

Desempeño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de São João de Iracema (Brasil)

Performance of the Sewage Treatment Plant of São João de Iracema (Brazil)

Tsunao Matsumoto¹ , Iván Andrés Sánchez Ortiz²

¹Profesor Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil UNESP, Campus de Ilha Solteira (São Paulo-Brasil),

²Profesor Facultad de Ciencias Pecuarias, Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Universidad de Nariño (Pasto-Colombia). Correo electrónico: ivansaor@hotmail.com

Recibido: 13-01-2016. Modificado: 31-03-2016. Aceptado: 22-04-2016

Resumen

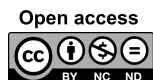
Contexto: Algunos de los más importantes parámetros medidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales –PTAR– son: materia orgánica, sólidos y organismos fecales. El objetivo de este trabajo fue realizar el diagnóstico del desempeño de la PTAR de São João de Iracema en la remoción de dichos parámetros.

Método: Se realizó un estudio batimétrico de las lagunas anaerobia y facultativa; se monitorearon el afluente y efluente de la PTAR en tres temporadas climáticas diferentes, cada una con duración de tres meses, por medio de la medición de oxígeno disuelto, pH, temperatura, DBO, DBO filtrada, DQO, sólidos y coliformes.

Resultados: Se registraron acumulaciones de lodos del 1,3 y 6,5 % del volumen de las lagunas anaerobia y facultativa; la remoción media de DBO fue del 73,6 %, inferior al 80 % recomendado por la legislación brasilera; la cantidad media de coliformes fecales en el efluente final fue de $9,55 \times 10^6/100\text{mL}$, que superó el máximo permitido de 1000/100mL.

Conclusiones: La PTAR necesita implementar un sistema de pos-tratamiento que garantice remoción adicional de materia orgánica y coliformes para ajustar el efluente a la normatividad ambiental.

Palabras clave: Aguas residuales urbanas, lagunas anaerobias y facultativas, monitoreo.



©The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: Matsumoto, T., Sánchez, I.: Desempeño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de São João de Iracema (Brasil). INGENIERÍA, Vol. 21, Num. 2, 2016 176:186. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a04>.

Abstract

Context: Some of the most important parameters measured in the sewage treatment plant –STP– are: organic matter, solids and faecal organisms. The objective of this work was to diagnose the performance of São João de Iracema STP for those parameters removal.

Method: A batimetric survey of the anaerobic and facultative lagoons; the STP influent and effluent monitoring in three different climate seasons of 3-month long each were conducted by dissolved oxygen, pH, temperature, BOD, filtered BOD, COD, solids and coliforms measuring.

Results: Sludge accumulations of 1.3 and 6.5 % in the anaerobic and facultative lagoons were registered; average BOD removal was of 73.6 %, smaller than the 80 % recommended by Brazilian legislation; the average faecal coliform number on final effluent was of $9.55 \times 10^6/100\text{mL}$, above the per-missible limit of 1000/100mL.

Conclusions: The STP needs to set-up a post treatment system that guarantees additional organic matter removal and fecal coliforms in order to adjust the effluent quality to the environmental legislation standards.

Keywords: Urban wastewater, anaerobic and facultative lagoons, monitoring

1. Introducción

A medida que la especie humana se propagó en la Tierra, organizándose en clanes y sociedades, desarrolló y produjo bienes y servicios destinados a atender necesidades cada vez más complejas. El hombre, con miras a su sobrevivencia y bienestar, en busca de lo que se convino llamar “progreso”, transforma constantemente el medio en el que vive, lo que en una escala mayor corresponde al propio Planeta Tierra. El cual, por otro lado, está también en constante transformación, reestructurando y reequilibrando sus aspectos físicos, químicos y biológicos, en una especie de equilibrio dinámico. En las últimas décadas, las acciones humanas han acelerado dicha transformación, haciendo el equilibrio del planeta cada vez más frágil y difícil. [1]

La “explosiva” urbanización del mundo y los problemas que trae aparejada esta situación en los grandes conglomerados urbanos constituye una de las temáticas más importantes de nuestro tiempo. La universalización de la urbanización es un fenómeno reciente en la historia del planeta. El proceso de urbanización observado en los países en desarrollo presenta gran concentración poblacional en pequeñas áreas, con deficiencias en los sistemas de transporte, de abastecimiento y saneamiento, problemas de contaminación del aire y el agua e inundaciones [2].

La expansión de la urbanización, del desarrollo industrial y de la producción agrícola sin una visión ambiental ejercen un significativo impacto en los recursos hídricos en términos cuantitativos y cualitativos. La sobreexplotación de los cuerpos de agua y el deterioro en la calidad del agua son tendencias globales [3] [4].

La extracción del líquido de las fuentes hídricas y la degradación de su calidad por fuentes puntuales y no puntuales, sumada a la falta de infraestructura y servicios de saneamiento en las comunidades conducen a la contaminación del agua [5]. Para reducir la contaminación del agua, y de esta manera también disminuir los impactos ambientales, se hace necesario el tratamiento de los efluentes; para ello se puede recurrir al tratamiento en el lugar de su generación, o fuera del local donde se originan las aguas residuales. Según UNEP [6], los sistemas de tratamiento de efluentes fuera del local de generación precisan de un sistema de alcantarillado que los transporta hacia una planta de tratamiento; el sistema convencional a gran escala más comúnmente implementado es el tratamiento por lodos activados. También existen sistemas como los filtros percoladores y los sistemas anaerobios, además de otros métodos simples, pero efectivos, entre los que se encuentran las lagunas de estabilización, el tratamiento de aguas residuales en el suelo y la acuicultura.

