

Desempeño de las lagunas anaerobia con baffle divisor y facultativa de la PTAR de Santa Fe do Sul (São Paulo, Brasil)*

Tsunao Matsumoto**
Iván Andrés Sánchez Ortiz***

Recibido: 10/07/2015 • Aceptado: 14/06/2016

DOI: 10.22395/rium.v15n29a2

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Santa Fe do Sul en las diferentes épocas climáticas. Se realizó un estudio batimétrico de las lagunas de estabilización anaerobia y facultativa para trazar los perfiles de acumulación de lodos y estimar los tiempos de retención hidráulica de las unidades; se ejecutaron tres etapas de monitoreo del afluente crudo y los efluentes de las lagunas, cada una con tres meses de duración. La remoción media de DBO fue del 78,6 %, menor que la mínima exigida por la legislación brasilera; la cantidad de coliformes fecales (CF) y el volumen de sólidos sedimentables superaron los valores permitidos por la reglamentación. La PTAR requiere mantenimiento en la laguna anaerobia y un sistema de postratamiento que garantice la reducción de DBO, CF y sólidos del efluente final.

Palabras clave: aguas residuales urbanas, lagunas de estabilización, evaluación de desempeño.

* Artículo derivado del proyecto “Acompanhamento da Tratabilidade do Esgoto Doméstico das Estações de Tratamentos dos Serviços Autônomos de Água e Esgoto da Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados”; el proyecto fue financiado por el Fundo Estadual de Recursos Hídricos, adscrito a la Secretaria de Saneamiento y Recursos Hídricos del Gobierno del Estado de São Paulo (Brasil), y se ejecutó entre 2007 y 2010 a partir del proceso FEHIDRO 413. En él participó el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) con su área de saneamiento.

** Ingeniero civil Fundação Valeparaibana de Ensino; M.Sc y Ph.D. en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento Escuela de Ingeniería Universidad de São Paulo USP (Brasil). Profesor Livre Docente del Departamento de Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería de la UNESP Campus de Ilha Solteira Alameda Bahia, 550 - Ilha Solteira - São Paulo, Brasil. CEP: 15385-000 - Brasil - Tel/Fax: (0xx18) 37431125. E-mail: tsunao@dec.feis.unesp.br

*** Ingeniero civil - Especialista; M.Sc. en Ingeniería Civil: Recursos Hídricos y Tecnologías Ambientales Universidade Estadual Paulista UNESP São Paulo, Brasil. Profesor asistente Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño. Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria Torobajo, carrera 22 N.º 18-109 Pasto, Nariño (Colombia). Tel: (572) 7311449 ext. 239 E-mail: iaso@udenar.edu.co

Performance of the anaerobic lagoons with dividing baffle and facultative of the WWTP of Santa Fe do Sul (São Paulo, Brazil)

Abstract

The main objective of this research was to evaluate the performance of the sewage treatment plant (stp) of Santa Fe do Sul in the different climatic seasons. A bathymetric survey of the anaerobic and facultative lagoons was carried out to determine the sludge accumulation profiles and estimate the hydraulic retention time of the units; Three-stage monitoring of the raw sewage and the ponds' effluents for 3-months long each was carried out. The average removal of the biochemical oxygen demand (bod) was 78.6 %, lower than the minimum efficiency allowed by the current Brazilian legislation; the amount of fecal coliforms (fc) and the settleable solids volume exceeded the permitted values by the regulation. The stp needs maintenance on the anaerobic lagoon and a post-treatment system to guarantee additional bod, fc and solids removal on the final effluent.

Key words: urban wastewater, waste stabilization ponds, performance evaluation.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización (LE) son cuencas de gran tamaño y poca profundidad rodeadas por diques en tierra, donde el agua residual cruda es tratada por procesos exclusivamente naturales que involucran tanto algas como bacterias [1]. Consisten en una estructura simple, básicamente formada por un reservorio excavado en el suelo, con mayor o menor protección de los taludes y del fondo, dependiendo del tipo de terreno donde sea implantada [2].

Las LE se proyectan como grandes reservorios dentro de los cuales las aguas negras fluyen, entrando y saliendo después de un período de retención definido, contando únicamente con los procesos naturales de purificación biológica que ocurren en cualquier cuerpo natural de agua [3].

El uso de las LE para el tratamiento de aguas residuales crudas tiene amplia aplicación en la práctica; generalmente se tiene como objetivo principal la remoción de material orgánico y sólidos en suspensión [4], aunque también son muy efectivas en la remoción de bacterias coliformes fecales, donde la energía solar es el único requerimiento para tal operación [5]. El tiempo de retención es variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de bacterias heterotróficas presentes en el medio [6].

Para el tratamiento de aguas residuales (AR) domésticas se consideran únicamente los sistemas de lagunas que tengan unidades anaerobias, aireadas, facultativas y de maduración [7].

