



Monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia*

Gloria Correa Restrepo** / Hernán Cuervo Fuentes*** /
Roberto Mejía Ruíz**** / Néstor Aguirre*****

*Monitoring of the stabilization ponds system in
Santa Fé de Antioquia, Colombia*

*Monitoracao do sistema de lagoas de estabilização do
município de Santa Fé de Antioquia, Colômbia*

RESUMEN

Introducción. En esta investigación se presentan los resultados obtenidos del monitoreo del sistema de lagunas de estabilización utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Santa Fé de Antioquia, ubicado en el occidente del departamento de Antioquia. El sistema cuenta con un tren de tratamiento que incluye una laguna anaeróbica que funciona en serie con dos facultativas, que operan en paralelo. Este proyecto surgió a partir

*Artículo derivado del proyecto de investigación "Evaluación y Monitoreo del Sistema de Lagunas de Estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia", desarrollado por el Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA, y financiado por la Universidad de Antioquia, entre los años 2006 y 2007. **Ingeniera Sanitaria, Magíster en Ingeniería. Docente investigador, Integrante del Grupo de Investigación Ingeniería Ambiental, GAMA – Corporación Universitaria Lasallista. ***Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería con Especialidad en Sistemas de Control de la Contaminación Ambiental y Especialista en Tratabilidad de Aguas Residuales Industriales. Docente investigador, Integrante del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA - Universidad de Antioquia. ****Ingeniero Sanitario, especialista en Gerencia de Construcciones, magíster en Ingeniería Ambiental. Docente de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. *****Licenciado en Biología y Química, Magíster en Biología, Doctor en Ciencias Naturales. Docente de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

Correspondencia: Gloria Correa Restrepo, e-mail: glocorrea@lasallistadoctentes.edu.co

Artículo recibido: 05/05/2012; Artículo aprobado: 21/11/2012

del problema causado por la generación de olores indeseables en las comunidades cercanas a la planta de tratamiento de aguas residuales de este Municipio. **Objetivo.** Evaluar y monitorear el comportamiento del sistema de lagunas de estabilización utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Santa Fé de Antioquia. **Metodología.** Se realizaron cinco muestreos, comprendidos entre noviembre de 2006 hasta diciembre de 2007. Se definieron 14 estaciones de muestreo, que comprenden el afluente y el efluente de cada laguna, el centro de cada laguna, tres profundidades distintas y el efluente total del sistema. Se determinaron las variables: temperatura del ambiente y del agua, oxígeno disuelto, potencial redox, pH, DQO, DBO₅, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos volátiles, clorofila "a" y caudal. Con el análisis temporal-espacial de las variables, se relacionaron las condiciones de mejores rendimientos en este sistema de tratamiento. **Resultados.** En la laguna anaeróbica se obtuvo una temperatura promedio de 26,7 °C y en las lagunas facultativas 28 °C, aproximadamente. Con respecto al oxígeno disuelto se reportaron datos promedio en la superficie de las lagunas facultativas de 17,4 y 24,6 mg/L, los que disminuyeron con la profundidad y el tiempo. El promedio del potencial redox en la laguna anaeróbica fue de -235 mV, mientras que para las lagunas facultativas varió entre -24 y 69 mV. El promedio de pH en las lagunas facultativas fue de 7,5 en sus centros, variando en el tiempo y en el espacio, mientras que en la laguna anaeróbica fue de 7,0 variando muy poco con su profundidad. En general, en las dos lagunas facultativas, en las horas diurnas, se observó estratificación química. Se midieron valores importantes en la producción de clorofila "a" en las lagunas facultativas, con valores promedio de hasta 2.275 ug/L. Al analizarse la eficiencia del sistema se obtuvo una remoción en carga en DBO5 soluble del 92%, considerándose una variación para laguna anaerobia entre el 50 y 70% y para las facultativas de 59 y 62%. **Conclusiones.** De acuerdo con este trabajo de investigación, se aprecia claramente cómo el control de los parámetros fisicoquímicos y de caudales que entran al sistema lagunar es fundamental para una adecuada operación y funcionamiento de la planta. Por otro lado, siendo la laguna anaeróbica la unidad que produce malestar en la comunidad por la generación de olores indeseables, se observó claramente que su eficiencia en remoción es de gran consideración en la planta de tratamiento.

Palabras clave: lagunas de estabilización, olores indeseables, temperatura, carga de aplicación, tiempo de detención, clorofila "a", eficiencia.

ABSTRACT

Introduction. This Research work introduces the results obtained in the monitoring of the stabilization ponds system used to treat domestic waste waters in Santa Fe de Antioquia, a town located in the West of Antioquia. The system has a treatment train which includes an anaerobic pond that works coordinated with another two that are facultative, operating in parallel. This project started because of the problem caused by stinking odors in the communities located near the waste water treatment plant of Santa Fe de Antioquia. **Objective.** Evaluating and monitoring the behavior of the stabilization ponds system used to treat domestic waste water in Santa Fe de Antioquia. **Methodology.** Five samplings were performed between November 2006 and December 2007. 14 sampling stations were established, comprehending the influent and the effluent of each pond, the center of each pond, three different depths and the total effluent of the system. The following variables were determined: Environment and water temperature, dissolved oxygen, redox potential, pH, COD, DBO₅, total solids, dissolved solids, suspended solids, settleable solids, volatile suspended solids, "a" chlorophyll and flow. With the time-space analysis of the variables, the best performance conditions of this treatment system were related. **Results.** In the anaerobic pond a media temperature of 26,7 °C was obtained and in the facultative ponds the temperature was approximately 28,0 °C. As for the dissolved oxygen, average data of 17,4 y 24,6 mg/L were reported on the surfaces of the facultative ponds, and these decreased with respect to depth and time. The media of the redox potential in the anaerobic pond was -235 mV, and for the facultative ponds it varied between 24 and 69 mV. The media of the pH in the facultative ponds was 7,5 in their centers, varying in time and space, while that of the anaerobic pond was 7,0 with a little variation due to its depth. In general, in both facultative ponds, during the daytime, there was a chemical stratification. Important values were measured for the "a" chlorophyll production in the facultative ponds, with media values up to 2.275 ug/L. When the efficiency of the system was measured, a load removal in soluble DBO5 of 92% was obtained, considering a variation for anaerobic pond between 50% and 70% and between 59% and 62% for the facultative ones. **Conclusions.** According to this research, it can be clearly appreciated how the control of the physical-chemical standards and the flows that enter in the pond

system is essential for an adequate operation of the plant. On the other hand, the anaerobic pond is the unit that produces distress in the community due to the generation of stinking odors, so its removal efficiency is a factor that must be highly regarded in the treatment plant.