Las lagunas de estabilización son grandes cuerpos de agua ingenierilmente contruidos, los cuales pueden ser usados individualmente o en una serie de unidades. Existen tres tipos de lagunas: anaerobias, facultativas y aerobias (o de maduración), cada una de ellas con diferentes características de diseño y de tratamiento. Para maximizar la eficiencia en el tratamiento, las lagunas de estabilización deben disponerse en serie de tres o más unidades, cuyos efluentes fluirán

de la laguna anaerobia hacia la facultativa y finalmente hacia la laguna aerobia [7].

Los principales parámetros de diseño de las lagunas de estabilización y que definen en buena medida su desempeño son: su geometría, el tiempo de retención hidráulica, la profundidad, la tasa de aplicación volumétrica (para lagunas anaerobias) y la tasa de aplicación superficial (para lagunas facultativas) [8].

Además de la geometría de las lagunas, la posición, orientación y profundidad de las estructuras de entrada y salida pueden incidir en el desempeño de este tipo de unidades de tratamiento debido a su efecto sobre la eficiencia hidráulica de las lagunas [9].

El objetivo principal de la presente investigación fue diagnosticar la eficiencia de la PTAR de la ciudad São João de Iracema bajo las diferentes condiciones climáticas anuales. Para ello se monitorearon por medio de diversos parámetros físicos, químicos y microbiológicos el afluente y efluente de las lagunas de estabilización durante tres temporadas climáticas diferentes, con una duración de tres meses cada una; se efectuó el levantamiento batimétrico de las unidades de tratamiento y se realizó el aforo del afluente a la planta durante 24 horas consecutivas.

Con base en los resultados obtenidos se determinó la eficiencia de remoción de algunos parámetros de calidad del agua a la luz de la legislación brasilera y se formularon las recomendaciones del caso para mejorar el desempeño de la PTAR.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del municipio y de la PTAR

La investigación se desarrolló en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de São João de Iracema, localizado en la región centro oeste del estado de São Paulo (Brasil), cuya población, a partir de los resultados del censo de 2010, es del orden de 1780 habitantes [10]. Las aguas residuales del área urbana municipal son colectadas y transportadas por una red de alcantarillado sanitario hacia la PTAR, localizada en las coordenadas 20°30'25,43" S y 50°21'07,23" W, que está conformada por una laguna anaerobia y una facultativa secundaria.

La PTAR está constituida por dos lagunas de estabilización con formato rectangular, así: una laguna anaerobia de 40 m de largo, 16,5 m (área superficial de 660 m²) y 3,36 m de profundidad máxima; una laguna facultativa secundaria de 80 m de largo, 18 m de ancho (área superficial de 1.440 m²) y profundidad máxima de 1,96 m. Para la retención de los sólidos de mayor tamaño del afluente bruto, antes del ingreso a la primera unidad, PTAR disponía de una rejilla de barrotes horizontales. Los tubos de entrada y salida del líquido de las lagunas corresponden a tubos localizados en la parte central del lado respectivo. La entrada y salida de la laguna anaerobia, así como la entrada de la laguna facultativa trabajaban en condición sumergida, la salida de esta última se realiza mediante sistema *stop log*.

2.2. Aforo del caudal afluente y batimetría de las lagunas

En una experiencia previa, para efectos de conocer la variabilidad del caudal afluente a la PTAR se realizó el aforo del líquido afluente durante 24 horas consecutivas; adicionalmente se realizó un levantamiento batimétrico de las dos lagunas para así estimar la cantidad de lodo acumulado en las lagunas y el volumen útil disponible en cada unidad; las metodologías adoptadas para tal fin se encuentran descritas en [11].

2.3. Monitoreo del afluente bruto y efluentes de las unidades de tratamiento

Se realizó el monitoreo de las características de calidad del agua del afluente crudo (Af) —que a su vez fue el afluente a la laguna anaerobia—, del efluente de la laguna anaerobia (Ef An) y del efluente de la laguna facultativa (Ef Fac). El estudio se ejecutó por medio de tres etapas de colecta; la primera de ellas entre los meses de diciembre y febrero del primer año de monitoreo —periodo de verano lluvioso—; la segunda entre mayo y julio del segundo año, periodo de invierno seco; la última entre agosto y octubre del tercer año del estudio, periodo de primavera, incluyendo el inicio de la estación de lluvias. En la primera etapa se practicaron seis muestreos, mientras que tanto en la segunda como en la tercera etapa se realizaron siete muestreos; cada colecta consistió en la toma de muestras compuestas del líquido afluente a la PTAR y de los efluentes de las unidades de tratamiento.

