



SECCIÓN ARTÍCULOS ORIGINALES
Año 11 Vol. 1 N° 13 – 2011 (Págs. 46 - 60)

DESEMPEÑO DE UNA LAGUNA ANAEROBIA CON BAFLE DIVISOR SEGUIDA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA, POSIBLE AFECTACIÓN DE LA SALUD PÚBLICA

Tsunao Matsumoto¹, Iván Andrés Sánchez Ortiz²

Fecha de recepción: Febrero 26-2011

Fecha de aceptación: Junio 13-2011

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia de la estación para tratamiento de aguas residuales de la ciudad Santa Fé do Sul (São Paulo) y definir posibles efectos en la salud pública producidos por la calidad del efluente final. Se realizó un estudio batimétrico de las lagunas de estabilización anaerobia con baffle divisor y facultativa para formar un perfil de acumulación de lodos; se monitoreó durante 24 horas consecutivas el afluente bruto y los efluentes de las lagunas para diagnosticar el comportamiento de la Estación. La eficiencia media de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno fue del 89%, mayor que la mínima eficiencia exigida por la legislación brasilera vigente. La cantidad de coliformes fecales superó en gran medida los valores permitidos; sin embargo, la concentración de sólidos sedimentables cumplió a cabalidad con la norma ambiental presentando valores menores a 1,0 mL/L. Los resultados mostraron que la estación requiere labores de mantenimiento de la laguna anaerobia, así como mayor control operacional y mantenimiento más efectivos. Se evidenció la necesidad de implementar un sistema de pos tratamiento que garantice la reducción de los coliformes fecales del efluente final como medida para disminuir posibles riesgos a la salud pública en la zona de descarga y aguas abajo del punto de vertimiento final.

Palabras clave: Aguas residuales urbanas, lagunas de estabilización, monitoreo, salud pública

ABSTRACT

The main objective in this research was to evaluate the efficiency of the sewage treatment plant of Santa Fé do Sul city (São Paulo) and to define possible effects on public health produced by the final effluent quality. A bathymetric study of the anaerobic with baffle and facultative stabilization ponds was done in order to define the sludge accumulation profile; the raw influents and the lagoons effluents were monitored during 24 consecutive hours to diagnose the Plant performance. The average efficiency of the biochemical oxygen demand was 89%, higher than the minimum efficiency allowed by the Brazilian current legislation. The amount of fecal coliforms highly exceeds the permitted values;

-
1. Ingeniero Civil, M.Sc. y Ph.D. en Hidráulica y Saneamiento. Profesor Departamento de Ingeniería Civil Universidad Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira. e-mail: tsunao@feis.unesp.br
 2. Ingeniero Civil, Esp. y M.Sc. en Ingeniería Civil. Profesor Asistente Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad de Nariño. e-mail: iaso@udenar.edu.co

however the settleable solids concentration achieved the environmental regulation with values lower than 1, 0 mL/L. The results indicated that the station requires maintenance works at the anaerobic pond, a better operational control and more effective maintenance. It was shown the need to install a post treatment system to guarantee the reduction of the fecal coliforms at the final effluent as an action to diminish the public health possible risks in the discharge zone and downstream of the final dump point.

Key words: Urban wastewater, waste stabilization ponds, monitoring, public health

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de lagunas de estabilización son la forma más simple del tratamiento de aguas residuales. Una laguna de estabilización es 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. Cuando las aguas residuales se disponen en la laguna, en ella se realiza de manera espontánea, un proceso de autodepuración o estabilización natural, con ocurrencia de fenómenos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico MANSUR.¹

De acuerdo con Kellner y Pires,² las lagunas de estabilización se proyectan para el tratamiento de aguas residuales, por medio de interacción de las biomasas (algas, bacterias, protozoarios, entre otros), 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.

Las lagunas de estabilización son usualmente el método más recomendable para tratamiento de aguas residuales (AR) de origen doméstico y municipal en países en vías de desarrollo PEÑA y MARA.³ La facilidad de operación y mantenimiento y los bajos costos en términos operacionales hacen de este tipo de sistemas una opción atractiva para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Sin embargo, normativas

ambientales tales como la colombiana, por medio de la Norma RAS 2000,⁴ establecen que el tratamiento por lagunas de estabilización puede ser aplicable en casos en los cuales la biomasa de algas y los nutrientes que se descargan en el efluente puedan ser asimilados sin problema por el cuerpo receptor.