Key words: stabilization ponds, stinking odors, temperature, application load, detention time, "a" · chlorophyll, efficiency.

RESUMO

Introdução. Nesta investigação se apresentam os resultados obtidos da monitoração do sistema de lagoas de estabilização utilizadas para o tratamento das águas residuais domésticas do município de Santa Fé de Antioquia, localizado no ocidente do departamento antioqueño. O sistema conta com um trem de tratamento que inclui uma lagoa anaeróbia que funciona em série com duas facultativas, que operam em paralelo. Este projeto surgiu a partir do problema causado pela geração de cheiros indesejados nas comunidades próximas à planta de tratamento de águas residuais deste município. **Objetivo.** Avaliar e monitorar o comportamento do sistema de lagoas de estabilização utilizadas para o tratamento das águas residuais domésticas do município de Santa Fé de Antioquia. **Metodologia.** Realizaram-se cinco amostragens, compreendidos entre novembro de 2006 até dezembro de 2007. Definiram-se 14 estações de amostragem, que compreendem o afluente e o efluente de cada lagoa, o centro de cada lagoa, três profundidades diferentes e o efluente total do sistema. Determinaram-se as variáveis: temperatura do ambiente e do água, oxigênio dissolvido, potencial redox, PH, DQO, DBO5, sólidos totais, sólidos dissolvidos, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos voláteis, clorofila "a" e volume. Com a análise temporário-espacial das variáveis, relacionaram-se as condições de melhores rendimentos neste sistema de tratamento. **Resultados.** Na lagoa anaeróbia se obteve uma temperatura média de 26,7 °C e nas lagoas facultativas 28,0 °C, aproximadamente. Com respeito ao oxigênio dissolvido se reportaram dados média na superfície das lagoas facultativas de 17,4 e 24,6 mg/L, os que diminuiram com a com respeito à profundidade e ao tempo. A média do potencial redox na lagoa anaeróbia foi de -235 mV, enquanto para as lagoas facultativas variou entre -24 e 69 mV. A média de PH nas lagoas facultativas foi de 7,5 em seus centros, variando no tempo e no espaço, enquanto na lagoa anaeróbia foi de 7,0 variando muito pouco com sua profundidade. Em general, nas duas lagoas facultativas, nas horas diurnas, observou-se estratificação química. Mediram-se valores importantes na produção de clorofila "a" nas lagoas facultativas, com valores média de até 2.275 ug/L. Ao analisar-se a eficiência do sistema se obteve uma remoção em ônus em DBO5 solúvel do 92%, considerando-se uma variação para lagoa anaeróbia entre o 50 e 70% e para as facultativas de 59 e 62%. **Conclusões.** De acordo com este trabalho de investigação, aprecia-se claramente como o controle dos parâmetros físico-químicos e de volumes que entram ao sistema de lagoas é fundamental para uma adequada operação e funcionamento da planta. Por outro lado, sendo a lagoa anaeróbia a unidade que produz mal-estar na comunidade pela geração de cheiros indesejados, observou-se claramente que sua eficiência em remoção é de grande consideração na planta de tratamento.

Palavras importantes: lagoas de estabilização, cheiros indesejados, temperatura, ônus de aplicação, tempo de detenção, clorofila "a", eficiência.

INTRODUCCIÓN

La implementación de las lagunas de estabilización en algunos municipios colombianos ha sido muy acogida en términos económicos. Debido a la generación de olores, han causado algunos rechazos por parte de las comunidades aledañas. También se han detectado deficiencias en el funcionamiento, ocasionadas posiblemente por aspectos constructivos, operación y mantenimiento, dada la concepción de ser sistemas operables sin ninguna o poca supervisión. Para analizar algunos de estos aspectos, se han elegido como objeto de estudio las lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, ubicado en el occidente antioqueño, debido a que en los períodos en que se realizó esta investigación, existía el problema de molestias de las comunidades cercanas como consecuencia de la generación de olores. El objetivo de esta investigación fue monitorear el comportamiento actual de

este sistema, para caracterizarlo con la mejor aproximación y así interpretar su funcionamiento en términos hidráulicos y cinéticos como también la eficiencia en remoción en carga orgánica.

La laguna de estabilización es aparentemente un método simple de tratamiento de las aguas residuales pero los mecanismos de transformación de la materia orgánica son complejos. Estos involucran procesos de sedimentación, digestión, oxidación, síntesis, fotosíntesis, respiración endógena, intercambio de gases, aireación, evaporación, corrientes térmicas y filtración¹.

De acuerdo con el contenido de oxígeno las lagunas pueden clasificarse en aeróbicas, aireadas con mezcla parcial, facultativas y anaeróbicas².

El mayor problema que presentan las lagunas anaeróbicas es la generación de olores, parámetro que depende fundamentalmente del pH y del proceso de óxido-reducción que allí se presenta. Uno de los gases que pueden ser emitidos en una laguna anaeróbica, causante de la producción de olores indeseables, es el ácido sulfhídrico (H_2S). Este compuesto resulta, principalmente, de la reducción bacteriana del ion sulfato (SO_4^{2-}) existente en el agua³.

Los dos componentes biológicos principales en una laguna facultativa son las bacterias y algas, y su interacción constituye el efecto ecológico más importante sobre el proceso de autopurificación. La concentración de clorofila "a" representa usualmente la densidad algal⁴.

El comportamiento hidráulico y biológico de todas las lagunas de estabilización es afectado por diferentes factores, algunos son controlables por el hombre y otros no⁵. Estos factores de autodependencia son: temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, carga orgánica aplicada, patrones de viento, tiempo de retención real, dispersión y características de mezcla, energía solar, características de las aguas residuales, factores ambientales y cantidad de nutrientes para el metabolismo bacterial⁶.

En el sistema de lagunas del municipio de Santa Fé de Antioquia, cuya secuencia de tratamiento incluye una laguna anaeróbica que funciona en serie con dos facultativas, las cuales operan en paralelo, se realizó un análisis temporal-espacial de las variables anteriormente mencionadas y se analizó la eficiencia del sistema de tratamiento. La laguna anaeróbica tiene un volumen de 13.750 m^3 , con 110 m de largo por 50 m de ancho y una profundidad de $2,5\text{ m}$. Cada laguna facultativa tiene un volumen de 10.773 m^3 , y un área de 133 m de largo por 54 m de ancho, y una profundidad de $1,5\text{ m}$. La **figura 1** muestra el esquema general del sistema de lagunas.