La medición de los parámetros de calidad del agua se realizó siguiendo las metodologías descritas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [12], según los códigos que se describirán a continuación. Se midieron en campo, por medio de instrumentos portátiles los parámetros: pH (método electrométrico, 4500-H⁺B), oxígeno disuelto –OD– (membrana con electrodo, 4500-O G) y temperatura (método termo-eléctrico, 2550 B). Las muestras se dispusieron en frascos apropiados para tal fin, se almacenaron en cajas refrigeradas y se transportaron al laboratorio de Hidráulica y Saneamiento de la Universidade Estadual Paulista –UNESP–, campus de Ilha Solteira, donde se realizaron las mediciones correspondientes a los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno –DBO– y DBO filtrada (Ensayo al 5° día, 5210 B), demanda química de oxígeno –DQO– (método de reflujo abierto, 5220 B), sólidos totales, fijos y volátiles –ST, STF, STV– (métodos gravimétricos 2540 B y 2540 E), sólidos suspendidos, fijos y volátiles –SS, SSF, SSV– (métodos gravimétricos 2540 D y 2540 E), coliformes totales y fecales –CT y CF– (técnica de diluciones en tubo múltiple, 9221).

2.4. Determinación del caudal crítico en el cuerpo receptor

El cuerpo de agua que recibe el efluente de la PTAR y que posteriormente vierte sus aguas en el río São José dos Dourados consiste en un arroyo que durante la época de sequía presenta un bajo flujo; por tal motivo se calculó el caudal para condiciones críticas para compararlo con el caudal medio de la planta de tratamiento y estimar de manera preliminar su capacidad de dilución. Para tal fin se calculó, con base en informaciones topográficas y fotografía satelital, el área de la microcuenca en la cual se encuentra ubicada la PTAR; con esa información y la localización del punto de vertimiento del efluente, se ingresaron los datos pertinentes a la regionalización hidrológica del estado de São Paulo, que el Departamento de Aguas y Energía Eléctrica de dicho estado ha dispuesto online [13]; y a partir de los datos históricos registrados para la cuenca del río São José dos Dourados se calculó el caudal medio mínimo durante siete días consecutivos con probabilidad de retorno de diez años.

2.5. Análisis de los datos

Para analizar de manera más rigurosa los datos asociados a los parámetros de calidad del agua se realizaron análisis estadísticos que permitieron identificar si hubo diferencias significativas entre los puntos monitoreados. Para ello, por medio del software Minitab R16 se ejecutaron análisis de varianza; cuando al menos uno de los tratamientos reportó diferencias estadísticamente significativas para un nivel de significancia de $P < 0,05$ se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, para de esa manera determinar cuáles tratamientos fueron diferentes.

3. Resultados y discusiones

3.1. Variación del caudal afluente y batimetría de la PTAR

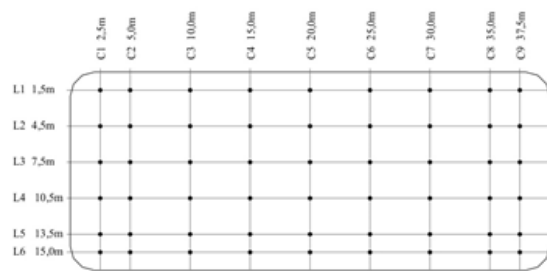
A partir del monitoreo de 24 horas del líquido afluente a la planta de tratamiento se determinó que el caudal osciló entre 0,02 y 2,54 L/s; el caudal medio calculado fue de 1,11 L/s, equivalente a 93,904 m³/d. Los valores máximos se registraron al inicio de la mañana, al medio día y al inicio de la noche.

El levantamiento batimétrico indicó que las profundidades medias de las lagunas anaerobia y facultativa fueron de 2,42 y 1,67 m; por ello, sus volúmenes teóricos útiles respectivos fueron de aproximadamente 1.600 y 2.400 m³.

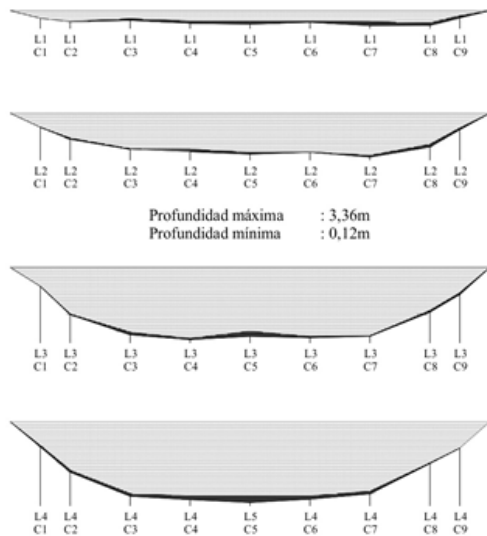
El volumen de lodo acumulado en la laguna anaerobia fue de 20,7 m³; que al ser restado al volumen teórico útil y considerando el caudal medio afluente representa un tiempo de retención hidráulica (TRH) útil de 16,4 días. La figura 1 ilustra una vista en planta de la disposición de los ejes longitudinales y transversales utilizados, así como ejemplos de los perfiles longitudinales obtenidos en la laguna anaerobia.

La sedimentación de los lodos se dio de manera uniforme, sin presentar zonas de acumulación críticas. El bajo volumen de lodos acumulado únicamente redujo el TRH teórico en un 1,26 %, lo que no genera alteraciones significativas en el desempeño hidráulico del sistema (como caminos de flujo preferencial o cortos circuitos); y por ende, puede considerarse que no afectó la eficiencia de la PTAR por tal concepto. El tiempo de retención útil calculado para la laguna anaerobia presentó valor muy superior a los recomendados por von Sperling [8] y por la Compañía de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo [14], de tres a seis días para dicho tipo de lagunas.