Según Uehar y Vidal,⁵ entre los factores naturales que pueden afectar las condiciones hidráulicas y biológicas que forman parte del proceso de tratamiento de AR en lagunas de estabilización se encuentran fenómenos meteorológicos y variables intrínsecas a las condiciones locales como: vientos; temperatura; precipitaciones; evaporación; y radiación solar. Existen factores físicos que suelen estar involucrados en el diseño de este tipo de sistemas de tratamiento tales como el área superficial y la mezcla, que a su vez se encuentra muy afectada por la intensidad y dirección del viento y por la temperatura.

De acuerdo con Crites y Tchobanoglous,⁶ las lagunas de estabilización se clasifican teniendo en cuenta la concentración de oxígeno disuelto y la fuente que suministra el oxígeno necesario para la asimilación bacteriana de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Los cuatro principales tipos de sistemas de lagunas clasificados de acuerdo con la concentración y fuente de oxígeno son: anaeróbica, donde existe condición anaeróbica a lo largo de toda la profundidad; aerobia, en ellas la fotosíntesis proporciona oxígeno para garantizar condiciones aerobias en toda la columna de agua; facultativa, donde la zona superficial es aeróbica y la zona

subsuperficial puede ser anóxica o anaeróbica; de mezcla parcial – aireada, la aireación superficial produce una zona aerobia que puede alcanzar la totalidad de la profundidad, dependiendo del ingreso de oxígeno y la profundidad de la laguna.

Algunos elementos básicos relativos a las lagunas anaerobias y facultativas son:

Las lagunas anaerobias se diseñan para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica (MO). Estas lagunas no cuentan con zonas aerobias, su profundidad oscila entre 5 y 10 metros (m) y su tiempo de retención hidráulica (TRH) va de 20 a 50 días (d). Como consecuencia de la generación potencial de malos olores, estas lagunas requieren ser cubiertas o aisladas de zonas pobladas.⁷ Algunos autores recomiendan profundidades un poco menores, del orden de 2,5 a 5,0 m Yañez;⁸ o de 3,0 a 4,5 m Kellner y Pires,⁹ para el dimensionamiento de este tipo de lagunas en zonas más próximas a la línea ecuatorial

Las lagunas facultativas son el más común y versátil tipo de laguna de estabilización, su profundidad oscila entre 1,5 y 2,5 m y se diseña para TRH entre 25 y 180 días. El tratamiento se desarrolla por medio de la acción bacteriana en una capa superficial aerobia y una capa inferior que puede ser anóxica o anaerobia, dependiendo de la mezcla inducida por el viento. Los sólidos sedimentables se depositan en el fondo de la laguna, a nivel superficial el oxígeno se proporciona por procesos fotosintéticos y aireación natural.¹⁰ Para la implantación de este tipo de lagunas en zonas tropicales Yañez,¹¹ recomienda TRH de 10 días y Kellner y Pires,¹² recomiendan profundidades entre 1,0 y 1,5 m y TRH del orden de 20 días.

Los objetivos de este trabajo fueron: evaluar la estación de tratamiento de aguas residuales (ETAR) de Santa Fé do Sul (São Paulo) con

relación a su eficiencia en el tratamiento, diagnosticar la acumulación de lodos, y estimar posibles efectos en la salud pública producidos por la calidad del efluente final. La investigación involucró un estudio batimétrico de las lagunas de estabilización anaerobia y facultativa secundaria que la conforman, así como la toma de datos de parámetros como pH, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), DBO filtrada, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos sedimentables (SSed), sólidos totales (ST), fijos (STF) y volátiles (STV), sólidos suspendidos totales (SST), fijos (SSF) y volátiles (SSV), temperatura, coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) de los afluentes y efluentes de cada unidad de tratamiento de la ETAR durante 24 horas consecutivas.

Con base en los resultados obtenidos se diagnosticó el comportamiento de la Estación en términos de la remoción de MO; sólidos; FT; CF, y se formularon las recomendaciones del caso.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta una descripción de la localización del municipio de Santa Fé do Sul y su ETAR, de las metodologías adoptadas, y los materiales utilizados el estudio batimétrico y en el muestreo y determinación de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos investigados.