Figura 1. Esquema general de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Santa Fé de Antioquia

METODOLOGÍA

Se efectuó una visita de reconocimiento a la zona de estudio, para ajustar el diseño de muestreo; luego se realizó la revisión de los diferentes métodos de diseño para lagunas, con el propósito de comparar el diseño actual y revisar la información secundaria para el análisis de los estudios acerca del sistema. Se recolectó la información primaria como son los datos climatológicos e hidrológicos del lugar, y aspectos constructivos del sistema. Posteriormente, se procedió con los muestreos de campo y el trabajo de laboratorio. Se realizaron 5 muestreos generales, y se ubicaron 14 estaciones de muestreo: entrada al sistema (ES), salida de la laguna anaeróbica (SA), salida de la laguna facultativa 1 (SF1), salida de la laguna facultativa 2 (SF2), salida total del sistema (SS), centro de laguna anaeróbica (CA), centro de laguna facultativa 1 (CF1) y centro de laguna facultativa 2 (CF2). En los centros de las lagunas se tomaron muestras a tres profundidades: superficie, mitad de la columna de agua y fondo. La toma de datos de caudal se efectuó simultáneamente con la toma de muestras. En los 14 puntos establecidos en los muestreos, se tomaron muestras puntuales y compuestas cada cuatro horas. Se midieron puntualmente las variables: temperatura del aire y del agua, oxígeno disuelto (O.D), potencial redox, pH y caudal. Se tomaron muestras compuestas para el análisis de las variables: DQO, DBO₅, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos sedimentables (S Sed) y clorofila "a".

Para el análisis de la información se efectuaron análisis univariados que mostraran las posibles diferencias en cada estación y entre muestreos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos

La temperatura ambiente promedio fue de 26,3°C (figura 2), con registro de temperatura máxima de 34,5°C. La figura 3 muestra la temperatura en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema, y la figura 4, la temperatura en los centros de las lagunas. El promedio de la temperatura del agua para cada una de las estaciones, en °C, fue: en ES de 26,4, en CA de 26,7, en SA de 27,4, en CF1 de 28,0 en CF2 de 28,2, en SF1 de 27,2, en SF2 de 26,9 y en SS de 26,8. El comportamiento de esta variable en los efluentes de las lagunas facultativas fue muy similar. Tanto la temperatura ambiente como la temperatura de las lagunas alcanzan su máximo promedio en la hora 11:30 a. m. La temperatura ambiente, en las horas diurnas, fue mayor que la temperatura en la estación ES, aproximadamente 2°C, y con respecto a SA, SF1 y SF2, fue aproximadamente igual. Este comportamiento es consecuencia de la gran capacidad calorífica del agua almacenada en grandes volúmenes, 13.750 m³ para la laguna anaeróbica y 10.773 m³ para cada laguna facultativa, favorecido por ser un medio tropical donde no se presentan las variaciones estacionales que se dan en otras regiones. En las horas diurnas, en la laguna anaeróbica se observaron diferencias importantes de temperatura con respecto a la profundidad, en donde hubo una disminución de 1°C en una longitud de 1,25 m. Esto sugiere que existió estratificación térmica en dichas horas, diferente a lo que ocurrió en la noche donde no se observaron gradientes térmicos importantes en el corte longitudinal analizado. La temperatura máxima registrada en CA osciló entre 31 y 32,5°C en su perfil estudiado. Se puede afirmar que en las lagunas facultativas se presentó estratificación térmica alrededor de la hora 3:30 p. m., donde en una profundidad de 1,5 m la temperatura disminuyó en 1,6°C aproximadamente. La temperatura máxima registrada para CF1 y CF2 osciló entre 32 y 36°C en su corte longitudinal.