Disposición de los ejes para el levantamiento batimétrico de la laguna anaerobia



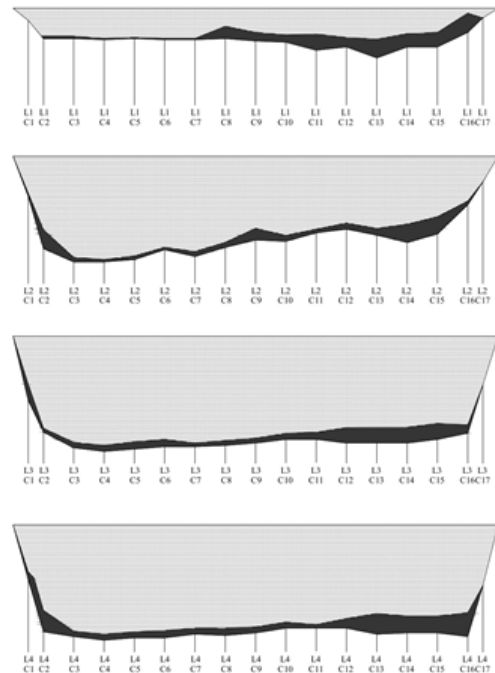
Ejemplos de perfiles longitudinales laguna anaerobia



Disposición de los ejes para el levantamiento batimétrico de la laguna facultativa



Ejemplos de perfiles longitudinales laguna facultativa

**Figura 1.** Vista en Planta y perfiles longitudinales y transversales de la laguna anaerobia.**Figura 2.** Vista en planta y perfiles longitudinales de la laguna facultativa.

El volumen de lodo acumulado en la laguna facultativa fue de $155,52 \text{ m}^3$, que representaría una altura media del orden de $0,108 \text{ m}$. Al restar el volumen de lodos al valor del volumen teórico, y al considerar el caudal medio afluente a la PTAR se determinó que el TRH útil de la unidad de tratamiento fue de $23,3$ días.

En la figura 2 se ilustra la vista en planta de la laguna facultativa, la disposición de los ejes longitudinales y transversales utilizados para efectuar el levantamiento batimétrico, y algunos de los perfiles longitudinales obtenidos. En dicha figura se puede observar que la acumulación de lodos sedimentados se concentró fundamentalmente en las zonas cercanas a los puntos de ingreso del afluente (sentido de flujo de derecha a izquierda), lo que evidenció las labores de remoción de sólidos que escapan de la laguna anaerobia.

El tiempo de retención útil calculado para la laguna superó el valor mínimo de 4 días recomendado por Peña y Mara [15]; así mismo, estuvo por encima del rango de valores recomendado por von Sperling [8] $7,5$ a $22,5$ días para lagunas facultativas.

La mayor acumulación de lodos en la laguna facultativa, principalmente en su tercio inicial indica la remoción de sólidos que no lograron sedimentar en la laguna anaerobia; la presencia de una capa de lodos relativamente homogénea en el resto de esta unidad, puede indicar la sedimentación de parte de la biomasa que perece –principalmente algas– después de cumplir su ciclo vital.

3.2. Caudal crítico del arroyo

El punto de vertimiento de los efluentes de la PTAR sobre el arroyo receptor se localiza en las coordenadas $20^{\circ}30'25,43''$ de latitud Sur y $50^{\circ}30'21'07,23''$ de longitud Oeste. El área tributaria de la microcuenca que aportaría escurrimiento

superficial directo sobre el cuerpo receptor es del orden de $5'666.500\text{m}^2$, con un perímetro de 9242 metros lineales. Para tales datos, y con base en la regionalización hidrológica del estado de São Paulo se determinó que para una precipitación media de 1203,6 mm el caudal mínimo anual estimado para 7 días consecutivos y un período de retoro de 10 años ($Q_{7,10}$) es de $0,009\text{ m}^3/\text{s}$.

3.3. Monitoreo de los afluentes y efluentes de las lagunas

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para los parámetros analizados sobre muestras simples tomadas entre 9:00 y 10:00 de la mañana durante las tres fases del monitoreo de la PTAR.

3.3.1. Oxígeno disuelto

Las concentraciones medias de OD registradas a lo largo del estudio fueron de $0,1\text{ mg/L}$ tanto para el afluente crudo, como para el efluente de la laguna anaerobia, y de $1,9\text{ mg/L}$ para el efluente de la laguna facultativa (efluente final de la PTAR). Dicha situación fue corroborada por el análisis estadístico por medio de ANOVA, que reportó diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de oxígeno disuelto en los puntos de monitoreo; según la prueba de Tukey el OD del afluente bruto presentó valores semejantes a los registrados en el efluente de la laguna anaerobia y que éstos fueron diferentes a los del efluente de la laguna facultativa. Las mayores concentraciones se registraron en la primera etapa, correspondiente al periodo de lluvias, con un valor medio en el efluente de la laguna facultativa de $6,2\text{ mg/L}$, donde muy probablemente las precipitaciones ayudaron a incrementar la transferencia del oxígeno atmosférico a la masa líquida.

