evaluó el funcionamiento de los reactores UASB y la laguna parcialmente aireada en la planta de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico de la ciudad de Puerto La Cruz, Venezuela, entre el 01 de abril y el 11 de junio de 2013. Para este propósito, se midieron algunos parámetros físico-químicos y bacteriológicos, aplicando técnicas de muestreo y pruebas de laboratorio estandarizados. Durante el año 2012, se registró un caudal promedio de 667,20 L/s, comprendido en un intervalo de 101,20 a 1.346,04 L/s, siendo el caudal de diseño 1.200,00 L/s. Algunos valores promedio obtenidos para el afluente de los reactores UASB y el efluente de la laguna fueron, respectivamente: DQO, 251,12 y 179,59 mg/L; DBO_{5,20}, 80,81 y 46,90 mg/L; y SST, 67,48 y 60,76 mg/L. Se encontró que la temperatura y el pH en los reactores UASB estaban dentro del intervalo óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana. La remoción de coliformes totales en la laguna fue insignificante, mientras que la remoción de la DQO y DBO_{5,20} fue de 11,39% y 13,79%, respectivamente. Los porcentajes de remoción en el sistema combinado de reactores UASB-Laguna fueron los siguientes: DQO, 28,48%; DBO_{5,20}, 41,96%; SST, 9,96%, lo que significa un comportamiento deficiente. Esto se debió a que los reactores UASB estaban trabajando en condiciones de operación y mantenimiento deficientes, además de presentar deterioro en sus instalaciones. En el caso de la laguna, se encontró un diseño inapropiado. Para mejorar el funcionamiento del sistema, se plantearon algunas acciones preventivas y correctivas.

PALABRAS CLAVE: Reactor anaeróbico, aireación, tratamiento anaeróbico, tratamiento biológico, remoción de coliformes.

ABSTRACT

The functioning of the UASB reactors and partial aerated lagoon were evaluated in a municipal wastewater treatment plant at the city of Puerto La Cruz, Venezuela between April 01 and July 11, 2013. For this purpose, some physicochemical and bacteriological parameters were measured by applying standardized sampling techniques and laboratory tests. A mean flow of 667.20 L/s was registered during the year 2012, in a range from 101.20 to 1346.04 L/s, being the design flow 1200.00 L/s. Some average values obtained from the UASB reactors affluent and lagoon effluent were, respectively: COD, 251.12 and 179.59 mg/L; BOD_{5,20}, 80.81 and 46.90 mg/L; and TSS, 67.48 and 60.76 mg/L. Temperature and pH in the UASB reactors were found within an optimal range for bacterial growth. Total coliform removal in the lagoon was negligible, while COD and BOD removal were 11.39% and 13.79%, respectively. For the combined system UASB-Lagoon, percentages of removal were as follow: COD, 28.48%; BOD_{5,20}, 41.96%; TSS, 9.96%, which means a deficient performance. This was due to deficient operation and maintenance conditions of the UASB reactors, besides of being deteriorated. In the case of the lagoon, the design was found inappropriate. Some preventive and corrective actions were proposed to improve the system functioning.

KEY WORDS: anaerobic reactor, aeration, anaerobic treatment, biological treatment, coliforms removal.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, algunos países en vías de desarrollo están utilizando sistemas combinados de reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) seguidos de lagunas de maduración o lagunas parcialmente aireadas para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico o industrial. Hasta los momentos se han tenido buenos resultados en lo que respecta a esta tecnología en países como por ejemplo, Colombia (Hagan *et al.* 2001) y

Brasil (Sandino y Yee-Batista 2000). En el caso de Venezuela, este sistema fue implementado en la planta de tratamiento El Maguey para tratar las aguas residuales municipales de la ciudad de Puerto la Cruz, como parte de un Programa de Saneamiento Ambiental para el Litoral Costero-Oriental, del Ministerio del Ambiente, a través de la Unidad Ejecutora de Saneamiento Ambiental (UESA). Esta planta se encuentra ubicada en el municipio Juan Antonio Sotillo del estado Anzoátegui, en un área de terreno de 25 Ha, adyacente a la laguna El Maguey

entre los sectores Bello Monte y Molorca (Fig. 1). Se localiza entre las siguientes coordenadas: 1.126.710,30 N - 1.127.191,88 N y 319.000,00 E – 319.572,16 E. Las principales características climatológicas de la zona son las siguientes: temperatura media anual de 26,6°C;

precipitación media anual de 635 mm; evaporación media anual de 1.500 mm. Fue inaugurada en el mes de noviembre del año 2003. A partir del año 2007, la planta está siendo operada por la empresa C.A. Hidrológica del Caribe (HIDROCARIBE).