Santa Fé do Sul

La ciudad Santa Fé do Sul, fundada en 1953 y capital del municipio con el mismo nombre, se sitúa al noroeste del estado de São Paulo, en las coordenadas: 20°12'42,65" de latitud Sur y 50°55'35,36" de Longitud Oeste, a una altitud de 390 m y una distancia de 620 km de la capital del estado, en una región conocida como Grandes Lagos. Según el IBGE,¹³ el municipio posee una población total de 29.235 habitantes; de los cuales 28.084 pertenecen a la zona urbana, en un área territorial total de 208,9 km². La ciudad

posee clima tropical, con lluvias de verano y sequía de invierno e índice pluviométrico en torno de 1360 mm anuales característico de esta región de Brasil.

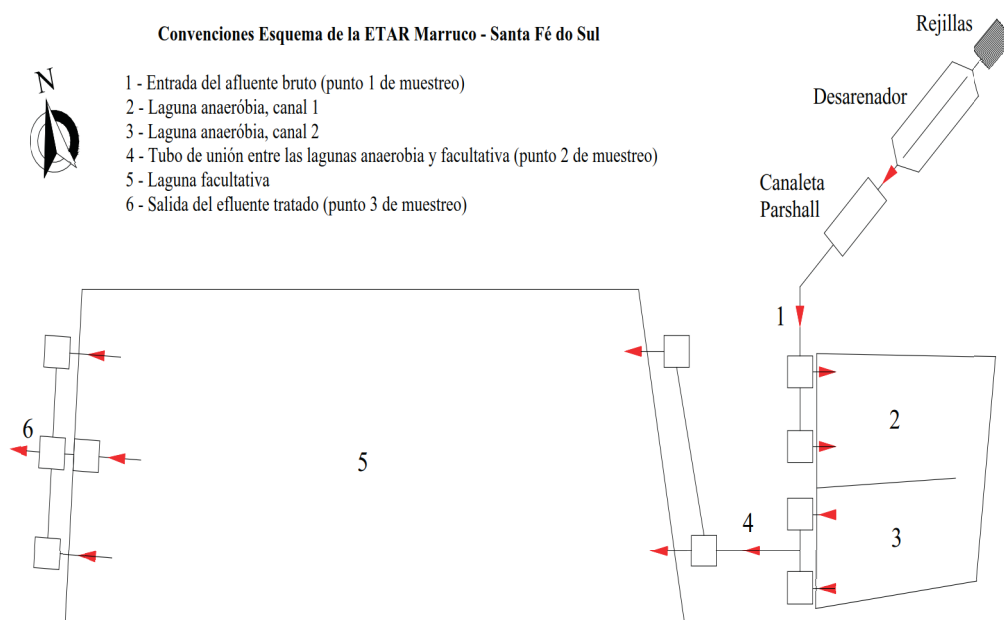
ETAR Marruco – Santa Fé do Sul

Santa Fé do Sul posee dos ETAR, una localizada en el Distrito Industrial: 20°13'04,98" de latitud Sur y 50°56'07,16" de longitud Oeste (objeto de este monitoreo), llamada ETAR Marruco. La Estación 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; posee una canaleta Parshall de 0,23 m de abertura de garganta para medición del caudal; finalmente, consta de dos lagunas de estabilización, la primera de ellas anaerobia con baffle divisor y la segunda de tipo facultativa. La estación trata actualmente 35% de las aguas residuales generadas en la ciudad. El efluente tratado es desaguado en la corriente Marruco o Jacu Queimado.

La segunda Estación llamada ETAR Mula se localiza en la cabecera del riachuelo São José, próximo a la confluencia entre las corrientes de la Mula y Cabeceira Comprida. En la época del desarrollo de esta investigación, la ETAR Mula se encontraba en fase de construcción, por tal motivo no fue monitoreada.

El gráfico 1 presenta un esquema de la vista en planta de la ETAR Marruco cuyas lagunas poseen las siguientes dimensiones: la laguna anaerobia con un baffle divisorio central, de formato trapecoidal con 55,00 m de base menor, 90,00 m de base mayor, 60,00 m de ancho y 3,50 m de profundidad, cubriendo un área superficial de 4.600 m² y un volumen útil de aproximadamente 9.500 m³; la laguna facultativa de formato trapecoidal mide 77,00 m de ancho, 145,00 m de base mayor, 110,00 m de base menor y 2,22 m de profundidad con área útil de aproximadamente 10.350 m² y un volumen aproximado de 22.000 m³.