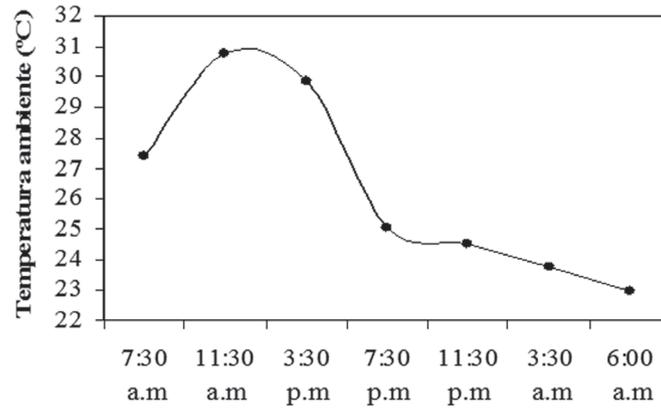


Figura 2. Temperatura ambiente

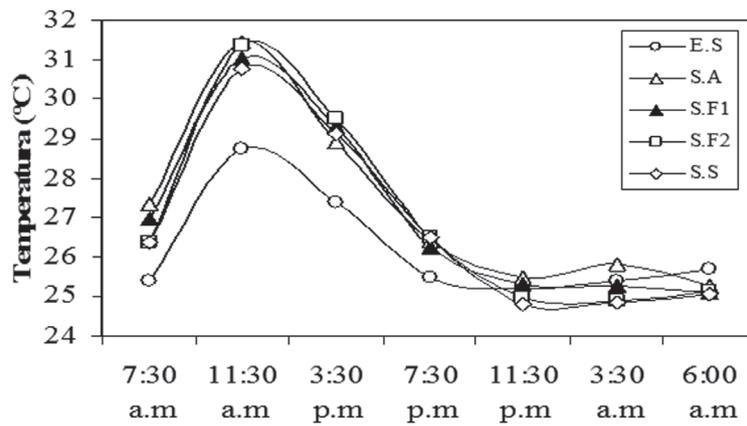


Figura 3. Temperatura en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

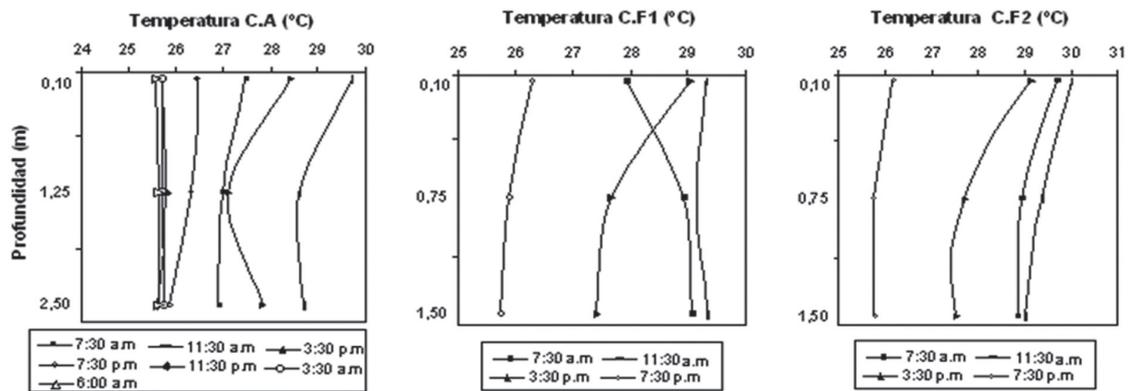


Figura 4. Temperatura en los centros de las lagunas

La **figura 5** muestra el Oxígeno Disuelto en afluentes y efluentes de cada unidad, y la **figura 6**, el Oxígeno Disuelto en centros de las lagunas. El OD para las estaciones CA, SA, SF1 y SF2 alcanzó su máximo valor entre las 11:30 a. m. y las 3:30 p. m., mientras que para CF1 y CF2 se logró en la hora 7:30 a. m., donde se obtuvieron datos importantes de sobresaturación en la superficie (17,7 mg/L en CF1 y de 24,6 mg/L en CF2). El promedio para esta variable en cada estación, en mg/L, fue: en ES de 1,2, en CA de 0,2; en SA de 1,0, en CF1 en su superficie de 6,2, en su medio de 3,4 y en su fondo de 2,3; en CF2 en su superficie de 7,7, en su medio de 3,9 y en su fondo de 2,0; en SF1 de 5,8; en SF2 de 5,1, y en SS de 4,1. Las concentraciones de esta variable presentaron gradientes considerables con respecto a la profundidad en los centros de las lagunas facultativas, mientras que en la laguna anaeróbica fue muy bajo.

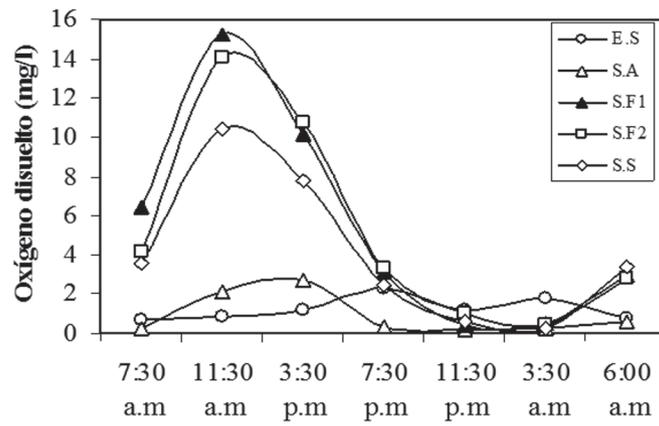


Figura 5. Oxígeno Disuelto en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

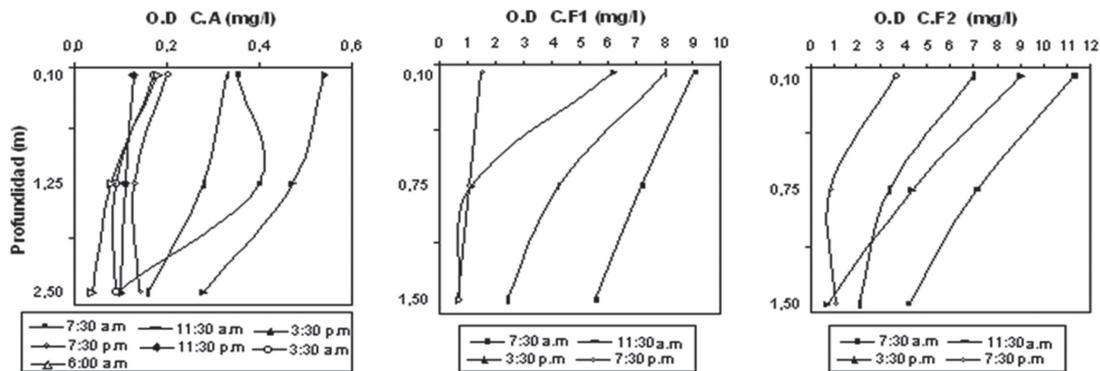


Figura 6. Oxígeno Disuelto en los centros de las lagunas

En las dos lagunas facultativas, en las horas diurnas, se observó estratificación química. En la laguna anaerobia, en las horas nocturnas, existió estabilidad del OD en la columna de agua (valor cercano a cero).

La **figura 7** presenta el Potencial Redox en afluentes y efluentes de cada unidad, y la **figura 8**, el Potencial Redox en centros de las lagunas. El promedio para este parámetro, en mV, en la estación ES fue de -62; en CA de -235; en SA de -180; en CF1 y CF2 en las capas superiores, osciló entre -24 y 69, y en el fondo entre -145 y 40 (en las horas diurnas); en SF1 de -35; en SF2 de -23 y en SS de -23. En CA se detectaron valores mínimos entre -381 y -398 mV en la madrugada, horas en las cuales se observó que dicha variable fue estable en el corte longitudinal, distinto a lo que ocurrió en las horas

diurnas donde se presentaron gradientes importantes en la columna de agua. En CF1 y CF2, la máxima actividad oxidativa se observó en las horas de la mañana, la cual estuvo asociada directamente con la Temperatura y el oxígeno máximos alcanzados en ambas lagunas. El coeficiente de correlación tanto entre el Potencial Redox y el Oxígeno Disuelto como entre Potencial Redox y Temperatura se presentó en el intervalo de 0,69 a 0,98.

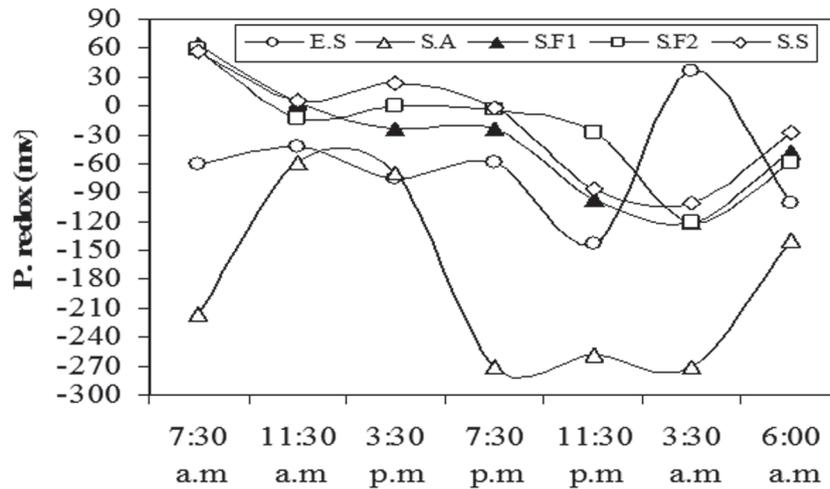


Figura 7. Potencial Redox en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