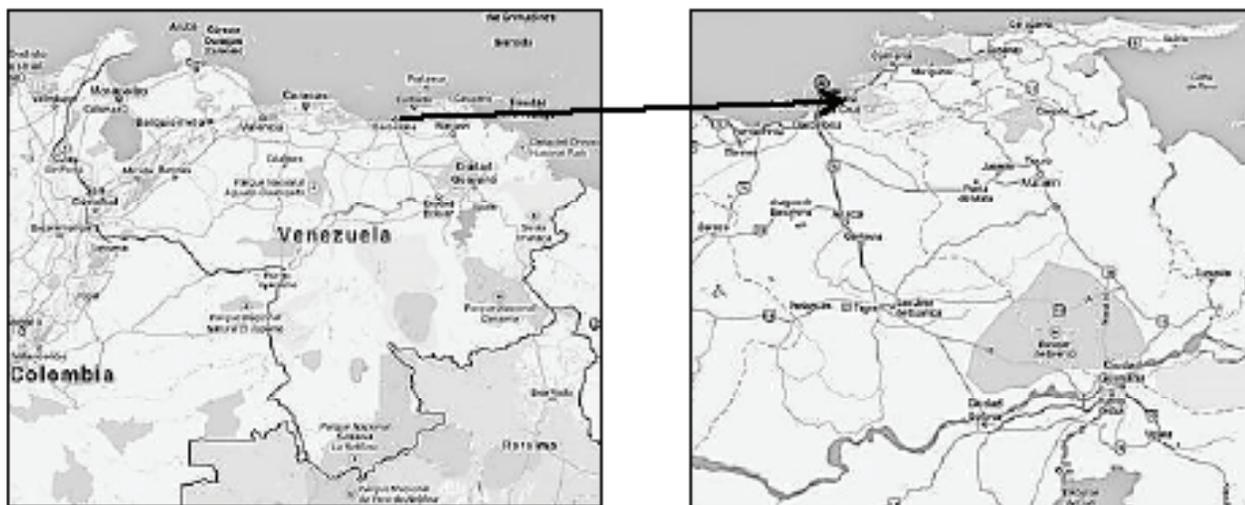


Figura 1. Ubicación de la planta de tratamiento El Maguey (Fuente: Google™ Earth 2013).

Descripción del sistema

La planta de tratamiento El Maguey, fue diseñada con base en los siguientes parámetros: caudal medio 1.200,00 L/s, caudal máximo 1.420,00 L/s, demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$) 185,00 mg/L, demanda química de oxígeno (DQO) 370,00 mg/L, carga orgánica en lagunas 800,00 Kg $DBO_{5,20}$ /Ha-d, sólidos suspendidos totales (SST) 230,00 mg/L, nitrógeno total (NT) 30,00 mg/L, fósforo total (PT) 14,00 mg/L (Gauff Ingenieure 1994). Las aguas servidas que llegan a esta planta provienen de cuatro estaciones de bombeo: Simón Rodríguez, Los Boquetitos, Bello Monte y Gran Maguey. El sistema de tratamiento consta básicamente de un tratamiento preliminar, un tratamiento secundario biológico, una descarga submarina, un sistema de tratamiento de lodos, gasómetro y obras complementarias.

El tratamiento preliminar (tratamiento físico), se fundamenta en un sistema de tres canales que conducen el agua hacia un mecanismo de cribado de tres rejillas, en el cual una vez removidos los sólidos, éstos son sometidos a un proceso prensado adyacente con el fin de reducir su volumen. Luego de las rejillas, existe una Canaleta Parshall para la medición del caudal de entrada mediante un mecanismo de ultrasonido. El agua pasa luego a un proceso de desarenación y desnatación en el cual son removidas las arenas, grasas y aceites.

El tratamiento secundario (biológico) consiste de cuatro reactores UASB, trabajando en paralelo, básicamente para la remoción de la carga orgánica y sólidos suspendidos. Estos reactores tienen forma cilíndrica y fueron diseñados para remover el 68% de la $DBO_{5,20}$. El efluente de los UASB es conducido a un sistema de dos lagunas de pulimento trabajando en serie, cuya función es mejorar la calidad del mismo antes de su descarga al mar. De estas lagunas, la primera es parcialmente aireada y la segunda es de maduración (Fig. 2).



Figura 2. Disposición de las unidades para el tratamiento biológico de la planta El Maguey: (a) reactores UASB, (b) laguna parcialmente aireada, (c) laguna de maduración (Fuente: Google™ Earth 2013).

Tabla 1. Características de sistema UASB-laguna del tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales El Maguey ^(a).

Unidad No	Tipo	Área superficial (m ²)	Profundidad efectiva (m)	Volumen efectivo (m ³)
1, 2, 3, 4	UASB	1.319,00 c/u	4,50 c/u	5.937,00 c/u
5	Laguna parcialmente aireada	37.949,00	2,00	77.069,00

^(a) Las áreas y volúmenes fueron tomados de la referencia Dessau Soprin (2006).

En la Tabla 1, se muestran las características generales del tratamiento secundario. En la laguna parcialmente aireada, se aporta el oxígeno necesario al agua mediante una serie de aireadores superficiales para mantener condiciones aeróbicas y para el tratamiento complementario de la materia orgánica, además de la oxidación del H₂S que se encuentra diluido en las aguas residuales procedentes de los reactores UASB, generado por los procesos anaeróbicos. En ella existen tres celdas separadas por muros directrices para evitar corrientes de cortocircuito y garantizar el flujo pistón.

Los aireadores instalados en la primera laguna son cuatro, marca Aquaturbo Systems, INC, modelo AER-AS 5500-20, potencia de 75 HP, eficiencia 92,4% y capacidad de transferencia de 1,46 Kg/KW-h en condiciones estándar (10°C y 760 mm Hg), ubicados de la siguiente manera: dos en la primera celda y uno en cada una de las celdas siguientes. La laguna de maduración recoge el efluente de la laguna parcialmente aireada, sus funciones son: servir como unidad de sedimentación, remover los coliformes y en forma complementaria: la remoción adicional de la DBO_{5,20}, nitrógeno y fósforo. Contiene cuatro celdas, separadas por muros divisorios.