Gráfico 1. Vista en planta de la ETAR de Santa Fé do Sul con los puntos de muestreo



Los gráficos 2 y 3 presentan fotos satelitales de la ETAR (Fuente Google Earth, 2011), donde se aprecian en primera instancia la disposición de

las lagunas y los detalles del entorno de la misma así como la cercanía de la estación al cuerpo de agua receptor.

Gráfico 2. Fotografía satelital de la ETAR de Santa



Gráfico 3. Fotografía satelital de Santa Fé do Sul, la ETAR, y riachuelo receptor



Caracterización del afluente bruto y de los efluentes de las unidades de tratamiento

Se monitoreó durante 24 horas consecutivas el afluente bruto de la Estación y los efluentes de cada una de las lagunas, ello con el fin de verificar la variación de parámetros importantes en el funcionamiento de la ETAR. Para tal propósito se midió: caudal, OD, pH, temperatura, DQO, DBO, CT, CF, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, y SSed. Se tomaron muestras del agua a cada hora, se almacenaron en cajas de icopor, se refrigeraron y transportaron al laboratorio dentro del plazo de tolerancia estipulado para muestras sin preservación química.

Los muestreos se realizaron en los puntos 1, 4 y 6, indicados en el gráfico 1. Se utilizaron recipientes libres de impurezas e interferentes para la muestra, y se almacenaron en frascos de polipropileno y de polietileno transparente para su transporte y almacenamiento.

Para la medición de los parámetros anteriormente citados se adoptaron las metodologías de análisis preconizadas por Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater¹⁴ en las modalidades: analítica, colorimétrica y espectrofotométrica. Se midió el caudal en la canaleta Parshall; con instrumentos portátiles se midió el OD y el pH; los otros parámetros se midieron en el Laboratorio de Saneamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira. Los datos registrados se almacenaron en planillas electrónicas para su compilación, confección de tablas y gráficos y para la posterior interpretación de los resultados obtenidos.

Levantamiento Batimétrico

Este se ejecutó con el propósito de verificar los perfiles de acumulación de sólidos sedimentados y estimar la cantidad de lodo acumulado en

el fondo de las lagunas así como el volumen útil disponible en cada unidad. Para ello se determinaron en la laguna anaerobia 9 perfiles longitudinales espaciados a cada 7,5 metros y 16 perfiles transversales a cada 5 metros; en la laguna facultativa se tomaron datos para 9 perfiles longitudinales espaciados a cada 10 m con excepción de los dos últimos separados por 5m de distancia y 14 perfiles transversales espaciados a cada 10 metros, los dos primeros en el sentido del afluente espaciados a cada 5 m. En total se realizaron mediciones batimétricas para 111 puntos en la laguna anaerobia y 110 puntos en la laguna facultativa. El espaciamiento de los perfiles longitudinales y transversales se determinó con el propósito de identificar la configuración de los lodos acumulados (Sólidos Sedimentables) en las lagunas.

La obtención de los datos batimétricos se realizó con equipos especiales de medición de profundidad y consistencia del lodo acumulado y se mantuvo el alineamiento de los perfiles por medio de equipos ópticos y con una embarcación auxiliar. Los datos recopilados se almacenaron en planillas electrónicas para utilización en la elaboración de los perfiles de deposición y cálculo de volúmenes acumulados con programas de diseño asistido por computador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Batimetría de la ETAR de Santa Fé do Sul

El levantamiento batimétrico permitió conocer las condiciones de funcionamiento de la Estación antes de efectuar el monitoreo de los parámetros de calidad del agua, se determinaron los puntos de acumulación de sedimentos y se calculó el TRH teórico con las configuraciones de acumulación de lodo encontradas.