Los sistemas de LE constan de una o más series de diferentes tipos de lagunas. Usualmente la primera laguna en la serie es anaerobia y la segunda, facultativa, las cuales podrían necesitar ser acompañadas por lagunas de maduración, lo que dependerá de la calidad requerida para el efluente final [8]. Las lagunas que reciben AR cruda son lagunas primarias y las que reciben el efluente de una primaria se llaman secundarias. A las lagunas de grado más allá del segundo también se les suele llamar lagunas de acabado, maduración o pulimento [9].

Las lagunas anaerobias se diseñan para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica (MO); su profundidad oscila entre 5 y 10 metros (m) y su tiempo de retención hidráulica (TRH) oscila entre 20 y 50 días (d). Las lagunas facultativas son el más común y versátil tipo de LE, su profundidad oscila entre 1,5 y 2,5 m y se diseñan para TRH entre 25 y 180 d [10].

Los objetivos de este trabajo fueron: evaluar la PTAR de Santa Fe do Sul con relación a la acumulación de lodos en sus dos LE, caracterizar el líquido afluente durante un día promedio y diagnosticar su desempeño en cuanto a la eficiencia en el tratamiento.

La investigación involucró: la monitoreo por 24 horas consecutivas del caudal y las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) afluentes; el estudio batimétrico de las LE anaerobia y facultativa que conforman la PTAR; la monitoreo del desempeño de la planta en las diferentes condiciones climáticas anuales por medio de la toma de datos de los parámetros pH, oxígeno disuelto (OD), DBO, DBO filtrada, DQO, sólidos sedimentables (SSed), sólidos totales (ST), fijos (STF) y volátiles (STV), sólidos suspendidos totales (SST), fijos (SSF) y volátiles (SSV), temperatura, número más probable (NMP) de colonias formadoras de coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) de los afluentes y efluentes de las lagunas, para monitorizar la capacidad de asimilación de la variación de concentraciones por parte del sistema de tratamiento y verificar si las eficiencias de remoción de los parámetros de control de calidad del agua en la planta se ajustan a las directrices establecidas por la legislación ambiental brasilera. Con los resultados obtenidos se diagnosticó el comportamiento de la planta en términos de la remoción de MO, sólidos, CT y CF y se formularon las recomendaciones del caso.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la planta de tratamiento de Santa Fe do Sul

Santa Fe do Sul se localiza al noroeste del estado de São Paulo (Brasil), en las coordenadas: 20°12'42,65" S y 50°55'35,36" W con altitud media de 400 m. s. n. m. La ciudad posee clima de sabana tropical (tipo Aw) e índice pluviométrico en torno de 1265.9 mm anuales [11] y una población urbana de 28.084 habitantes [12].

PTAR Marruco-Santa Fe do Sul

Santa Fé do Sul cuenta con dos PTAR, una localizada en las coordenadas: 20°13'04,98" S y 50°56'07,16" W (objeto de esta investigación), llamada PTAR Marruco. La planta posee dispositivos de tratamiento preliminar por medio de dos rejillas de barras paralelas con espaciamiento de 25 mm y un desarenador con dos cámaras en paralelo y dispone de una canaleta Parshall de 0,23 m de abertura de garganta. El tratamiento secundario se realiza a través de dos lagunas de estabilización; la primera de ellas, anaerobia, con baffle divisor, seguida de una laguna facultativa secundaria. La planta trata regularmente el 35 % de las aguas residuales generadas por la ciudad. El efluente tratado es vertido en la corriente Marruco o Jacu Queimado.

La figura 1 presenta un esquema de la PTAR con los elementos que constituyen el sistema de tratamiento y los puntos de muestreo utilizados durante la investigación. Si el lector desea apreciar de una mejor manera la disposición de las lagunas de estabilización y su cercanía al cuerpo de agua receptor se recomienda observar las imágenes satelitales incluidas en un monitoreo de 24 horas consecutivas realizado a la PTAR, previamente publicado [13].