Una vez tratadas las aguas, el efluente de la laguna de maduración descarga a una estación de bombeo de pozo seco y pozo húmedo. En el pozo seco existen cuatro bombas para descargar el efluente al mar por bombeo, mediante una tubería de impulsión de 2.200 m de longitud hasta la costa y una descarga submarina de 1.800 m medida desde la orilla de la playa, con un diámetro de 1.200 mm. Adyacente al pozo húmedo, existe un canal de rebose que sirve para descargar las aguas desde el mismo hacia la laguna El Maguey, en caso de emergencia.

Los gases producidos en los UASB, son captados en la parte superior de los mismos y conducidos a través de tuberías hasta un gasómetro de aproximadamente 200 m³ de capacidad, en el cual son almacenados para luego ser enviados a los quemadores de gas.

Los lodos excedentes generados en los UASB, son extraídos y conducidos mediante presión hidrostática a

través de un sistema de tuberías hasta un tanque espesador de lodos con una capacidad aproximada 200 m³, para reducir su contenido de agua. El agua decantada en el espesador es descargada mediante un sumidero hasta una estación de bombeo de agua turbia y de allí conducida hasta la entrada de los desarenadores. El lodo espesado es bombeado hacia tres lechos de secado, cada uno de 1.300 m³ de capacidad aproximadamente, los cuales una vez deshidratados, se recogen para su disposición final. El agua decantada (turbia) de los lechos, es conducida en caída libre hacia el pozo de agua turbia.

Antecedentes

Durante el inicio de las operaciones de la planta El Maguey, Bravo (2004) realizó un análisis de su funcionamiento. De acuerdo con esa investigación, la planta estaba operando a 63% de su capacidad y las características del efluente cumplían con los límites máximos establecidos en las normas para el control de efluentes del MARNR (1995), publicadas en Gaceta Oficial N° 5.021, exceptuando los coliformes. También encontró que los tiempos de retención hidráulicos en las lagunas resultaron menores que los recomendados por Metcalf & Eddy (1991). La eficiencia global de la planta fue aceptable según los datos señalados, aunque se observó que el reactor UASB 1 y la primera laguna presentaban una eficiencia baja. Debido a que en el agua residual cruda de la ciudad de Puerto la Cruz, Bravo encontró una DBO_{5,20} baja (151,50 mg/L en promedio), el manto de lodos en los reactores UASB no se había formado en su totalidad, por lo que la eficiencia del proceso anaeróbico no era aún tan alta como se esperaba.

González *et al.* (2006), realizaron un estudio donde se recomendó: elaborar un manual que incluyera un programa de muestreo para el control de calidad del proceso de tratamiento y realizar una evaluación detallada del progreso de tratamiento en las lagunas a fin de determinar las posibles mejoras que se pudieran aplicar al respecto y estudiar las alternativas para implementar un proceso de tratamiento adicional con el propósito de mejorar la calidad del efluente en cuanto a la concentración de coliformes y otros parámetros de importancia en el caso de querer

reutilizar el agua para riego de áreas verdes.

Para resolver algunos de los problemas descritos anteriormente, la empresa canadiense Dessau Soprin (2006) realizó un estudio para el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN) en el cual se propuso la implementación de un sistema de aireación en la primera laguna de maduración. La construcción de ese sistema se cumplió en el año 2008. Después de los trabajos mencionados anteriormente, hasta el año 2012, no se había realizado una evaluación de la planta, por lo que aún persisten algunos de los problemas encontrados desde el inicio de sus operaciones.

Actualmente, la planta El Maguey carece de un laboratorio de control de calidad de los procesos de tratamiento, por lo que los análisis físico-químicos y bacteriológicos del agua se realizan en laboratorios privados, lo cual resulta costoso y en consecuencia, el programa de muestreo se realiza en forma esporádica. Esta situación no permite que se lleve a cabo un control del tratamiento biológico, por lo tanto, impide detectar problemas de operación que se puedan presentar, tomar medidas de control y ajuste de los mismos, y garantizar la producción de un efluente con las características exigidas por la normativa ambiental vigente, publicada en Gaceta Oficial N° 5.021 (MARNR 1995).

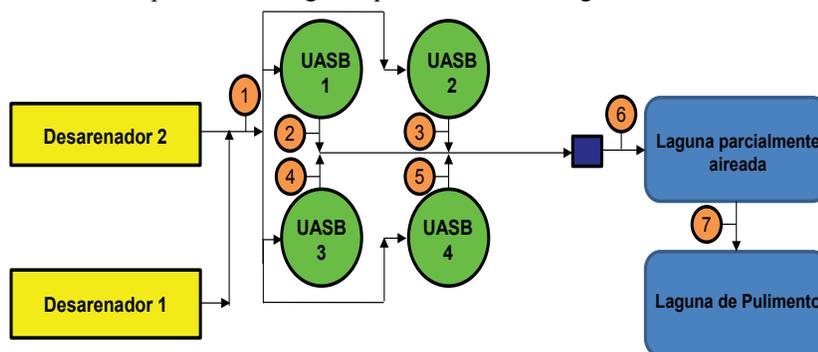
Adicionalmente, la planta carece de un programa adecuado de operación y mantenimiento que permita detectar cualquier falla en el funcionamiento de los procesos de tratamiento. La anterior aseveración se debe, en parte, a que la empresa operadora HIDROCARIBE no cuenta con los recursos necesarios para llevar a cabo un programa de evaluación continua que le permita valorar el funcionamiento de los procesos biológicos que

allí se realizan. En este tránsito de responsabilidades, el mantenimiento y la operación de las unidades diseñadas para el tratamiento de estas aguas han sido relegadas y su importancia minimizada.