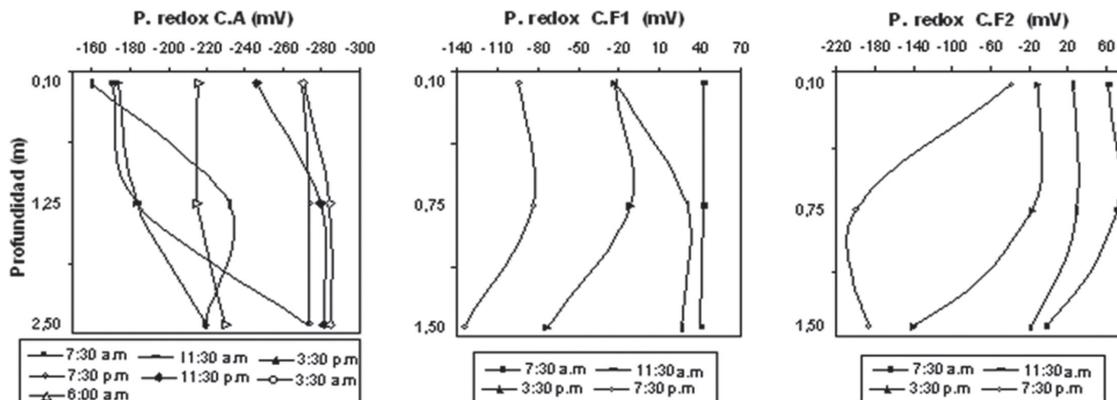


Figura 8. Potencial Redox en los centros de las lagunas

La **figura 9** presenta el pH en afluentes y efluentes de cada unidad, y la **figura 10**, el pH en centros de las lagunas. Esta variable para todas las estaciones siempre alcanzó sus valores promedio máximos en las horas de la mañana. El promedio calculado para cada estación fue: en ES de 7,3; en CA de 7,0; en SA de 7,1; en CF1 de 7,6; en CF2 de 7,5; en SF1 de 7,8; en SF2 de 7,7, y en SS de 7,7. En SA se presentaron valores bajos de pH en las horas de la noche, de 6,1 y 6,2, lo que indica desequilibrio en el proceso anaeróbico. En CA, el pH disminuyó suavemente hacia el fondo y en la noche se observó estabilidad en la columna de agua. En CF1 y CF2, el pH disminuyó con la profundidad y a través del tiempo, detectándose un valor máximo de 9,4 en las horas diurnas. Los datos de pH están asociados

directamente con los valores de Temperatura, Oxígeno Disuelto y Potencial Redox (coeficientes de correlación entre 0,69 a 0,98) lo que sugiere que las variaciones de temperatura, OD, Potencial Redox y pH dependen exclusivamente de la radiación solar existente⁷.

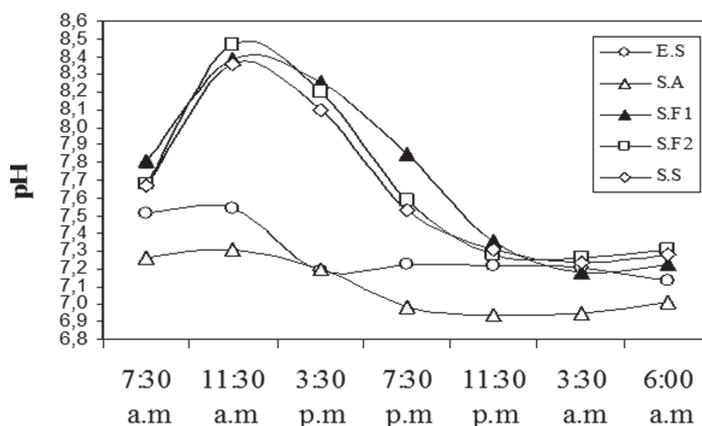


Figura 9. pH en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

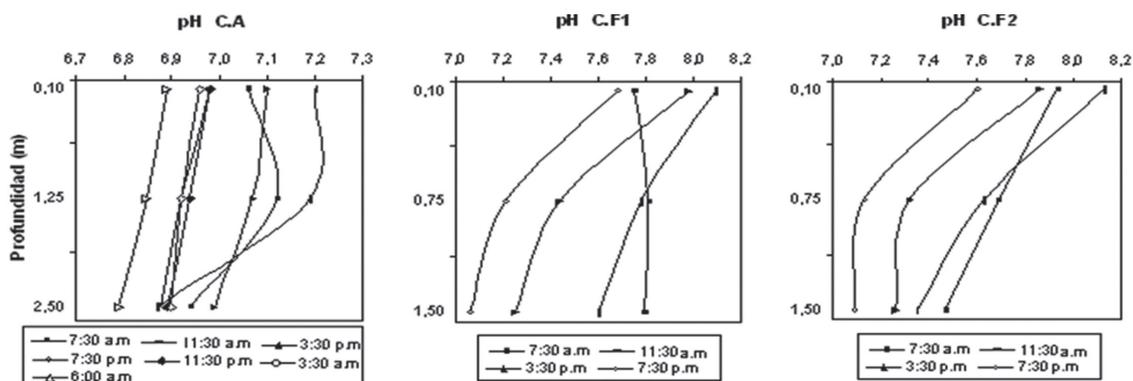


Figura 10. pH en los centros de las lagunas

Las **figuras 11 y 12** presentan el comportamiento de los sólidos, la DBO_5 y la DQO en los afluentes y efluentes de cada unidad del sistema. En general existió gran cantidad de sólidos disueltos con respecto a los sólidos suspendidos, mayores a 72% con respecto a los Sólidos Totales. De los Sólidos suspendidos existió más del 76% como Sólidos Suspendidos Volátiles, implicando importantes aportes de biomasa para los efluentes del sistema que, además, es reflejado en las gráficas de DQO y DBO_5 obtenidas. Con respecto a los S Sed, los efluentes de las lagunas estuvieron cercanos a cero, indicando un funcionamiento adecuado en estas.

La **figura 13** muestra el comportamiento de la clorofila "a", medida en los centros de las lagunas facultativas y en el efluente total del sistema. Los valores promedio presentados en CF1 y CF2, respectivamente, fueron de 852 y 656 $\mu\text{g/L}$, en la superficie, y de 656 y 361 $\mu\text{g/L}$, en la mitad de la columna de agua. Es de anotar que se encontraron mediciones máximas en la superficie de la laguna facultativa 2 de 1.846 $\mu\text{g/L}$. El promedio para el efluente del sistema fue de 947 $\mu\text{g/L}$. El valor máximo alcanzado en esta estación fue de 2.275 $\mu\text{g/L}$, pero también se obtuvieron valores muy bajos, hasta de

129 $\mu\text{g/L}$. Esta variabilidad en la producción de clorofila, puede ocasionar variaciones importantes en la eficiencia del proceso facultativo.