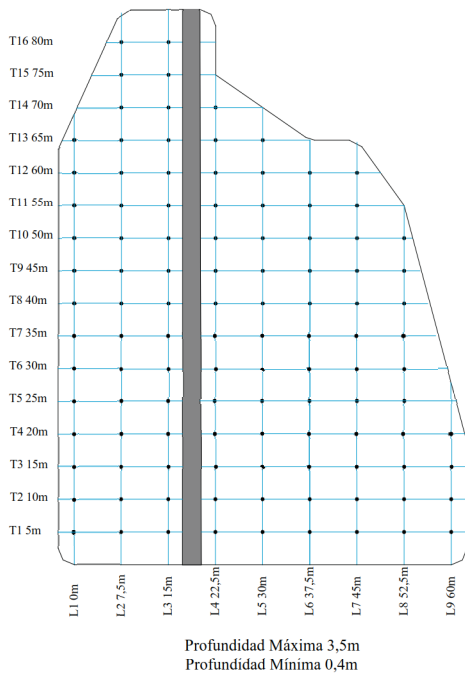
La ETAR Marruco se compone de una laguna anaerobia con baffle y una laguna facultativa, operadas en serie, con área aproximada de

15.000 m², de los cuales aproximadamente 4650 m² son de la laguna anaerobia y 10.350 m² de la laguna facultativa. El volumen estimado fue de 9.500 m³ en la laguna anaerobia y de 22.000 m³ en la laguna facultativa. La laguna anaerobia registró un significativo volumen ocupado por lodos, principalmente en su 1^a célula, lo que provoca una reducción drástica de la profundidad y de su volumen útil; por su parte, la 2^a célula o canal presentó menor acumulación de lodos.

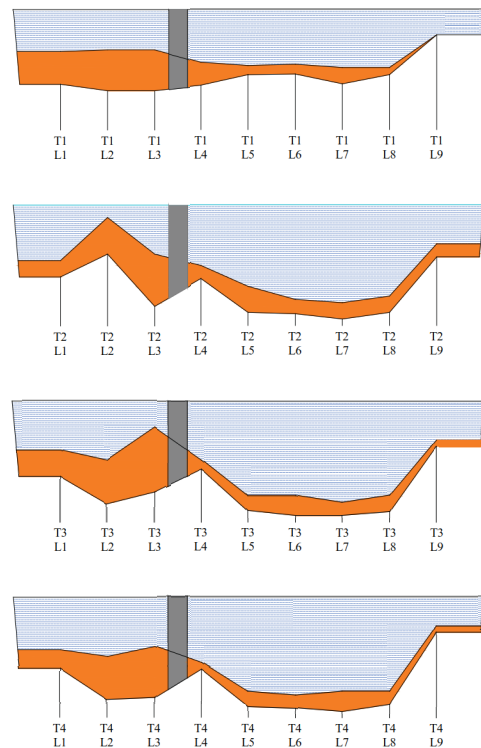
El volumen de lodo acumulado en la laguna anaerobia se estimó en torno de 3.850 m³ que representan una altura media de 0,713 m y una masa de lodo húmedo de 3'927.204 kg, localizado principalmente en la 1^a célula, conforme lo mostrado en el gráfico 4, que ilustra una vista en planta de la disposición de los ejes longitudinales y transversales, así como ejemplos de los perfiles obtenidos que permitieron visualizar la acumulación de lodo en cada célula de la ETAR.

Gráfico 4. Vista en planta y perfiles longitudinales y transversales de la laguna anaerobia

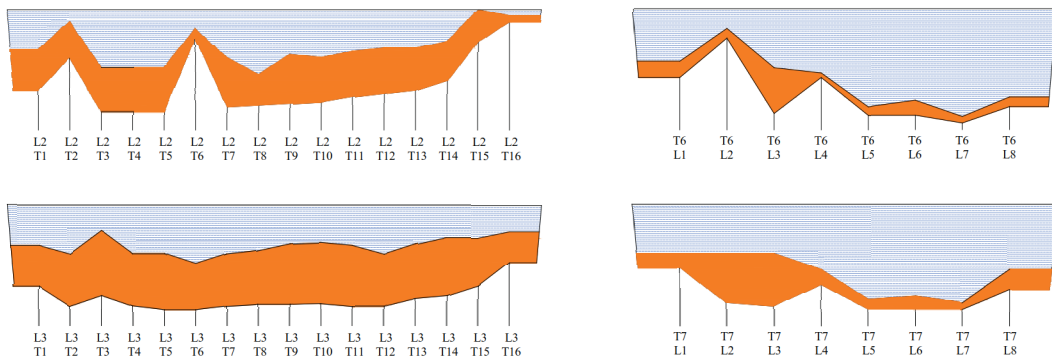
Disposición de ejes para el levantamiento batimétrico laguna anaerobia, Vista en Planta