Con el fin de observar los problemas existentes en cada uno de estos sistemas, los autores de esta investigación realizaron visitas técnicas al sitio de tratamiento junto con el personal de HIDROCARIBE, para elaborar una propuesta de mejoras que sirviera de base para el establecimiento de las acciones correctivas a esta situación no deseada. El propósito de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de los procesos biológicos de la planta El Maguey y detectar los problemas existentes en cada uno de ellos, para recomendar las acciones que se deben llevar a cabo a fin de garantizar el buen funcionamiento de los mismos, operándolos de manera efectiva y por ende, cumpliendo con las leyes ambientales existentes en nuestro país que regulan la descarga de efluentes líquidos a los cuerpos de agua, específicamente al medio marino-costero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización del agua residual afluyente y efluente del sistema UASB-Laguna parcialmente aireada implicó un programa de muestreo comprendido desde el 01/04/2013 al 11/06/2013. Los parámetros físicos, químicos y biológicos analizados fueron: temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos sedimentables (SS), pH, nitrógeno total (NT), ortofosfatos (PO_4^{+3}), aceites y grasas (A y G), oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$) y organismos coliformes totales (CT). Los puntos de muestreo fueron ubicados según se observa en la Figura 3.



Puntos de Muestreos	Ubicación
1	Entrada reactores UASB
2,3,4,5	Salida reactores UASB
6	Entrada laguna parcialmente aireada
7	Salida laguna parcialmente aireada

Figura 3. Puntos de muestreo del tratamiento biológico.

Por razones presupuestarias, la toma de muestras se realizó una vez por semana durante 10 semanas consecutivas, en los puntos de muestreo indicados, consistiendo en: *a)* muestras simples puntuales para los parámetros T, pH, CE y OD; *b)* muestras tomadas a las 8:00 am y 12:00 m para formar una muestra compuesta para el resto de los parámetros. El horario seleccionado para la toma de muestras fue considerado debido a la disponibilidad del personal que trabaja en la planta así como también por razones de seguridad. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Estudios Ambientales de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, siguiendo los criterios y procedimientos recomendados en los métodos estándares (APHA, AWWA, WEF 1998) para la selección de los tipos y número de muestras, recolección, manejo, preservación y transporte de las mismas. Adicionalmente, se recopiló información suministrada por el operador de la planta, sobre la medición diaria del caudal de entrada realizado durante el año 2012, debido a que durante el período de muestreo no se pudo registrar este dato por problemas de operación del medidor de flujo.

A los resultados obtenidos, se les aplicó un análisis estadístico para obtener la media aritmética, desviación estándar, valores máximos y mínimos. Los valores promedio se utilizaron para compararlos con los parámetros de diseño y observar el comportamiento de cada uno de los componentes del tratamiento biológico. Para la evaluación operacional de los reactores UASB, se verificó el tiempo de retención hidráulico y la velocidad de ascenso en cada uno de ellos, de acuerdo a sus dimensiones, utilizando las ecuaciones recomendadas por Lettinga y Van Haandel (1994). En cuanto a la laguna parcialmente aireada, se compararon las condiciones actuales con las de diseño. El tiempo de retención hidráulico, se calculó dividiendo el volumen efectivo de la laguna entre el caudal promedio. En cuanto a la estimación de la cantidad de lodos producidos, demanda de oxígeno, capacidad de transferencia de oxígeno, rendimiento y potencia requerida de los aireadores, se asumió un comportamiento similar al proceso de lodos activados tal como se establece en Metcalf & Eddy (1991). También se tomaron en cuenta otras consideraciones recomendadas por Gutiérrez y Pérez (2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Situación actual de la planta

De las visitas de campo realizadas a la planta se pudo observar que actualmente la planta El Maguey presenta un estado de deterioro por las siguientes razones:

- a)* La labores de operación y mantenimiento son inadecuados en la mayoría de las instalaciones, motivado a un presupuesto deficiente y falta de personal entrenado para realizar estas labores.
- b)* El registro de los caudales de entrada es realizado en forma manual y no existen archivos digitalizados que permitan una visión general en forma gráfica de su comportamiento.
- c)* El laboratorio no está operativo debido a que sus instalaciones carecen de materiales, equipos y reactivos para la realización de los ensayos y control de los procesos.
- d)* Uno de los desarenadores se encuentra fuera de servicio.
- e)* El espesador de lodos y gasómetro se encuentran fuera de servicio.
- f)* Los reactores UASB poseen alto nivel de corrosión y equipos de medición dañados, siendo el UASB 3 el más deteriorado.
- g)* El último aireador de la laguna 1 se encuentra fuera de servicio. En esta laguna el agua es de color gris oscuro y presenta además gran acumulación de lodos, lo que indica un bajo nivel de oxígeno disuelto.
- h)* La laguna 2 presenta acumulación de material flotante, despide malos olores y el color de sus aguas es gris oscuro, lo que indica que presenta condiciones sépticas.
- i)* En ambas lagunas, el borde superior de los muros directrices se encuentra por debajo del nivel superior del agua, por lo que no se produce el flujo pistón.
- j)* El efluente de la laguna 2 presenta una gran cantidad de espumas.