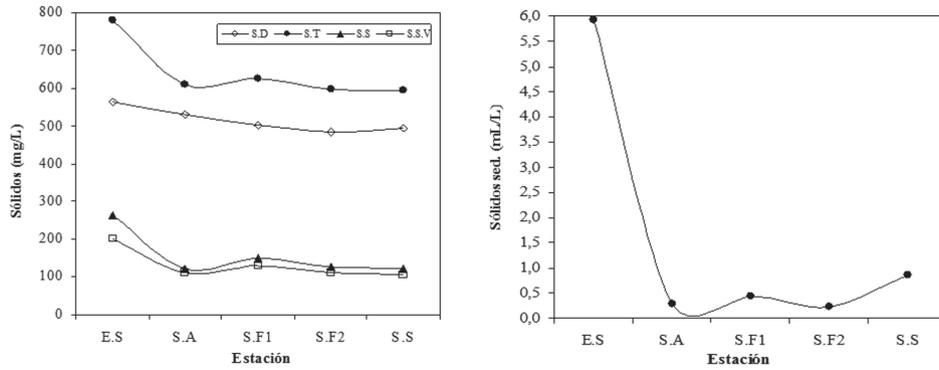


Figura 11. Sólidos en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

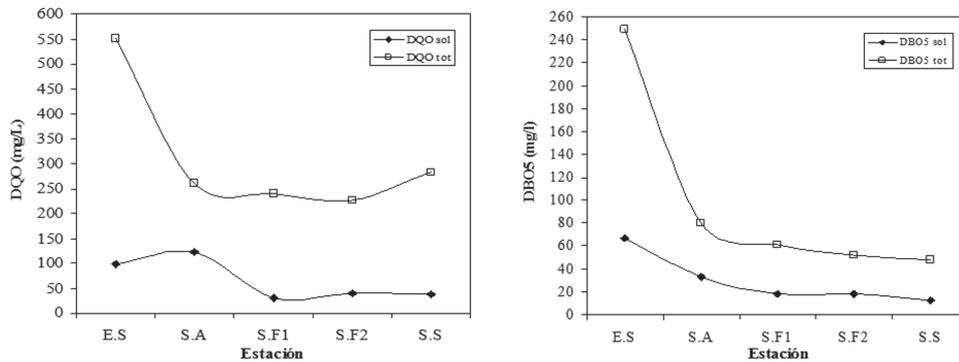


Figura 12. DBO₅ y DQO en afluentes y efluentes de cada unidad del sistema

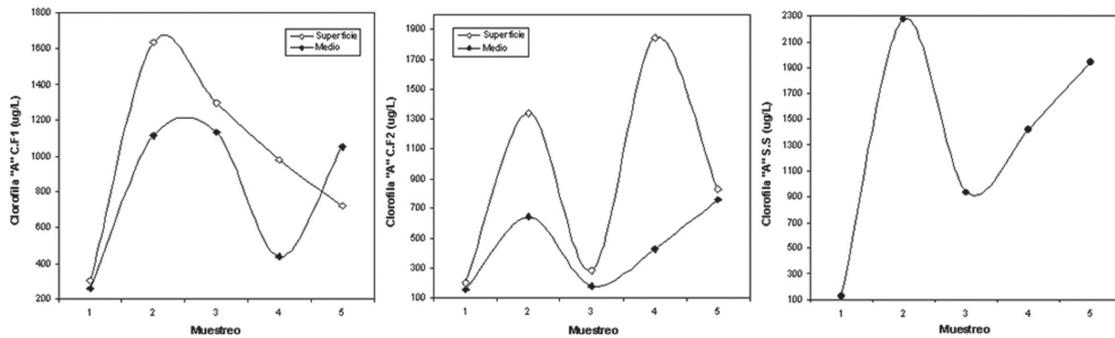


Figura 13. Clorofila en los centros de las lagunas facultativas y en efluente del sistema

Análisis de caudales y carga aplicada

La **figura 14** presenta los caudales afluentes y efluentes de cada unidad del sistema. En forma general el comportamiento del caudal a la salida del sistema aumentó en 52% con respecto al caudal de entrada y con respecto al efluente de la laguna anaerobia en un 75%. Se observó que el caudal en SA fue menor que en ES, pero al analizar el caudal en SF1 y SF2 se obtuvo un aumento de gran consideración. Esta situación implica que hubo un gran aporte de agua en las lagunas facultativas, que no fue solo la consecuencia de la lluvia sobre el espejo de agua durante la mayoría de los muestreos, sino también el caudal de escorrentía que llega a la llanura donde están ubicadas las lagunas facultativas. En la **figura 15** se muestra el caudal afluente y efluente del sistema, medido cada hora. El promedio del caudal afluente fue de 34,5 L/s y del efluente de 47,7 L/s. En esta misma figura, se describe la carga aplicada para cada laguna, en términos de DBO_v , estimada a 27°C, para cada uno de los muestreos realizados. Se obtuvo en promedio 1.317 kg/Ha-d para la laguna anaerobia, 142 y 182 kg/Ha-d para las lagunas facultativa 1 y 2, respectivamente. Aunque algunos autores señalan que es inadecuado hablar de carga superficial en un proceso anaeróbico, este parámetro puede dar una buena indicación para saber si la laguna permanece totalmente anaerobia^{1,2}. En este caso, de acuerdo a la figura 15, la carga fue mayor a 1.000 kg/Ha-d, excepto en el caso del muestreo 3, cuyo valor fue de 908. Las cargas aplicadas para las lagunas facultativas fueron relativamente bajas en casi todos los muestreos, considerándose los valores típicos entre 200 a 400 kg/Ha-d.