Ejemplos de perfiles transversales en la laguna anaerobia



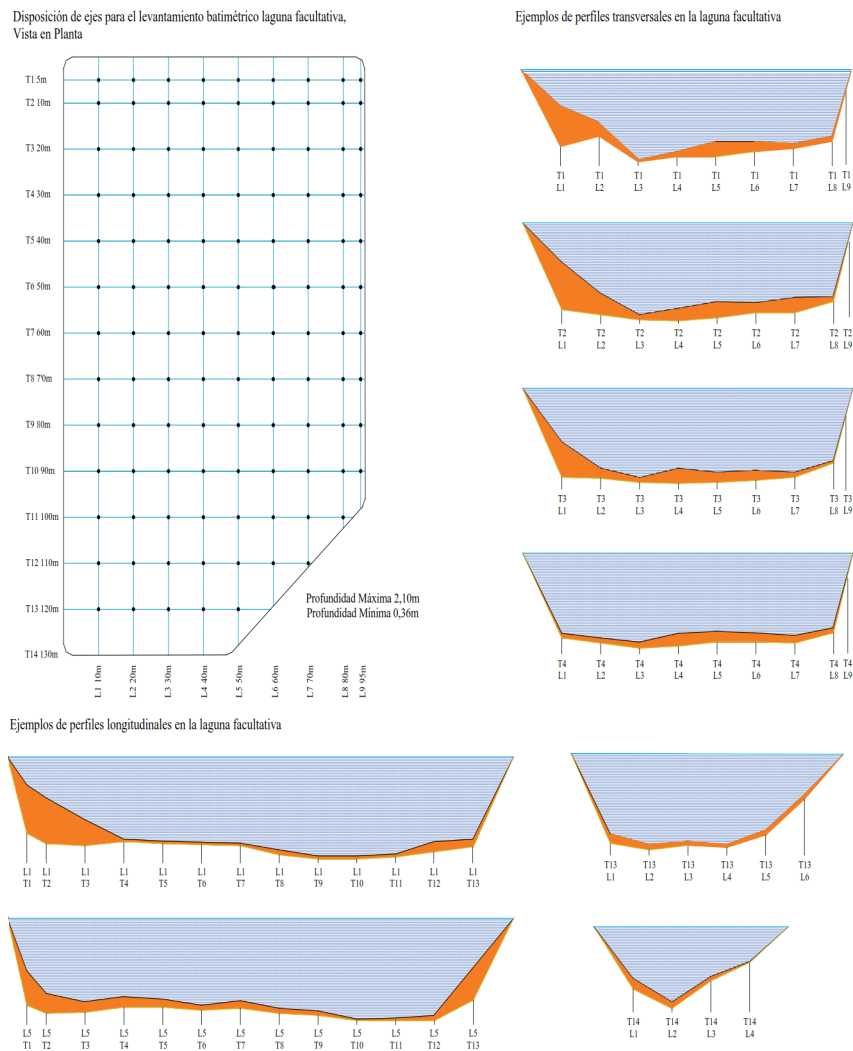
Ejemplos de perfiles longitudinales en la laguna anaerobia



La concentración de los lodos acumulados se dio principalmente en el canal uno de la laguna anaerobia como lo evidencian los perfiles longitudinales L2 y L3, así como la parte izquierda de los perfiles transversales T1 a T4,

T6 y T7 de dicha laguna, ilustrados en la parte derecha del gráfico 4. La acumulación de los lodos puede generar caminos preferenciales del flujo y cortos circuitos que afectan de manera drástica la eficiencia de la ETAR.