Caudal de entrada

De los registros de las mediciones realizadas por el personal que opera la planta, durante el año 2012, el caudal promedio anual calculado fue de 667,20 L/s. El valor promedio mínimo mensual fue de 101,20 L/s para el mes de septiembre y un máximo de 1.346,04 L/s para el mes de diciembre. El caudal promedio mensual fue de 675,61 L/s. En la Tabla 2 se muestran los resultados mensuales calculados con base en los registros. El análisis

del caudal promedio anual que está entrando en la planta permitió constatar que está funcionando con una capacidad aproximada del 55,6 % respecto al caudal promedio de diseño.

Parámetros físicos

Entre la entrada de los reactores UASB y la salida de la laguna aireada se observó una temperatura promedio del agua de 30,25°C, ideal para el desarrollo de la actividad microbiana. En cuanto a la conductividad eléctrica, esta tuvo una variación entre un mínimo de 226,00 mS/cm a la salida del reactor UASB 4 y un máximo de 1.114,29 mS/cm a la salida de la laguna, siendo el valor promedio

en todo el sistema de 748,57 mS/cm. Este valor máximo significa un incremento en la concentración de los sólidos disueltos totales.

En la Figura 4, se observa una disminución en la concentración de los SST desde la entrada al sistema UASB (67,48 mg/L) hasta la salida de los reactores, encontrándose el menor valor en el reactor UASB 3 (26,71 mg/L). Sin embargo, existe un aumento significativo a la salida de la laguna con un valor de 60,76 mg/L. Esto se debe a la gran cantidad de biomasa que se produce durante el proceso de aireación en la laguna, la cual escapa del sistema por no haber una buena sedimentación después de este proceso.

Tabla 2. Caudales afluentes calculados durante el año 2012

Mes	Caudal promedio mensual (L/s)	Caudal máximo mensual (L/s)	Caudal mínimo mensual (L/s)
Enero	598,20	740,20	253,60
Febrero	703,10	969,60	422,00
Marzo	685,23	922,10	130,50
Abril	629,22	897,30	267,50
Mayo	584,74	867,00	253,60
Junio	654,86	965,00	148,00
Julio	718,26	1027,00	154,00
Agosto	730,73	991,00	421,00
Septiembre	722,62	1113,00	101,20
Octubre	777,16	1165,00	104,50
Noviembre	737,85	1309,50	104,30
Diciembre	565,33	1346,04	161,50

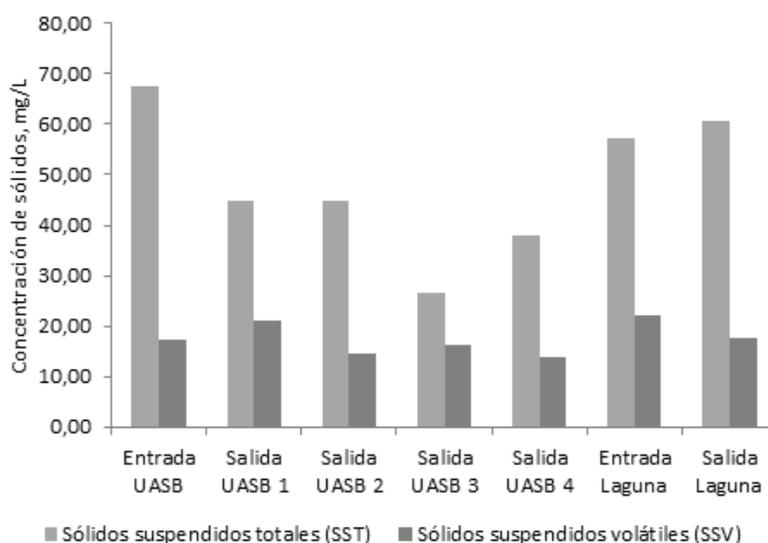


Figura 4. Concentración promedio de sólidos en el sistema UASB-laguna.

La concentración de los SSV se mantuvo en el sistema UASB entre un máximo de 21,18 mg/L a la salida del reactor UASB 1 y un mínimo de 13,88 a la salida del reactor UASB 4. No se observó una variación significativa de este parámetro en el sistema UASB-laguna entre 17,12 mg/L la entrada al sistema UASB y la salida de la laguna 17,60 mg/L (Fig. 4). Los sólidos sedimentables tuvieron una variación desde 0,49 mL/L en la entrada del sistema UASB hasta 0,10 mL/L en la salida de la laguna.