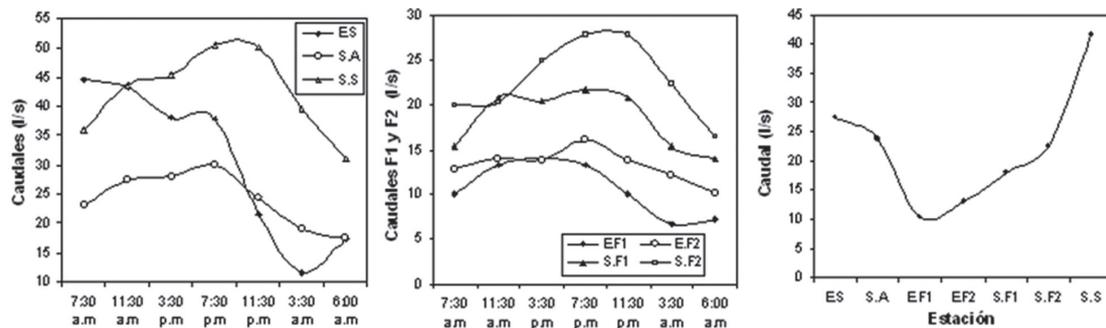


Figura 14. Caudales afluentes y efluentes de cada unidad

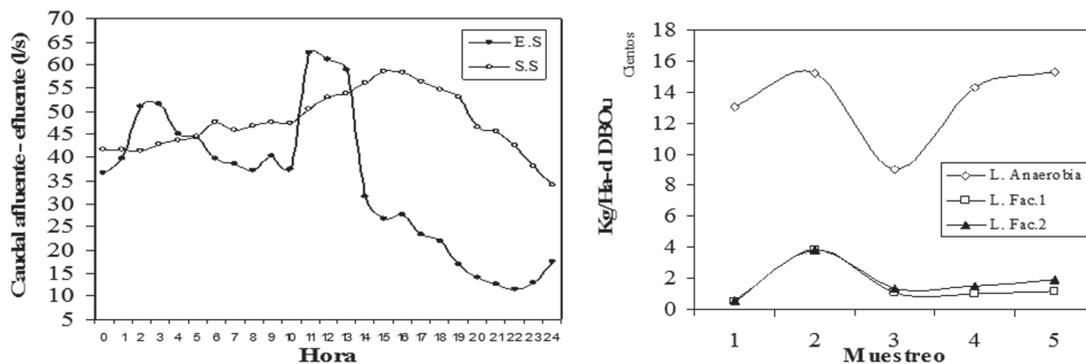


Figura 15. Caudal afluente y efluente del sistema y carga aplicada

En la tabla 1 se calcularon los tiempos de retención, utilizando los caudales promedio resultantes de cinco muestreos. Los resultados del tiempo de retención hidráulica son la consecuencia de una variabilidad importante en los caudales conseguidos, resaltándose que en el tercer muestreo, esta capacidad hidráulica disminuyó considerablemente para las tres lagunas.

Tabla 1. Tiempo de retención hidráulica en las lagunas

Caudal (L/s)			Tiempo de retención hidráulica (días)		
E.S	E.FI	E.F2	L. Anaerobia	L. FI	L. F2
22,9	7,5	8,9	7	17	14
28,2	13,8	13,7	6	9	9
38,7	16,2	18,7	4	8	7
24,5	8,6	13,1	6	14	10
25,4	7,9	13,4	6	16	9
Promedio caudal (L/s)			Promedio TRH (días)		
27,9	10,8	13,6	6	13	10

Análisis de eficiencia en el sistema

La tabla 2 presenta el rendimiento obtenido en cada unidad de la planta de tratamiento, por cada muestreo realizado, y la tabla 3 registra la eficiencia general del sistema. La laguna anaeróbica presentó remociones altas, en todos los parámetros descritos en la tabla 4, porque al ser un tratamiento primario se considera que debe remover los Sólidos Suspendidos del 50 al 70% y en DBO_5 del 40 al 70%. En general, aunque existió variabilidad en la remoción de materia orgánica, como lo expresa la remoción en DBO_5 en la tabla 2, presenta tendencia a ser alta, tal y como lo describe el promedio obtenido en la tabla 3 para dicha laguna.

En cuanto a las lagunas facultativas, se lograron remociones favorables en tres muestreos, con eficiencias entre 39 y 83% en DBO_5 soluble, y en DQO soluble entre 55 y 93% (tabla 2). Las remociones en los sólidos, presentadas en la tabla 3 para estas lagunas, implicaron un alto aporte de sólidos al efluente del sistema, con un promedio de 0,30 kg DBO_5 /kg SS, pero no implica que la eficiencia de las lagunas fue deficiente, porque la remoción promedio en materia orgánica en la laguna facultativa 1 fue de 59%, y en la laguna facultativa 2 fue de 62%. El sistema en general presentó alta remoción en DBO_5 soluble con un valor 92% y en DBO_5 total de 71%.

Las variaciones en la eficiencia del sistema obedecen a los altibajos del caudal, porque para la laguna anaeróbica, en el primer muestreo, se observó que para un tiempo de retención hidráulica de 7 días (el máximo registrado), correspondiendo a un caudal de 22,9 L/s a la entrada de la planta, se obtuvo la más alta remoción de materia orgánica, operando con una carga de aplicación de 1.304 kg/Ha-d. Para las lagunas facultativas se detectó mayor remoción con tiempos de retención de 9 días, con la mayor carga de aplicación superficial, 385 y 382 kg/Ha-d y un caudal de 13,8 y 13,7 L/s que, además, de ser un valor intermedio entre los registrados es equitativo para las dos lagunas. De acuerdo con esto se puede afirmar que las lagunas facultativas operaron subcargadas.

Tabla 2. Eficiencia de remoción para diferentes parámetros por muestreo realizado

Eficiencia en carga en el sistema por muestreo (%)					
Parámetro	Laguna Anaerobia				
	Muestreo N°				
	1°	2°	3°	4°	5°
DBO ₅ sol	93	84	85	90	89
DBO ₅ tot	91	44	70	80	77
DQO sol	91	34	88	99	90
DQO tot	73	18	61	70	68
S.Totales	42	34	19	48	16
S. Suspend.	50	35	54	77	79
SSV	20	40	-15	73	78
Parámetro	Laguna Facultativa 1				
	Muestreo N°				
	1°	2°	3°	4°	5°
DBO ₅ sol	-6	80	-9	67	64
DQO sol	60	78	82	93	75
S.Totales	-79	-37	-184	-173	-27
S. Suspend.	-115	19	-379	-136	-291
SSV	-78	5	-325	-85	-291
Parámetro	Laguna Facultativa 2				
	Muestreo N°				
	1°	2°	3°	4°	5°
DBO ₅ sol	34	83	11	39	64
DQO sol	55	61	83	93	74
S.Totales	-30	-39	-137	-191	-16
S. Suspend.	-43	2	-254	-175	-102
SSV	-8	-3	-238	-153	-102
Parámetro	Eficiencia del sistema total				
	Muestreo N°				
	1°	2°	3°	4°	5°
DBO ₅ sol	92	92	90	91	93
DBO ₅ tot	82	72	31	71	72
DQO sol	89	70	93	98	93
DQO tot	55	55	-187	50	56
S.Totales	12	7	-107	-48	11
S. Suspend.	13	43	-47	43	51
SSV	-11	38	-259	43	47