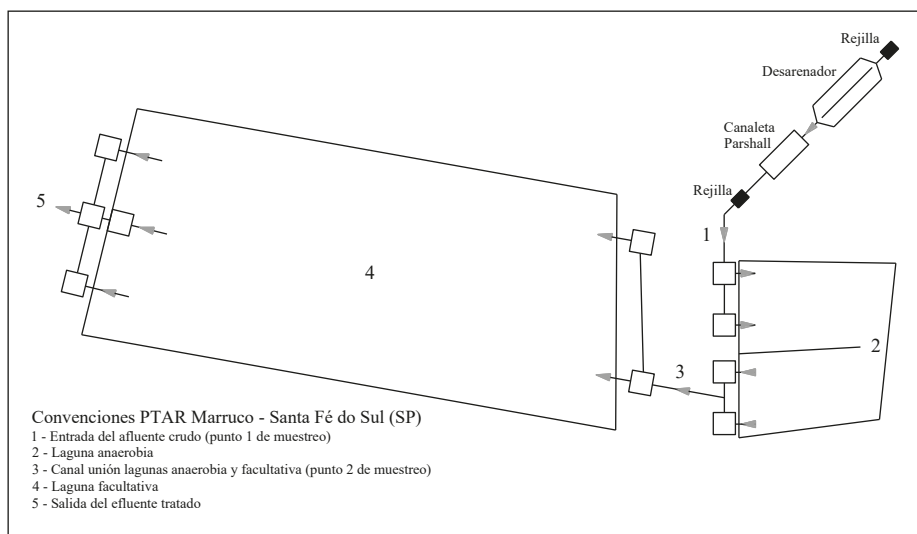


Figura 1. Elementos constitutivos de la PTAR Marruco y puntos de muestreo

Fuente: elaboración propia

Caracterización del afluente crudo y de los efluentes de las lagunas de estabilización

Se monitorizaron durante 24 horas consecutivas el afluente crudo de la planta y los efluentes de cada una de las LE; para ello cada hora se midió el caudal en la canaleta Parshall y se tomaron muestras para analizar los valores de DQO y DBO. Los muestreos se realizaron en los puntos 1, 3 y 5, indicados en la figura 1, se utilizaron recipientes libres de impurezas e interferentes, se almacenaron en frascos de polipropileno, se refrigeraron y transportaron en cajas de icopor para su análisis en el Laboratorio de Saneamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira.

Estudio batimétrico

El levantamiento se realizó para obtener los perfiles de acumulación de los sólidos sedimentados y estimar la cantidad de lodo depositado en el fondo de las LE, así como el volumen útil disponible en cada unidad. Para tal fin, y con el objetivo de identificar claramente la configuración de los lodos acumulados en las unidades, en la laguna anaerobia se definieron 9 perfiles longitudinales espaciados cada 7,5 m y 16 perfiles transversales cada 5 m; en la laguna facultativa se definieron 9 perfiles longitudinales espaciados cada 10 m con excepción de los dos últimos separados por 5 m de distancia y 14 perfiles transversales espaciados cada 10 m; los dos primeros en el sentido del afluente espaciados cada 5 m. En total se realizaron mediciones batimétricas para 111 puntos en la laguna anaerobia y 110 puntos en la facultativa.

Los datos batimétricos se obtuvieron por medio de equipos para medición de la profundidad y consistencia del lodo acumulado [14] y se mantuvo el alineamiento de los perfiles por medio de equipos ópticos y una embarcación auxiliar. Los datos recopilados se almacenaron en planillas electrónicas para su uso en la elaboración de los perfiles de lodos y el cálculo de los volúmenes acumulados con ayuda del programa Autocad.

Monitoreo

El monitoreo del desempeño de la PTAR se realizó por medio de 3 etapas de colecta con duración de 3 meses por período de investigación. La primera etapa se ejecutó en el período de lluvias (diciembre a febrero del primer año); la segunda etapa en el período de sequía (mayo a julio del segundo año); y la tercera etapa durante el inicio del período de lluvias (agosto a octubre del tercer año). El monitoreo consistió en ejecutar, por lo menos dos veces por mes, en horas de la mañana, la toma de muestras sencillas para levantamiento de datos de los siguientes parámetros: pH, OD, DBO, DBO filtrada, DQO, SSed, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, temperatura, CT y CF de los afluentes y efluentes de la PTAR. El pH, el OD y la temperatura se midieron *in situ* con instrumentos portátiles; los demás parámetros se midieron en el Laboratorio de Saneamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la UNESP, Campus de Ilha Solteira. Los puntos de muestreo y las metodologías de colecta de las muestras conservaron las mismas condiciones mencionadas para la caracterización inicial.

Para la medición de los parámetros antes citados se adoptaron las metodologías de análisis establecidas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [15] en las modalidades: analítica, colorimétrica y espectrofotométrica. Los datos registrados se almacenaron en planillas electrónicas para su compilación y confección de tablas y gráficos.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Batimetría de la PTAR

La laguna anaerobia de formato trapezoidal irregular tiene 55 m de base menor, 90 m de base mayor, 60 m de ancho y una profundidad máxima de 3,50 m, cubre un área superficial de 4 600 m², y posee un volumen teórico total útil de aproximadamente 9 500 m³; a partir de este dato y del caudal medio registrado en el afluente a la planta de 30,36 L/s (dato que se discutirá un poco más adelante), se estima que el TRH teórico de diseño fue de 3,5 d, cuyo valor estaría de acuerdo con el tiempo de retención recomendado por von Sperling [16] de 3,0 a 6,0 días para lagunas anaerobias con remoción de 50 % de la carga de DBO.

La figura 2 ilustra la vista en planta de la disposición de los ejes longitudinales y transversales determinados sobre la laguna anaerobia, así como los perfiles longitudinales obtenidos.