Parámetros químicos

El valor del pH se mantuvo en un rango promedio de 6,4 a 7,1, observándose estos valores en el reactor UASB 3 y a la entrada del sistema UASB, respectivamente. En el efluente de la laguna, el valor promedio encontrado fue de 7,0. La concentración promedio del NT varió entre 23,89 mg/L a la entrada del sistema UASB y 19,13 mg/L a la salida de la laguna. En cuanto al PO_4^{+3} , se observó una variación entre 1,22 mg/L a la entrada del sistema UASB y 1,50 mg/L a la salida de la laguna, el menor valor reportado

fue de 0,74 mg/L a la salida del reactor UASB 2. Se asume que el incremento en la concentración de este parámetro a la salida de la laguna se debe a la cantidad de materia orgánica que se mineraliza a fósforo soluble durante el proceso de estabilización. Respecto a los A y G hubo una disminución entre la entrada al sistema UASB y la salida de la laguna con valores promedio de 83,67 mg/L y 14,72 mg/L respectivamente.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la variación en la concentración del OD. El valor promedio medido a la entrada del sistema UASB fue de 1,51 mg/L mientras que a la salida de la laguna fue de 0,83 mg/L. Es importante señalar que aunque la laguna es parcialmente aireada, hubo un ligero incremento en la producción de SSV tal como se explicó previamente. Los SSV son un indicador de la concentración de biomasa, lo que pudiera ser la causa de que la concentración de OD sea tan baja en ese punto, significando que la laguna no está operando en condiciones óptimas en cuanto al control de la concentración de lodos a la salida del sistema.

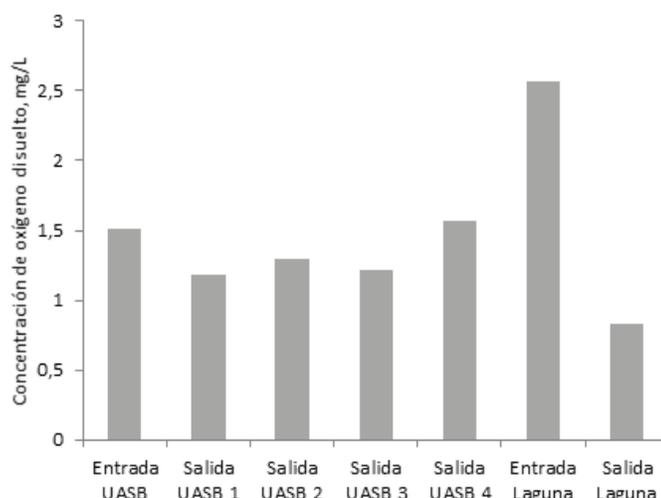


Figura 5. Concentración promedio de OD en el sistema UASB-laguna.

Las variaciones de la DQO y $\text{DBO}_{5,20}$ se presentan en la Figura 6. Allí se observa que en ambos parámetros hubo una disminución de los valores entre la entrada y la salida del sistema UASB-laguna, desde 251,12 mg/L hasta 179,59 mg/L para la DQO y 80,81 mg/L hasta 46,90 mg/L para la $\text{DBO}_{5,20}$, respectivamente. Sin embargo, para ambos parámetros esta disminución no fue muy significativa. En cuanto al comportamiento general de los reactores UASB se observó una disminución de DQO, excepto para el reactor UASB 4 que tuvo un incremento de este parámetro el día 09/04/2013 lo que indica muy poca capacidad de remoción de materia orgánica (cabe mencionar que este fue el primer reactor en salir fuera de servicio a finales

del mes de abril). El reactor UASB 3 fue el que reportó el menor valor de la DQO (132,74 mg/L).

La relación $\text{DBO}_{5,20}/\text{DQO}$ estuvo comprendida entre 0,25 y 0,40, la cual se encuentra por debajo del rango típico de 0,45 a 0,68 para aguas residuales domésticas, lo que puede significar que las aguas residuales afluentes a la planta contienen una alta concentración de materia orgánica no biodegradable o poca concentración de materia orgánica biodegradable. Si se toman en cuenta los valores de diseño de la $\text{DBO}_{5,20}$ y DQO para la planta El Maguey (370,00 y 185,00 mg/L respectivamente), la relación $\text{DBO}_{5,20}/\text{DQO}$ es de 0,50, por lo que se puede

concluir también que estas aguas son de baja concentración orgánica. Es importante señalar que para mediados del mes de mayo comenzó la época de lluvia, esto pudo ser la causa de una disminución significativa en el proceso biológico en general, observada en los resultados de los análisis de laboratorio, debido a la dilución del agua residual.

Parámetros biológicos

El valor promedio de los CT en el afluente y el efluente de la laguna parcialmente aireada, fue de $1,6 \times 10^5$ NMP/100 mL, lo que indica que no hubo remoción de coliformes.

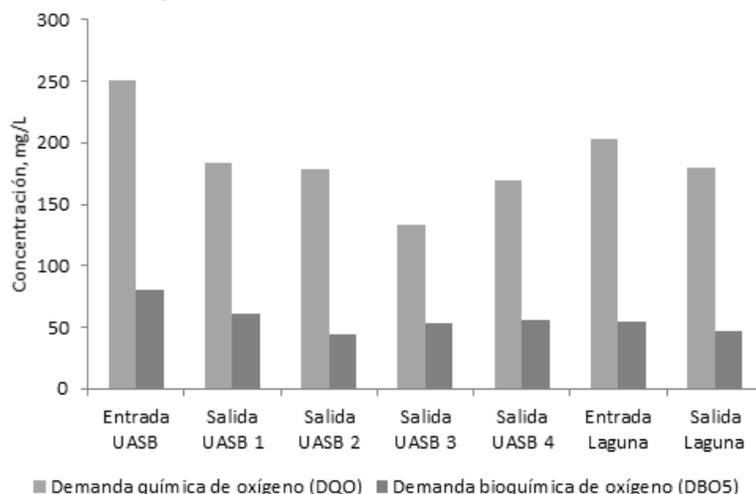


Figura 6. Concentración promedio de la DQO y DBO_{5,20} en el sistema UASB-laguna.