3.3.2. Temperatura

El ANOVA indicó que hubo diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas del líquido en los tres puntos de muestreo; con la prueba de Tukey se identificaron dos grupos con comportamientos semejantes: uno determinado por la temperatura del afluente a la PTAR y el otro por las temperaturas de los efluentes de las lagunas anaerobias y de la facultativa; las temperaturas medias calculadas fueron de $26,5^\circ\text{C}$ para el afluente crudo, $24,1^\circ\text{C}$ para el efluente de la laguna anaerobia y $23,4^\circ\text{C}$ en la laguna facultativa. La reducción de la temperatura se pudo deber al enfriamiento de la masa líquida contenida en las lagunas, especialmente en horas de la madrugada; por su parte, el afluente bruto mantuvo una temperatura más elevada y con menor variación debido a que los tubos del alcantarillado sanitario se encuentran enterrados en el suelo, donde la temperatura es más uniforme.

3.3.3. pH

Durante las tres fases de la investigación se apreció que hubo una disminución en los valores de pH en el efluente de la unidad anaerobia (valor medio de 6,9) con respecto a su afluente (valor medio de 7,2), lo cual se podría atribuir a la fase acidogénica de la degradación anaerobia, según lo comenta Chernicharo [16]. De igual manera, se observó que el efluente de la laguna facultativa, cuyo valor medio fue de 7,5 siempre registró valores superiores a los de su afluente, lo que se explica por los intensos procesos fotosintéticos, propios de las lagunas facultativas Mara [17]. Tales situaciones fueron ratificadas por medio del análisis de varianza y la prueba de Tukey, que reportaron diferencias significativas entre los tres puntos de muestreo.

3.3.4. DBO, DBO Filtrada y DQO

La DBO del afluente crudo varió entre 290 y 738 mg/L , con valor medio de 496 mg/L , mientras que la DQO osciló entre 764 y 1890 mg/L , con promedio de 1186 mg/L . Con tales valores se tiene que la relación DQO/DBO varió entre 1,27 y 4,70, con un promedio de 2,61, ligeramente superior a las relaciones típicas reportadas por Metcalf & Eddy [18], lo que sugiere que las aguas residuales domésticas reciben efluentes que afectan la biodegradabilidad de la materia orgánica al hacer que la relación DQO/DBO adquiera valores superiores a 2,5 [19]. El tipo de efluentes que pueden producir esas condiciones en el municipio estudiado es el generado en la producción casera de derivados lácteos, característica de São João de Iracema. A continuación, las figuras 3 y 4 esquematizan la variación de las concentraciones de DBO y DQO, medidas en los tres puntos de monitoreo durante todo el periodo de investigación.

El análisis estadístico por medio de ANOVA reportó que hubo diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de DBO medidas en los puntos de monitoreo; por su parte, la prueba de Tukey indicó que la DBO bruta afluente a la PTAR presentó valores diferentes a los registrados en las otras unidades de tratamiento, que formaron otros dos grupos,

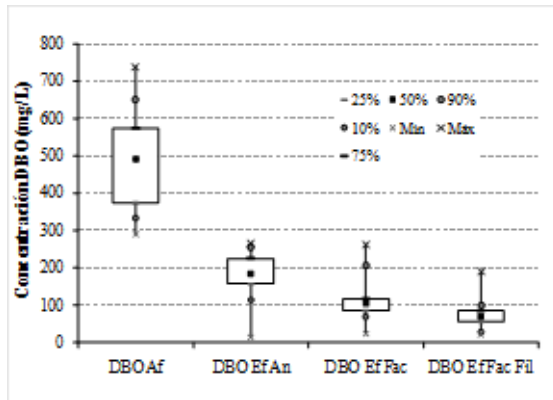


Figura 3. Diagramas de cajas y bigotes para concentraciones de DBO registradas en la PTAR.

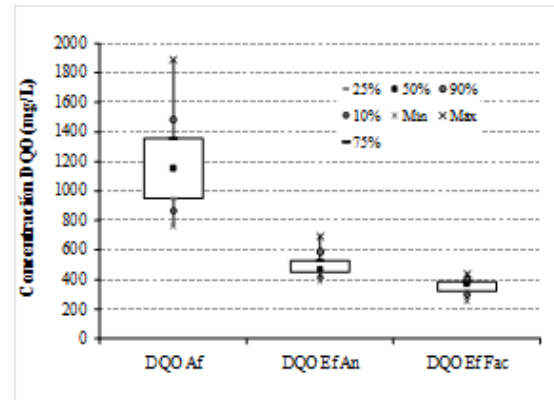


Figura 4. Diagramas de cajas y bigotes para concentraciones de DQO registradas en la PTAR.

donde las concentraciones efluentes de la laguna anaerobia presentaron similitud con las del efluente de la laguna facultativa; y las DBO efluente y filtrada de esta última unidad de tratamiento también presentaron comportamiento estadísticamente semejante.

En lo que concierne a la DQO, según el ANOVA hubo diferencias significativas para las concentraciones registradas en los tres puntos de muestreo; a partir de la prueba de Tukey se observó que las diferencias se mantuvieron para todos y cada uno de dichos puntos.