La laguna anaerobia registró un significativo volumen ocupado por lodos, principalmente en su primera célula, tal como se puede apreciar en los perfiles L1, L2 y L3 de la figura 2, lo que provoca una reducción drástica de la profundidad y de su volumen útil; por su parte, la segunda célula presentó menor acumulación de lodos, como puede observarse en los perfiles L4 a L9 de la misma figura. El lodo acumulado correspondió a un volumen estimado de $3\,850\text{ m}^3$, que representa una altura media de 0,713 m; con base en valores típicos de densidades de lodos de plantas de tratamiento de AR [17] se determinó que la masa de lodo húmedo acumulado fue de 3 927 204 kg.

La laguna facultativa, de formato trapezoidal ligeramente irregular, mide 77 m de ancho, 145 m de base mayor, 110 m de base menor y posee una profundidad máxima de 2,22 m, con un área de 10.350 m^2 y un volumen teórico útil aproximado de 22.000 m^3 , valor que al ser analizado con el caudal medio afluente calculado para la planta representa un TRH teórico de la laguna de 8,0 d, que estaría de acuerdo con el recomendado de 7,5 a 22,5 d para lagunas facultativas [18].

La figura 3 presenta la vista en planta de la disposición de los ejes longitudinales y transversales determinados sobre la laguna facultativa, así como los perfiles longitudinales obtenidos.

La laguna facultativa presentó un menor porcentaje de acumulación de lodos que la evidenciada por la unidad anaerobia, y su concentración se hizo más visible en las zonas cercanas a los puntos de ingreso del afluente. El volumen de lodo acumulado fue de $1\,453\text{ m}^3$ que corresponden a una altura media del orden de 0,14 m, equivalentes a cerca de 1 482 468 kg de lodo húmedo, según las densidades de lodo típicas [17].

La acumulación de los lodos puede generar caminos preferenciales del flujo y cortocircuitos que afectan de manera drástica la eficiencia de la PTAR; por ello los resultados obtenidos son útiles para planificar la remoción del lodo de los puntos más críticos dentro de las LE. Además de la remoción de los sólidos acumulados en la laguna anaerobia, es recomendable la limpieza diaria y alternada de las dos cámaras del desarenador, tal como lo determina el manual de operación de la PTAR, lo que contribuirá a conservar por más tiempo el volumen efectivo de tratamiento de las LE.

Caracterización del afluente a la PTAR Marruco

Con base en los 25 muestreos realizados en el punto de colecta 1 se caracterizó el caudal de AR, así como la variación de las concentraciones de DBO y DQO del afluente a la planta. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.

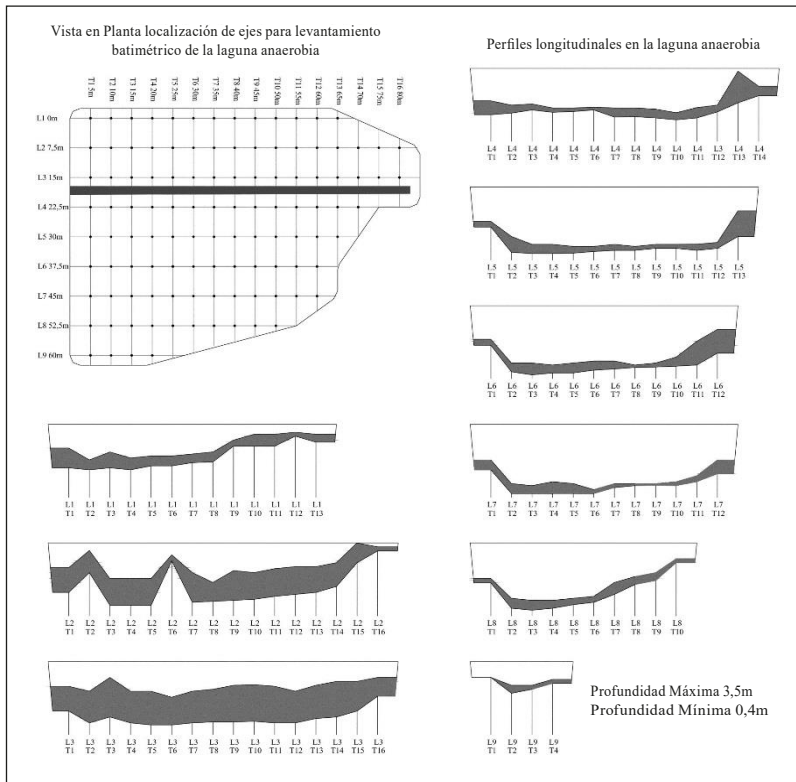


Figura 2. Vista en planta y perfiles longitudinales de la laguna anaerobia
Fuente: elaboración propia

Durante las 24 horas el caudal afluente a la planta varió entre 10,2 litros/segundo (L/s) y 68,12 L/s, con un valor medio de 30,36 (L/s). Los picos de valores observados se ajustaron a la variación diaria reportada en la literatura [7].