Comportamiento del sistema UASB

Con base en el caudal promedio anual, el tiempo de retención hidráulico (TRH) para los reactores UASB fue de 9,88 h, el cual concuerda con el especificado en el diseño entre 5 y 10 h (Dessau Soprin 2006). Según Lettinga y Van Haandel (1994), la velocidad ascendente no debe exceder 1 m/h, el valor calculado fue de 0,46 m/h. En el sistema UASB, los porcentajes de remoción obtenidos se muestran en la Tabla 3. Se observaron mayores remociones de DQO y SST del orden del 47,14 y 60,42% respectivamente, específicamente en el reactor UASB 3. El mayor porcentaje en cuanto a remoción DBO_{5,20} fue reportado en el reactor UASB 2 con un valor de 45,16%. Estos resultados indican un rendimiento bajo con respecto a los valores recomendados en la literatura y a los de diseño calculados en un 68,00% (Gauff Ingenieure 1994).

Tabla 3. Porcentajes de remoción en el sistema UASB.

Reactor	% de remoción DQO	% de remoción DBO _{5,20}	% de remoción SST
UASB 1	26,71	25,02	33,46
UASB 2	28,83	45,16	33,67
UASB 3	47,14	34,28	60,42
UASB 4	32,55	31,10	44,01
% Promedio	33,81	33,89	42,89

Comportamiento de la laguna

En la Tabla 4 se muestran las condiciones actuales de la laguna calculadas con base en el caudal promedio anual

de 57.646,08 (667,20 L/s) y a las mediciones realizadas. El TRH de 1,37 días resulta ser muy pequeño para este tipo de laguna, los valores mínimos recomendados en la literatura varían entre 3 y 10 días (Metcalf & Eddy 1991, US EPA 2002), lo que significa que el volumen actual de la laguna (77.069,00 m³) no es suficiente para cumplir con este requerimiento. Para un tiempo de retención de 3 días y el caudal de diseño, se requiere un volumen de 311.040,00 m³, lo que indica que la laguna debería ser ampliada, este valor también fue recomendado por Dessau Soprin (2006). Adicionalmente, basado en las condiciones actuales, se obtuvo un requerimiento de ocho aireadores de 75 HP de capacidad cada uno. Sin embargo, debido a las dimensiones actuales de esta laguna y a la falta de espacio físico para su completa ampliación, los ocho aireadores no pueden ser instalados.

Tabla 4. Condiciones actuales de la laguna parcialmente aireada.

Variable	Valor calculado
Tiempo de retención hidráulico (TRH), d	1,37
Producción de lodos (P_x), Kg/d	253,62
Demanda de oxígeno (DO), Kg/d	1.143,53
Potencia requerida (P_u), HP	600
Número de aireadores requeridos	8 de 75 HP c/u

En cuanto a la eficiencia de la laguna, los porcentajes de remoción calculados fueron: 11,39% para la DQO,

13,79% para la $DBO_{5,20}$ y -6,74% para los SST. Este último valor resultó ser negativo debido al aumento en la concentración de este parámetro en la salida de la laguna con respecto al valor medido en la entrada. Otro aspecto importante son los malos olores presentes en la laguna, los cuales pudieran originarse debido exceso de lodos acumulados dentro del sistema, producidos por la aireación, los cuales al descomponerse disminuyen el nivel de OD, generando condiciones anaeróbicas. Esto también se observa en el color gris oscuro del agua en la laguna y la presencia de pocas algas.

Comportamiento del sistema combinado UASB-laguna

En el sistema combinado los porcentajes de remoción para la DQO, $DBO_{5,20}$ y SST fueron respectivamente 28,48%, 41,96% y 9,96%, lo que indica que en la laguna no existe una remoción significativa para estos tres parámetros si se comparan con el promedio mostrado en la Tabla 3 para los reactores UASB. Por el contrario, la eficiencia disminuye considerablemente en cuanto a los SST ya que existe un incremento en la concentración de los mismos al pasar por el proceso de aireación y por no haber una sedimentación adecuada en la laguna. En el sistema combinado no se observó una remoción significativa de coliformes.

CONCLUSIONES

El caudal promedio registrado durante el año 2012 equivale al 55,6% del valor de diseño de la planta, lo indica que su capacidad actual es suficiente para tratar las aguas residuales afluentes.

Aunque la planta está trabajando por debajo de su capacidad de diseño, la eficiencia promedio obtenida para la remoción de la materia orgánica en los reactores UASB está por debajo de los valores reportados en la literatura para este tipo de tratamiento. De aquí se concluye que el deterioro de los reactores y la ausencia de una buena operación y mantenimiento pueden ser las causas de su baja eficiencia. Otra causa podría ser la baja carga orgánica del agua residual cruda que entra a la planta. Sin embargo, los valores obtenidos para la temperatura, pH, tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de ascenso (V_a) se encuentran en el rango óptimo para el desarrollo y supervivencia de la actividad bacteriana.