Con base en la concentración media de DBO y el caudal medio afluente se estimó que la carga orgánica media aplicada a la planta fue de 47,6 kgDBO/d; a partir de dicha carga y el volumen efectivo de la laguna anaerobia se estimó que la carga volumétrica media que ingresó a la PTAR fue del orden de 0,030 kg DBO/m³/d. Tal valor es inferior a los rangos recomendados por Oakley [20], de 0,1 a 0,4 kg DBO/m³/d; tal situación pudo obedecer a un sobredimensionamiento de la unidad de tratamiento, como resultado de una sobre-estimación de la población futura del municipio de São João de Iracema. El efluente de la laguna anaerobia (afluente de la unidad facultativa) registró una concentración promedio de 181 mg/L de DBO, con variación entre 14 y 267 mg/L. Con los valores medios de DBO afluente y efluente de la laguna anaerobia se determinó que su eficiencia media de remoción fue del 63,5 %.

Al calcular la carga orgánica superficial que recibió la laguna facultativa nuevamente se utilizó el caudal medio anteriormente calculado, ya que dicho valor puede representar el efecto regulador de las variaciones de los caudales efluentes de la laguna anaerobia. La carga diaria calculada para un área superficial de 1440 m² fue de 118 kilogramos de DBO/hectárea/día (kgDBO/ha/d); mayor a las cargas de 15 a 80 kgDBO/ha/d recomendadas por USEPA [21] para poblaciones en latitudes con inviernos bastante fríos, y bastante inferior al rango entre 240 y 300 kgDBO/ha/d recomendado por von Sperling [8], para zonas con invierno caliente y alta insolación. Nuevamente, dicha situación pudo deberse al sobredimensionamiento de la laguna facultativa, resultado de una sobre-estimación de la población municipal proyectada.

La DBO en el efluente de la laguna facultativa registró valores entre 24 y 263 mg/L, con una concentración media de 115 mg/L, lo que representó una eficiencia de remoción media de 76,8 %. La eficiencia promedio final se encontró por debajo del mínimo porcentaje exigido en el Decreto 8464 de 1976 [22]; de igual manera, la concentración media superó a la máxima recomendada de 60 mg/L. Por su parte, la concentración media de la DBO filtrada fue de 73 mg/L, representando una eficiencia de remoción del 85 % de la DBO; dicha situación pone de manifiesto la necesidad de implementar un postratamiento en la PTAR con el fin de lograr remociones adicionales de materia orgánica, reducir el impacto ambiental sobre el cuerpo receptor y enmarcar el desempeño de la PTAR en lo estipulado por las directrices ambientales.

La insuficiente remoción de la materia orgánica puede explicarse principalmente por la relativamente baja biodegradabilidad del afluente; como complemento a ello podría justificarse por la baja carga orgánica volumétrica que ingresó a la laguna anaerobia, y la baja tasa de aplicación superficial que recibió la laguna facultativa. Probablemente

el dimensionamiento de la PTAR haya obedecido al análisis de un crecimiento poblacional estimado mayor al que efectivamente ha experimentado el municipio, lo que reflejaría las aparentes condiciones de sobre-dimensionamiento de la planta.

Las anteriores consideraciones cobran mayor peso al comparar el desempeño de la PTAR con el de estudios similares en otras plantas de tratamiento localizadas también en la cuenca hidrográfica del Río São José dos Dourados, tales como la PTAR de Santa Fé do Sul [23], constituida por una laguna anaerobia con baffle divisor, seguida de una laguna facultativa secundaria, y cuya eficiencia media de remoción de la DBO estuvo en torno del 89 %; y la PTAR de Ilha Solteira [24], conformada por dos lagunas facultativas primarias operando en paralelo, cuya remoción media de la DBO superó ligeramente el 80 %. Los afluentes a las plantas de tratamiento en mención registraron concentraciones medias de DBO y DQO menores a las medidas en São João de Iracema; adicionalmente, las correspondientes relaciones DQO/DBO indicaron valores que sugieren alta biodegradabilidad de las aguas residuales domésticas.

Al considerar el valor del $Q_{7,10}$ junto con el caudal medio calculado durante el periodo del monitoreo, se evidencia un alto riesgo de impacto ambiental negativo sobre el cuerpo receptor, pues el bajo flujo disponible en el arroyo en los periodos secos solamente garantizaría una capacidad de dilución del orden de 8 a 1.

3.3.5. Sólidos totales y suspendidos

Las concentraciones medias de ST, STF y STV en el afluente crudo fueron de 1522, 573 y 949 mg/L respectivamente; en el efluente de la laguna anaerobia los valores medios fueron: 842, 438 y 404 mg/L para ST, STF y STV respectivamente; en el efluente de la laguna facultativa las concentraciones correspondientes fueron de 1045, 475 y 570 mg/L. Los valores promedio de SST, SSF y SSV del afluente crudo fueron respectivamente de 436, 112 y 324 mg/L; en el efluente de la laguna anaerobia tales valores fueron en el mismo orden: 187, 57 y 131 mg/L; dichas concentraciones en el efluente final fueron de 192, 65 y 127 mg/L respectivamente. Los resultados obtenidos representaron remociones medias de los sólidos totales del orden de 31,3 % y de los sólidos suspendidos totales de 55,9 %.