Al considerar la acumulación de lodos en las LE, los volúmenes efectivos pasaron a ser de 5 650 y 20 547 m³, respectivamente, en las lagunas anaerobia y facultativa; así, los correspondientes TRH reales de tales unidades fueron de 2,15 y 7,83 días. En particular, el TRH de la laguna anaerobia se encuentra por debajo de los mínimos 3 días recomendados para ese tipo de laguna en zonas cálidas [2].

La concentración de la DBO afluente a la planta varió entre 48 y 547 mg/L con promedio de 306 mg/L, la DQO varió entre 161 y 1107 mg/L con un promedio de 619 mg/L. Se verificó la relación existente entre las concentraciones de la DQO y la DBO crudas del orden de 2 según lo afirmado por autores como Metcalf & Eddy [18].

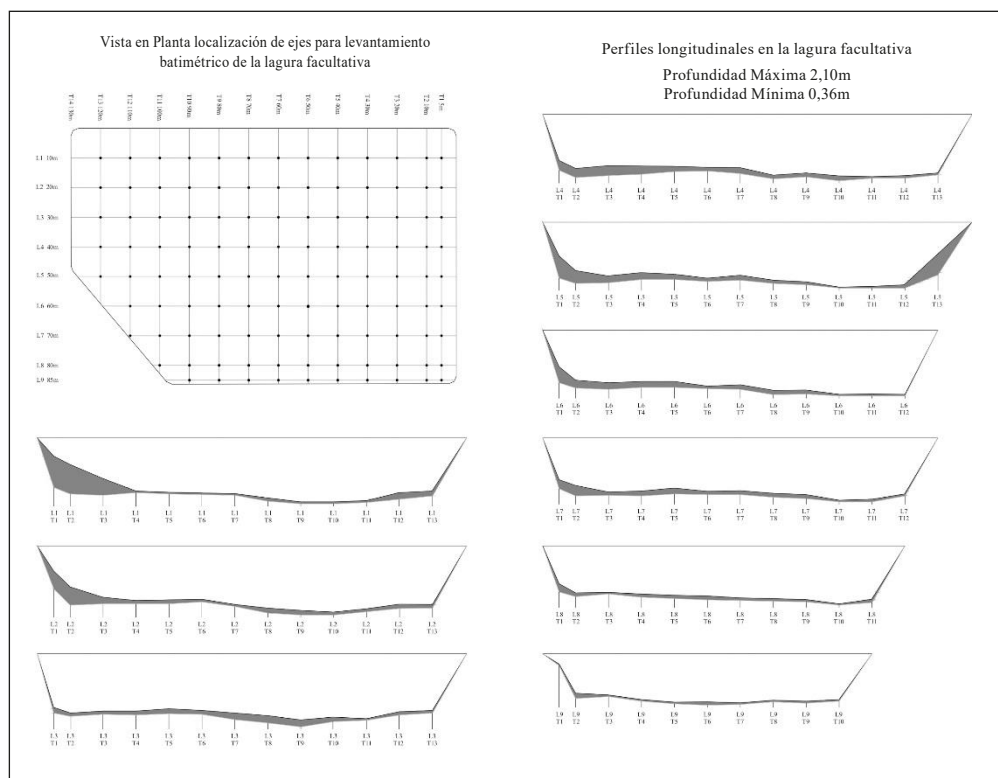


Figura 3. Vista en planta y perfiles longitudinales de la laguna facultativa

Fuente: elaboración propia

Monitoreo de la PTAR

Los siguientes son los resultados obtenidos para los parámetros analizados durante las tres fases de monitoreo de la planta.

Temperatura. Las temperaturas medias del afluente a la PTAR durante la primera, segunda y tercera etapas fueron, respectivamente, de 25, 26,6 y 27,4 °C; los valores medios registrados en el efluente de la laguna anaerobia en las mismas etapas fueron: 23,1, 23,3 y 24,5 °C; en el efluente final (efluente laguna facultativa) tales temperaturas fueron 22,4, 22,8 y 24,8 °C. Se registraron mayores valores en el afluente, pues los tubos colectores se encuentran bajo el suelo, donde la temperatura es más uniforme; los menores valores en los efluentes de las LE son consecuencia del enfriamiento de la masa líquida de las lagunas especialmente en la madrugada.

pH. El valor medio calculado para el pH medido en el afluente crudo fue de 6,95, en el efluente de la laguna anaerobia fue de 6,99 y en el efluente de la laguna facultativa,