Tabla 3. Eficiencia general del sistema

Eficiencia en el sistema (%)				
Parámetro	Estación			
	L. Anaerobia	L. Facultativa 1	L. Facultativa 2	Sistema total
DBO ₅ sol	89	59	62	92
DBO ₅ tot	72	-34	-10	71
DQO sol	81	79	74	89
DQO tot	59	-62	-48	22
S. Totales	32	-80	-66	-16
S. Suspend.	60	-120	-78	30
SSV	52	-103	-69	19
N Total K.	-6
P Total	-29

CONCLUSIONES

La alta capacidad calorífica almacenada en las lagunas, producto de las altas temperaturas registradas en el ambiente, tiende a favorecer la remoción de materia orgánica, porque la mayor parte de las demás variables analizadas estuvo asociada directamente con la temperatura. Uno de los efectos de esta variable se observó en los altos valores de clorofila "a", encontrados en las lagunas facultativas, implicando la existencia de condiciones favorables para la interacción ecológica entre los microorganismos presentes.

De acuerdo con el análisis del Potencial Redox, en los cinco muestreos realizados, se cuenta con un promedio en la laguna anaerobia de -235 mV, en todo el corte longitudinal, donde se observó estabilidad con respecto a la profundidad en las horas nocturnas. De acuerdo con la literatura consultada en esta investigación, el valor óptimo para la fermentación anaeróbica de materia orgánica es de -330 mV⁸, lo que implicó que esta laguna estuvo por encima de ese valor, pudiéndose haber generado desestabilidad en el proceso.

El pH en la laguna anaeróbica se presentó en un intervalo promedio de 6,79 a 7,20, tendiendo a ser un ambiente ácido en las horas de la noche. Estos datos son indicadores de alteración en el proceso anaeróbico en ciertos instantes del tiempo.

Se recomienda mantener un pH en la laguna anaeróbica entre 7,3 y 7,6 en todas las 24 horas del día, para poder minimizar la producción de H₂S, dado que la estabilidad de las variables fisicoquímicas que son el producto de la existencia de mayores índices de mezcla en la columna de agua, en las horas nocturnas, pueden generar alta emisión del H₂S a la atmósfera.

En este sistema, bajo una temperatura ambiente promedio de 26,3°C, se obtuvo una remoción en DBO₅ soluble de 92% y en DBO₅ total de 71%, comparado con otros sistemas similares en cuanto al tren de tratamiento, donde se obtuvieron remociones de 70% (temperatura entre 13 y 17°C)⁹, de 77%¹⁰, 74%¹¹, 88%¹², intervalo entre 80 a 90%¹³ y 89%¹⁴ (estas últimas con tratamiento terciario y temperatura de 27 °C) podemos afirmar que es alta.

De acuerdo con el aporte de sólidos al efluente final del sistema, verificado además por la concentración de Nitrógeno y Fósforo, en la tabla 3, se recomienda un tratamiento adicional que permita su remoción.

A pesar de que el tiempo de retención hidráulica presentado en la laguna anaeróbica fue variable, las remociones obtenidas fueron muy apreciables para el sistema, siendo la responsable del 72% de la remoción de la materia orgánica en la planta de tratamiento. Esto quiere decir, que para controlar más eficazmente los olores indeseables producidos en dicha laguna, se sugiere rediseñar esta unidad en términos de hacer una recolección adecuada, tanto de los lodos como de los gases generados allí.

Como en la mayor parte de los muestreos las lagunas facultativas operaron subcargadas, entonces se puede distribuir el flujo en estas lagunas para que trabajen en serie y así aumentar la remoción en las mismas.

Con respecto a los caudales encontrados, es pertinente hacer un control del mismo durante las 24 horas, para minimizar las sobrecargas al proceso de tratamiento. Para esto se recomienda revisar la calibración del vertedero de excesos, localizado en el sistema preliminar de la planta.

Finalmente, la medición y control de variables físico-químicas e hidráulicas de un sistema lagunar son fundamentales en su operación y funcionamiento, ya que minimizan problemas como los olores, debido al ácido sulfhídrico, el cual también podría entrar a ser limitante de la degradación biológica bacteriana y, por tanto, restringir la bioconversión de la materia orgánica carbonácea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ROLIM, S. *Sistemas de Lagunas de Estabilización*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill, 2000. p. 31.
2. CRITES, R. y TCHOBANOGLOUS, G. *Sistema de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. Santa Fe de Bogotá: Editorial McGraw-Hill, Tomo 2. 2000. p. 527-551.
3. METCALFY EDDY INC. *Ingeniería Sanitaria, Redes de Alcantarillado y Bombeo de Aguas Residuales*. Barcelona: Editorial Labor. S.A. 1985. p. 249-254.
4. ROMERO, J.A. *Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales*. Santa Fe de Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005. p. 108-121.
5. YANEZ, F. *Avances en el Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS, 1982. p. 2.
6. MORENO, M. D. *Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales, Manual de Operadores*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 1991. p. 57-75.
7. KAYOMBO, S.; *et al.* Diurnal Cycles of Variation of Physical-Chemical Parameters in Waste Stabilization Ponds. *En: Revista Ecological Engineering*. Vol. 18. 2002. p. 287-291.
8. DÍAZ-BÁEZ, M. C.; ESPITIA, S. E. y Molina, F. *Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología*. Medellín: Editorial Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Biotecnología, 2002. p. 121.
9. MEJÍA, R. *Análisis de la dinámica de transformación de la materia orgánica en las lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales del municipio de la Ceja*. Tesis de Maestría. Universidad de Antioquia. Medellín. 2006. p. 170-178.
10. CÁRDENAS, C.; *et al.* Evaluación de las Unidades que Conforman la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Maracaibo Sur. *En: Revista Técnica facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*. 2005. Vol. 28. p. 97-109.

11. ROJAS, J. Performance of Waste Water Stabilization Ponds Systems in Bolivia. 3rd IAWQ International Specialist Conference and Workshop. 1995.
12. SILVA, S.; MARA, D. & DE OLIVEIRA, R. The Performance of a Series of Five Deep Waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil. Proceedings of an Lawpre Specialized Conference Held in Lisboa Portugal. 1987.
13. PEARSON, H.W.; et al. Performance of the Phase II Dandora Waste Stabilization Ponds the Largest in Africa: The Case for Anaerobic Ponds. En: Revista Science and Technology. 1996. Vol. 33. p. 91-98.
14. PATIL, H. S.; METI, G. M. & Hosetti, B. B. Bilogy of Multi Cell Ponds Treating Municipal Was-tes. En: Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie. 1993. Vol. 78. p. 309-317.