Los análisis por medio del ANOVA reportaron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de sólidos totales y sólidos suspendidos medidas en los puntos de monitoreo. Con las pruebas de Tukey se observó que los sólidos totales del afluente y del efluente final de la PTAR presentaron comportamientos similares, ello se explica debido a la alta productividad primaria de la última unidad de tratamiento, que se traduce en una generación de biomasa sólida; para los sólidos suspendidos, los efluentes de la laguna anaerobia y los de la laguna facultativa también presentaron similitudes.

La concentración de sólidos en el efluente final es relativamente alta, probablemente debido a la elevada presencia de algas en la laguna facultativa y al tipo de dispositivo de salida de dicha unidad, conformado por un sistema *stop-log*, que capta el efluente de la parte superficial de la laguna, facilitando el arrastre de sólidos flotantes como el fitoplancton. En el efluente final podría disminuirse la migración de sólidos suspendidos por medio de dispositivos de salida sumergidos, que privilegien la salida del líquido y restrinjan el arrastre del material flotante.

3.3.6. Coliformes totales y fecales

El número más probable (NMP) de CT/100mL en el afluente crudo osciló entre $4,20 \times 10^5$ y $3,33 \times 10^8$; en el efluente de la laguna anaerobia entre $4,80 \times 10^4$ y $9,90 \times 10^8$ y en el efluente final varió desde $8,10 \times 10^3$ hasta $3,33 \times 10^8$. Los valores medios del NMP en dichos puntos fueron de $6,50 \times 10^7$, $7,96 \times 10^7$ y $5,01 \times 10^7$ CT/100 mL, respectivamente.

En el afluente crudo el NMP de CF/100mL registrado osciló entre $1,34 \times 10^5$ y $1,12 \times 10^8$, con un valor promedio de $2,13 \times 10^7$; en el efluente de la laguna anaerobia osciló entre $2,80 \times 10^4$ y $7,80 \times 10^7$, con un valor medio de $1,40 \times 10^7$; en el efluente de la laguna facultativa varió entre $4,80 \times 10^3$ y $6,48 \times 10^7$, con un promedio de $1,06 \times 10^7$. Los resultados del ANOVA para CT y CF evidenciaron que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre la cantidad de microorganismos medidas en los puntos de monitoreo, situación que se hace evidente como resultado del bajo desempeño de las unidades de tratamiento en la remoción o inactivación de los coliformes.

La legislación ambiental vigente para el estado de São Paulo exige que para cuerpos de agua Clase 2 –en el cual se enmarca el arroyo– el NMP de coliformes fecales sea menor a 1000 CF/100mL; como se puede observar, la can-

tividad registrada en el efluente de la laguna facultativa es excesivamente alta para la disposición final en la corriente receptora, lo que sugiere la necesidad de un tratamiento adicional al agua residual.

Las elevadas concentraciones de SS en lagunas de estabilización es un aspecto que pudo incidir en la baja eficiencia de fotoinactivación de microorganismos observada en la PTAR en cuanto a CF, tal como lo reportan Bolton et al. [25]. La permanente presencia de altas cantidades de CF en el efluente de la laguna facultativa indicó la necesidad de implementar un sistema de postratamiento del efluente final, por ejemplo, por medio de una laguna de maduración.

La baja capacidad de dilución del arroyo en condiciones críticas sugiere la contaminación del agua, el daño a la biota acuática y un riesgo para la salud humana por la eventual transmisión de enfermedades relacionadas con las excretas humanas. Mara [14] afirma que el tratamiento de las aguas residuales puede omitirse cuando la capacidad de dilución del cuerpo receptor sea superior a 500, ya que el impacto producido puede considerarse como despreciable.

Por los motivos anteriormente citados y reafirmando lo expresado en el análisis de remoción de MO, la PTAR requiere de un pos-tratamiento que reduzca de manera significativa el número de microorganismos en el efluente final; opciones para ello pueden ser la implantación de sistemas de tratamiento naturales como lagunas de maduración –que sacaría provecho de la alta insolación predominante en la región estudiada–, humedales construidos de flujo superficial o subsuperficial, o sistemas de tratamiento más sofisticados, basados en procesos físicoquímicos. Dadas las condiciones tecnológicas, económicas y sociales propias del municipio, así como la disponibilidad de área para ampliar la PTAR, cobra importancia la realización de estudios que permitan determinar la mejor opción de pos-tratamiento que al mismo tiempo garantice altas eficiencias y bajo costo de implantación, operación y mantenimiento.

4. Conclusiones

Las bajas tasas de carga orgánica aplicadas a las lagunas anaerobia y facultativa explicaron el bajo desempeño de la planta de tratamiento en términos de la remoción de la DBO.

El NMP de coliformes fecales registrado en el efluente final sobrepasó en gran medida el máximo valor permitido por la legislación federal y establece riesgos biológicos por eventual contacto humano con el líquido del cuerpo receptor, dada su baja capacidad de dilución.

La alta insolación predominante en la zona de la PTAR y las características económicas, sociales y tecnológicas de la región justifican la evaluación de opciones de pos-tratamiento naturales para enmarcar la calidad del efluente final en los requisitos establecidos por la legislación ambiental vigente.