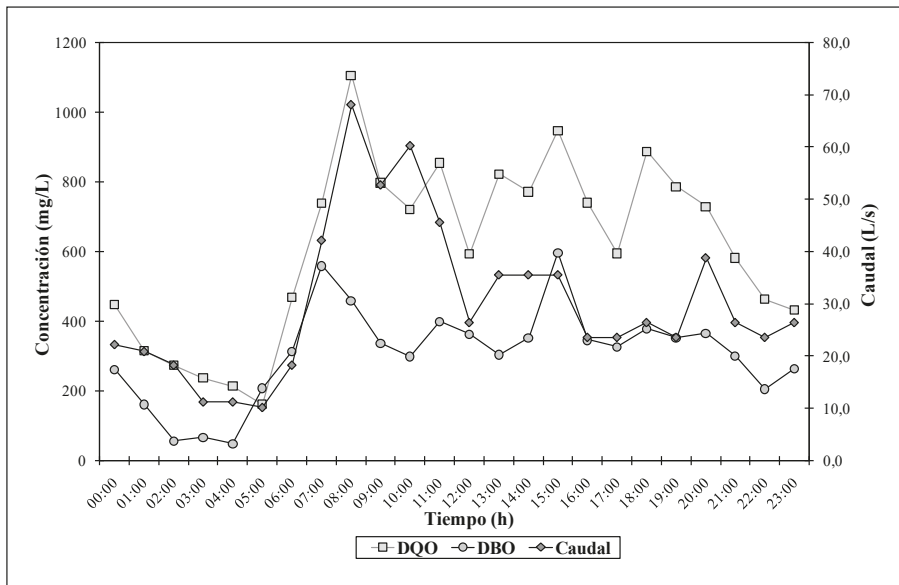


Figura 4. Variación del caudal, la DQO y DBO afluente a la PTAR a lo largo de 24h
Fuente: elaboración propia

de 7,17. El efluente final presentó valores ligeramente alcalinos, lo que indica que la laguna facultativa estuvo operando de manera correcta [6].

OD. En todas las mediciones, el AR cruda tuvo concentración nula de OD; los valores medios calculados para las lagunas anaerobia y facultativa fueron de 0,02mg/L y 0,96mg/L, respectivamente. Las bajas concentraciones registradas en el efluente final se debieron a que la medición del OD se ejecutó en horas de la mañana, cuando el proceso fotosintético tiene su inicio y pasa la eventual ausencia de OD nocturna [16].

DBO, DBO Filtrada y DQO. Usualmente la legislación define a la DBO como uno de los parámetros de control de una PTAR, específicamente para verificar la remoción de MO carbonácea. En plantas que incluyen lagunas facultativas dentro de sus esquemas de tratamiento, la medición de la DBO filtrada sirve como base para determinar la eficiencia real, ya que al evaluar solamente la DBO, la presencia de algas en el efluente puede aumentar los valores de la concentración final, enmascarando el real desempeño del tratamiento. La figura 5 presenta los valores medidos de DBO y DBO filtrada para los diversos puntos de muestreo durante la investigación; las concentraciones medias de DBO calculadas para el afluente crudo (DBO Af), el efluente de la laguna anaerobia (DBO EfLAn) y el efluente final (DBO EfLFac) fueron de 389, 124,7 mg/L y de 63,6 mg/L; por su parte la DBO filtrada promedio del efluente final (DBO EfF LFac) fue de 37,7 mg/L.

Pese a que la concentración media de DBO en el efluente final fue muy cercana a los 60 mg/L recomendados por el Decreto 8468 de 1976 [19], el 45 % de las muestras correspondientes superó tal concentración máxima definida por la legislación estatal.

La eficiencia media de remoción de DBO por la PTAR fue del 78,6 % y para la DBOF fue del 87,9 %. De las 20 colectas realizadas, 4 muestras reportaron valores por debajo del 80 %, mínimo exigido por la legislación estatal [19].

Las concentraciones medias de DQO total calculadas para el afluente crudo y los efluentes de las lagunas anaerobia y facultativa fueron de 908, 319,8 y 298,7 mg/L, respectivamente, y la eficiencia media de remoción de este parámetro por parte de la PTAR fue del 68,2 %.

Con base en la concentración media de DBO afluente a la PTAR y el caudal medio determinado en el monitoreo de 24 horas previamente comentada se estimó el valor de la carga orgánica aplicada en la planta que fue del orden de 1020 kilogramos de DBO/día (kgDBO/d). Para el análisis de la carga volumétrica que ingresó a la PTAR se utilizó la carga aplicada y el volumen útil de la laguna anaerobia (considerando la acumulación de lodo); tal carga estimada fue de 0,181 kg/DBO/m³/d, valor que estuvo