Gráfico 5. Vista en planta y perfiles longitudinales y transversales de la laguna facultativa



La laguna facultativa presentó un menor porcentaje de acumulación de lodos que la evidenciada por la laguna anaerobia; sin embargo, su concentración se hizo más visible en las zonas cercanas a los puntos de ingreso

del afluente. El volumen total estimado de la laguna facultativa fue de 22.000 m³ para una profundidad media de 2,2 m, el volumen de lodo acumulado fue de 1.453,4 m³ y una altura media de lodo del orden de 0,13 m, equivalente a

cerca de 1'482.468 kg de lodo húmedo, según las densidades de lodo reportadas por Andreoli, von Sperling y Fernández.¹⁵

A partir de los datos del levantamiento batimétrico, el volumen útil de la laguna anaerobia fue de aproximadamente 9.500 m³, y el de la laguna facultativa, de 22.000 m³, lo que representa un volumen total de la ETAR de 31.500 m³. Con base en estos datos, se estima que el TRH total de la ETAR fue de 11,5 d; 3,5 d en la laguna anaerobia y 8,0 d en la facultativa. Según el diseño del proyecto, el TRH estimado estaría de acuerdo con el recomendado por von Sperling,¹⁶ de 3,0 a 6,0 días en la laguna anaerobia y de 7,5 a 22,5 d en la laguna facultativa con remoción de 50% de la carga de DBO en la laguna anaerobia, para un TRH para el sistema combinado de 10,5 a 28,5 d.

Los resultados obtenidos son útiles para planificar la remoción del lodo de los puntos más críticos de acumulación dentro de las lagunas. Los lodos acumulados en la laguna anaerobia indican que la limpieza periódica de las dos cámaras del desarenador no se hizo según lo determinado en el manual de operación de la

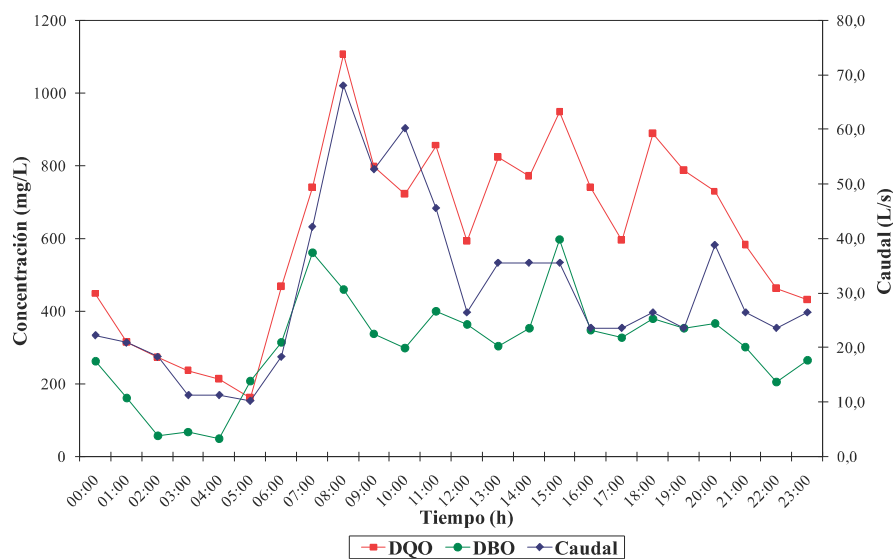
ETAR, que recomienda limpieza diaria de una de las cámaras para operarse alternadamente, esto para facilitar la limpieza y garantizar la remoción inicial de los sólidos más densos, contribuyendo a la conservación por más tiempo del volumen efectivo de tratamiento de las lagunas.

La adopción de las medidas de operación alternada de las dos cámaras del desarenador a la entrada de la ETAR y su limpieza diaria pueden reducir los riesgos de formación de zonas muertas y caminos de flujo preferencial y garantizar por periodos mayores el volumen efectivo de las lagunas tanto anaerobia como facultativa.

Caracterización del afluente y efluente de la ETAR Marruco

Con base en los 25 muestreos realizados en los tres puntos de colecta se caracterizó el agua residual del afluente bruto así como los efluentes de las lagunas anaerobia y facultativa a partir de los 15 parámetros de control citados. El Gráfico 6 muestra la variación horaria de la DBO y DQO afluentes a la Estación, así como la variación del caudal que ingresó a lo largo del período de estudio.

Gráfico 6. Variación del caudal, DQO y DBO afluentes a la ETAR a lo largo de 24h



El comportamiento del caudal afluente a la ETAR se ajustó a la variación diaria reportada en la literatura, con un valor medio ponderado estimado en 30,36 litros/segundo (L/s); o sea, un caudal diario de aproximadamente 2.7334 m³/d. El caudal a lo largo del periodo monitoreado tuvo una variación entre 10,2 L/s (mínimo) y 68,12 L/s (máximo).