Referencias

- [1] Brasil, Ministério da Saúde - Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento, 4. ed. Brasília: Ministério da Saúde, FUNASA, 2015.
- [2] J. Bertoni and C. Tucci, "Urbanización", in *Inundações Urbanas na América do Sul*, C. Tucci and J. Bertoni, Org. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, pp. 1-9.
- [3] B. Gutterer, L. Sasse, T. Panzerbieter and T. Reckerzügel, *Decentralised Wastewater Treatment Systems (DE-WATS) and Sanitation in Developing Countries: A Practical Guide*. Germany: Water, Engineering and Development Centre, Loughborough University and Bremen Overseas Research and Development Association, 2009.
- [4] C. Tucci, "Aguas urbanas", in: *Inundações Urbanas na América do Sul*, C. Tucci and J. Bertoni, Org. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, pp. 11-44.
- [5] United Nations Environment Programme and Global Environment Centre Foundation, *Water and Wastewater Reuse: An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management*. Osaka, Japan: UNEP-GEC, 2004.
- [6] United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Environmental Technology Centre (IETC). *Environmentally sound technologies in wastewater treatment for the implementation of the UNEP Global Programme of Action (GPA) "Guidance on municipal wastewater"*, 2000. [Online]. Available: http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/SB_summary/index.asp

- [7] E. Tilley, L. Ulrich, C. Lüthi, P. Reymond and C. Zurbrügg, *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Ed. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Department Water and Sanitation in Developing Countries (Sandec), 2014.
- [8] M. von Sperling, *Lagoas de Estabilização - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, v.3. 2nd Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009.
- [9] R. Oliveira, H. Pearson, J.V.N. Silva, J. Sousa, V. Leite and W. Lopes, "Baffled primary facultative ponds with inlets and outlets set at different levels treating domestic wastewater in northeast Brazil", presented at 8th IWA specialist group conference on waste stabilization ponds - 2nd Latin-American conference on waste stabilization ponds, Belo Horizonte, Brazil, 2009.
- [10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, "População por município censo 2010", dez. 2015. [Online]. Available: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/SP2010.pdf.
- [11] I. Sánchez and T. Matsumoto, "Estudio de batimetría y eficiencia de un sistema de lagunas de estabilización", *Revista de ciencias agrícolas*, vol. 29, no. 1, pp. 65-78, Jan./June 2013.
- [12] American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20 Ed. Washington, D.C.; APHA, AWWA & WPCF, 1998.
- [13] Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo DAEE, "Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo", fev. 2016. [Online]. Available: <http://143.107.108.83/cgi-bin/regnet.exe?lig=podfp>
- [14] Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), "Norma Técnica Sabesp NTS 230: Projeto de lagoas de estabilização e seu tratamento complementar para esgoto sanitário", São Paulo, Junho 2009.
- [15] M. Peña and D. Mara, *Waste Stabilisation Ponds*. The Netherlands: IRC International Water and Sanitation Centre, 2004.
- [16] C. Chernicharo, *Reactores anaerobios- Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales*, v.5. San Juan de Pasto: Editorial Universitaria, Universidad de Nariño, 2013.
- [17] D. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan Ed, 2004.
- [18] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse* 4th Ed. New York: Metcalf & Eddy Inc., 2003.
- [19] M. von Sperling, *Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales - Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales*, v.1. San Juan de Pasto: Editorial Universitaria, Universidad de Nariño, 2012.
- [20] S. M. Oakley, *Lagunas de estabilización en Honduras: Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. California: United States Agency for International Development (USAID), 2005.
- [21] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Wastewater Technology Fact Sheet Facultative Lagoons", Municipal Technology Branch, Washington, 2002.
- [22] 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. [Online]. Available: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>.
- [23] T. Matsumoto and I. Sánchez, "Desempeño de una laguna anaerobia con baffle divisor seguida de una laguna facultativa, posible afectación de la salud pública", *Revista universidad y salud*, vol. 13, no. 1, pp. 46-60, Jan./June 2011.
- [24] I. Sánchez and T. Matsumoto, "Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de Ilha Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias", *Revista ingeniería y desarrollo*, vol. 30, no. 2, pp. 199-222, Jul./Dec. 2012.
- [25] N. Bolton, N. Cromar, N. Buchanan and H. Fallowfield, "Variations in sunlight attenuation in waste stabilisation ponds and environmental waters", presented at 8th IWA specialist group conference on waste stabilisation ponds, Adelaide, Australia, 2011.

Tsunao Matsumoto.

Brasileño, Ingeniero Civil de la Fundação Valeparaibana de Ensino (Brasil); Especialista en Technical Trainee Pollution Control del Pollution Control Center de Japón; M.Sc. y Ph.D. en Ingeniería Hidráulica y Saneamiento de la Universidade de São Paulo, USP, Brasil y Livre Docente de la Universidade Estadual Paulista (UNESP) Júlio de Mesquita Filho, Campus de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. Trabaja desde 1982 como Profesor del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la UNESP, Campus de Ilha Solteira. e-mail: tsunao@feis.unesp.br

Iván Andrés Sánchez Ortiz.

Colombiano, Ingeniero Civil y Especialista en Docencia Universitaria y en Alta Gerencia de la Universidad de Nariño (Colombia); M.Sc. en Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos de la UNESP, Campus de Ilha Solteira, Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidade Federal de Viçosa (Brasil). Trabaja desde 2003 como profesor del Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño. e-mail: iaso@udenar.edu.co