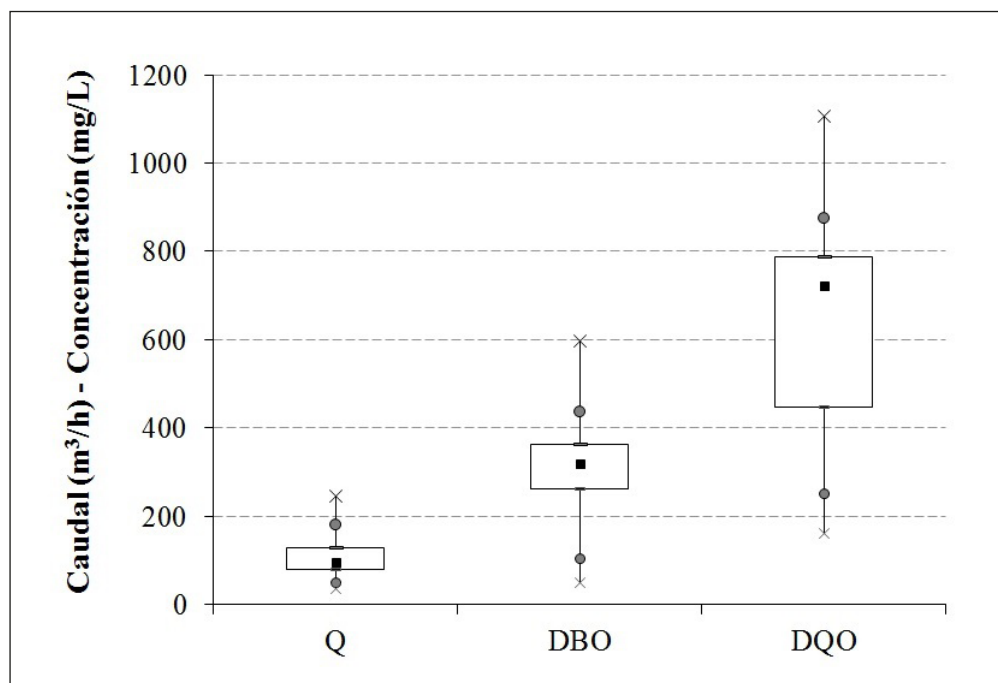


Figura 5. Concentraciones de DBO afluente y efluentes y DBO filtrada del efluente final

Fuente: elaboración propia

por encima del límite recomendado por Uehara y Vidal [20], de 0,04 a 0,08 kgDBO/m³/d, pero dentro de lo propuesto por von Sperling [16], entre 0,01 y 0,35 kgDBO/m³/d.

Para calcular la carga superficial que ingresó a la laguna facultativa se utilizó el caudal medio y la concentración media del efluente de la laguna anaerobia; el valor estimado fue de 327 kg de DBO/hectárea/día (kgDBO/ha/d) para un área superficial de 10.350 m²; valor que superó los 260 kgDBO/ha/d recomendado por Kawai et al [21] pero dentro del rango de 240 a 300 kgDBO/ha/d recomendado por von Sperling [16].

Pese a las buenas eficiencias registradas y para mantener y mejorar el desempeño de la planta se deben remover los sólidos sedimentados en la laguna anaerobia, aumentando así el TRH, la mezcla y la distribución apropiada del flujo.

En los exámenes bacteriológicos realizados al afluente y los efluentes, se determinó que los valores medios del NMP de CT/100mL fue de $8,76 \times 10^7$ en el afluente crudo; de $4,69 \times 10^7$ en el efluente de la laguna anaerobia, y de $1,44 \times 10^7$ en el efluente de la laguna facultativa; y que los valores medios del NMP de CF/100mL fueron de $3,06 \times 10^7$ en el afluente de la PTAR; de $7,28 \times 10^6$, en el efluente de la laguna anaerobia, y de $3,07 \times 10^6$, en el efluente final de la planta. Los promedios de las eficiencias de remoción de CT y CF por parte de la PTAR fueron de 77,6 y 78,2 %, respectivamente; tales valores se ven reflejados en las elevadas cantidades de microorganismos en el efluente final que en gran magnitud ha superado el máximo valor recomendado por la legislación ambiental brasilera, que establece que siempre sea inferior a 1000 CF/100mL. Por ser la corriente Jacu Queimado un tributario del Río Paraná, las cantidades de CF en el efluente final representan un posible riesgo de afectación negativa de la calidad del agua del cuerpo receptor final, en el que se ubican zonas traseras de fincas que utilizan el río como alternativa de transporte, pesca e incluso para natación. Por tales razones, la planta requiere de un pos-tratamiento para minimizar el ingreso de este tipo de microorganismos en la corriente Marruco y ajustarse a la legislación ambiental.