A pesar de las condiciones descritas anteriormente, se puede afirmar que los reactores UASB como tratamiento biológico son una buena opción cuando se requieren disminuir costos de operación y mantenimiento comparado con otras opciones de tratamiento convencionales, pero es

necesario un mantenimiento periódico y una operación adecuada para garantizar su eficiencia.

La laguna parcialmente aireada no tiene suficiente capacidad en cuanto a su volumen para tratar el efluente del sistema UASB, ni está operando en forma eficiente debido a que los aireadores instalados, además de ser insuficientes en número, están generando una cantidad de lodos que se acumulan dentro de la misma por la carencia de un área para la sedimentación de los mismos, posterior a la aireación.

Los resultados obtenidos en cuanto al diseño y evaluación del sistema biológico validan la necesidad de realizar acciones correctivas, operacionales, mantenimiento y adecuación de otras tecnologías de manera que se garantice el adecuado desempeño del sistema.

RECOMENDACIONES

Con el fin de normalizar, mejorar y estabilizar las condiciones de operación del sistema biológico de la planta de tratamiento El Maguey, a continuación se indican las acciones que deberían ser ejecutadas:

- a) Dotar el laboratorio con los equipos, materiales y reactivos necesarios para su puesta en servicio, incluyendo la capacitación del personal que laborará en el mismo.
- b) Ajustar un plan de muestreo en función de tener resultados que permitan realmente evaluar el funcionamiento de la planta y realizar los ajustes pertinentes de forma rápida y efectiva al sistema biológico, tomando como referencia los puntos de muestreo y métodos especificados en este trabajo.
- c) Capacitar al personal que realiza las labores de operación y mantenimiento en la planta para que los mismos puedan entender los procesos que allí se llevan a cabo, permitiéndoles con este conocimiento realizar los ajustes operacionales que deben hacerse de forma rutinaria o en casos de contingencia en cada equipo o unidad de tratamiento.
- d) Realizar y aplicar un plan de operación y mantenimiento.
- e) Reparar las instalaciones y equipos que se encuentren dañados y/o fuera de servicio.
- f) Aplicar tecnologías complementarias para mejorar la eficiencia del sistema y refuerzo del tratamiento

biológico, entre las cuales se recomiendan: *a*) desincorporación y retiro de los aireadores en la laguna parcialmente aireada para evitar la producción adicional de lodos, *b*) rehabilitación y ampliación de la laguna en la medida que sea posible para mejorar su capacidad, *c*) aplicación de un proceso adicional de desinfección en el efluente para la remoción de coliformes, *d*) aplicación de tratamientos complementarios para mejorar la calidad del efluente para su reutilización, en este caso se recomienda el uso de planta acuáticas en la laguna.

- g*) Considerar aplicar las recomendaciones realizadas por la empresa Dessau Soprin (2006).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AWWA, WEF (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION). 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. American Public Health Association, Washington DC, USA, pp. 1220.
- BRAVO D. 2004. Análisis preliminar del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas servidas El Maguey. Barcelona: Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas [Tesis Grado Ingeniero Civil], pp. 170.
- DESSAU SOPRIN. 2006. Estudio de rehabilitación de las lagunas de estabilización de la planta de tratamiento de aguas residuales "El Maguey". MARN, pp. 142.
- GAUFF INGENIEURE. 1994. MARNR (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables). Planta de tratamiento Puerto La Cruz". Cálculo Tecnológico, pp. 28.
- GONZÁLEZ J, GHANEM A, SEQUEA N, MÁRQUEZ I. 2006. Funcionamiento y estado actual de los sistemas de tratamiento de aguas residuales del estado Anzoátegui. XI Congreso Bolivariano y X Congreso Venezolano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS/AVISA/ CIV. Marzo 5-8. Valencia, Venezuela. pp. 1-9.
- GOOGLE™ EARTH. 2013. Disponible en línea en: www.google.com/earth (Acceso 04.08.2013).
- GUTIÉRREZ C, PÉREZ J. 2007. Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Editorial Universitaria, La Habana, Cuba, pp. 298.
- HAGAN D, GERULAT E, MORALES G, QUIJANO C. 2001. Startup challenges met for award-winning 41-mgd wastewater treatment plant in Medellin, Colombia. Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2001. Session 51 through Session. 60(30):408-437.
- LETTINGA G, VAN HAANDEL A. 1994. Anaerobic Sewage Treatment. A practical guide for regions with a hot climate. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 226.
- MARNR (MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES). 1995. De las descargas al medio marino-costero. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario. pp. 7-8.
- METCALF & EDDY, INC. 1991. Design of facilities for the biological treatment of wastewater. Eliassen R, King P, Linsley R. Wastewater engineering. treatment, disposal and reuse. Edit. McGraw-Hill, New York, USA, pp. 641-648.
- SANDINO J, YEE-BATISTA C. 2000. Evaluation of UASB effluent polishing alternatives for municipal applications. Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2000. Session 51 through Session. 60(10):362-371.
- US EPA. 2002. Wastewater Technology Fact Sheet. Aereated, Partial Mix Lagoons. EPA 832-F-02-008. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, pp. 5.