Las concentraciones medias calculadas para los ST en los diversos puntos de muestreo fueron: 807, 515 y 593 mg/L para el afluente crudo, el efluente de la laguna anaerobia y el efluente de la laguna facultativa, respectivamente. Las concentraciones medias de los sólidos para los mismos puntos en las concentraciones medias de STF fueron 285, 321 y 333 mg/L, y las de los STV fueron 523, 194 y 260 mg/L. Por su parte, las concentraciones medias de SST fueron de 375 mg/L en el efluente crudo, 134 mg/L en el efluente de la laguna anaerobia y 171 mg/L en el efluente final; los valores promedio calculados para sólidos disueltos en los mismos puntos fueron de 370, 329 y 422 mg/L. Con los resultados obtenidos se puede afirmar que existe remoción de sólidos del AR en la planta y se aprecia que las concentraciones en el efluente final

suelen ser mayores que las registradas en el efluente de la laguna anaerobia, lo que sumado a las eficiencias de remoción de la DBO y DBO filtrada indican que hubo una importante presencia de algas en el efluente de la laguna facultativa, las que deberán ser removidas por medio de un postratamiento.

La legislación del estado de São Paulo [19] establece que la máxima cantidad de SSed permitidos para vertimiento de efluentes es de 1,0 mL/L en el ensayo en cono de Imhoff. En la primera etapa de la investigación (época de lluvias), los valores superaron los límites recomendables, el valor medio calculado para el estudio fue 13mL/L, lo que indica que se requiere un postratamiento para cumplir con las directrices ambientales.

3. CONCLUSIONES

- La notoria acumulación de lodos en la laguna anaerobia ha reducido de manera considerable su volumen útil y compromete su capacidad de tratamiento al ser operada con un TRH menor que el recomendado por la literatura.
- La PTAR no logró el porcentaje mínimo de remoción de la DBO definido por la legislación estatal; de igual manera, los valores de CF y SSed superaron los valores exigidos por el Decreto 8468 de 1976.
- Se debe efectuar un dragado para la remoción controlada de los lodos acumulados en la laguna anaerobia e implementar un sistema de pos tratamiento que fortalezca la remoción de la DBO, los CF y los sólidos sedimentables.

REFERENCIAS

- [1] D. Mara, Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. London, UK: Earthscan Ed., 2004. 292 pp.
- [2] Mansur, A. M. Sistemas Econômicos de Tratamento de Esgotos Sanitários. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental—ABES, Rio de Janeiro, 2000. 192 pp.
- [3] Kellner, E., Pires, E. C. Lagoas de Estabilização-Projeto e Operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998. Pp. 13-17, 28-36, 48-59.
- [4] Van Haandel, A., Lettinga, G. (1994). Tratamento Anaeróbico de Esgotos—Um manual para regiões de clima quente. Editorial EPGRAF. Campina Grande (Brasil) 245 pp.
- [5] Kayombo S., Mbvette T. S. A., Katima J.H.Y, Ladegaard N., Jørgensen S.E. Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual. Osaka, Japan: United National Environment Programme, 2005. 59 pp.
- [6] Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT, Depuración por lagunaje de aguas residuales - Manual de operadores. Madrid – España: Centro de Publicaciones del MOPT, 1991. 169 pp.

- [7] Romero R. J. A. 2010. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Tercera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1248 pp.
- [8] Peña V. M., Mara, D. Waste Stabilisation Ponds. IRC International Water and Sanitation Centre. The Netherlands. 2004. 37 pp.
- [9] Organización Panamericana de la Salud –OPS–, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS–, Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. Lima, Perú: CEPIS, Unidad de apoyo técnico al saneamiento básico rural–UNATSABAR, 2005. 40 pp.
- [10] Crites, R., Tchobanoglous, G. Small and decentralized wastewater management systems. McGraw Hill, Boston, 1998. 1084 pp.
- [11] Centro de pesquisas meteorológicas e climáticas aplicadas à agricultura – CEPAGRI, 2013. Clima dos municípios paulistas. [Online]. Available: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_524.html.
- [12] IBGE, 2011. População por município censo 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponible en Internet URL: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_sao_paulo.pdf.
- [13] T. Matsumoto, I. A.Sánchez-Ortiz, “Desempeño de una laguna anaerobia con baffle divisor seguida de una laguna facultativa, posible afectación de la salud pública”, Universidad y Salud, vol. 11, n°. 13, pp. 46-60, 2011.
- [14] R. F. Gonçalves. (Coord.). Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. ABES, 2000. 64 pp.
- [15] APHA, AWWA & WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. Public Health Association Inc. New York, 1998.
- [16] Von Sperling, M. Lagoas de Estabilização - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, V. 3. 2.^a Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009. 196 pp.
- [17] Andreoli, C. V., Von Sperling, M., Fernandes, F. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, V. 6. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 pp.
- [18] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, Metcalf & Eddy Inc. 3.^a ed., 1991, 1334 pp.
- [19] São Paulo. Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. Disponible en Internet URL: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>

- [20] Uehara, M. Y., Vidal, W. L. Operação e Manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série Manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989, 91 pp.
- [21] Kawai, H., Yano, T., Rocha, M. J. M., Limas, A., Schneiderman, B. Estabelecimento de critérios para dimensionamento de lagoas de estabilização. Revista DAE, São Paulo, SABESP 41 (127) 37-45, dez. 1981.