Al considerar la acumulación de lodo de 3.850 m³ en la laguna anaerobia, el volumen útil pasó a ser de 5.650 m³, así el TRH se redujo a aproximadamente 2,0 d. La acumulación de 1450 m³ de lodos en la laguna facultativa (Gráfico 5), implica que el TRH real correspondería a 7,5 d. Sumando los TRH estimados de las lagunas, el TRH total de la Estación Marruco fue de 9,5 d. Dicho valor estuvo por debajo del recomendado para la ETAR, pues al reducirse el tiempo de permanencia del líquido a tratar en la Estación se pueden generar problemas, principalmente en la eficiencia de remoción de carga de DBO y de otros parámetros de control.

La concentración de la DBO afluente a la estación varió entre 48 y 547 miligramos/litro (mg/L) con promedio de 306 mg/L, mientras que la concentración de la DQO varió entre 161 mg/L y 1107 mg/L con un promedio de 619 mg/L. A partir de los datos registrados se verificó la relación existente entre las concentraciones de la DQO y la DBO brutas del orden de 2 según lo afirmado por autores como Metcalf & Eddy₁₇ y Uehara y Vidal₁₈.

Con base en las concentraciones de DBO y DQO y los caudales medidos en el afluente a la ETAR se estimaron los valores de la carga orgánica aplicada en la Estación que fueron del orden de 939 kilogramos de DBO/día (kg DBO/d), equivalente a una concentración media de 344 mg/L; y de 1940 kilogramos de DQO/día (kg DQO/d), para una concentración media de 710 mg/L

Para el análisis preliminar de la carga volumétrica que ingresó a la Estación se consideró el volumen total de la laguna anaerobia y los valores obtenidos de DBO y DQO, con ellos la carga orgánica -sin la acumulación de lodo- se estimó del orden de 0,10 kg DBO/m³/d, y de 0,204kg DQO/m³/d. Al considerar la acumulación de lodo, la tasa de carga volumétrica estimada fue de 0,166 kg/DBO/m³/d y 0,343 kg DQO/m³/d. Tales valores están por encima del límite recomendado por Uehara y Vidal₁₉ de 0,04 a 0,08 kg DBO/m³/d, pero dentro de lo citado por von Sperling₂₀ de 0,01 a 0,35 kg DBO/m³/d. Pese a la buena eficiencia de remoción de carga orgánica, que será comentada más adelante, la laguna anaerobia puede estar operando cerca del límite de carga admisible y de acumulación de lodo. Para mayor acumulación de lodos es previsible que la sobrecarga se refleje en desequilibrios en el proceso de tratamiento y reducción de la eficiencia.

La laguna facultativa recibió el efluente de la laguna anaerobia con concentraciones medias de 80 mg/L de DBO y 225 mg/L de DQO, con variación de la DBO entre 42 y 111 mg/L, y para DQO entre 150 y 321 mg/L. Con los valores medios de DBO afluente y efluente de la laguna anaerobia se determinó que la eficiencia media de remoción de DBO en tal unidad fue del 73,86%.

Para calcular la carga superficial que ingresó a la laguna facultativa secundaria se adoptó el caudal medio como constante por su atenuación de las variaciones de caudales afluentes desde la laguna anaerobia. La carga diaria calculada fue de 219 kilogramos de DBO/hectárea/día (kg DBO/ha/d) para un área superficial de 10.350 m² (1,035 ha); valor cercano a los 260 kg DBO/ha/d recomendado por Kawai₂₁ para lagunas de estabilización facultativas, e inferior a las cargas recomendadas por von Sperling₂₂ en zonas con invierno caliente y alta insolación, cuyo valor podría ser entre 240 y 300 kg DBO/ha/d.

En el efluente final de la ETAR, la concentración de la DBO varió de 5 a 66 mg/L, con promedio de 38 mg/L, lo que representa una eficiencia de remoción media total de la DBO en torno de 89%, encontrándose así por encima del mínimo porcentaje recomendado por el Decreto 8464 de 1976₂₃ y con una concentración media inferior a la máxima recomendada de 60 mg/L. La DQO del efluente final varió entre 120 y 282 mg/L con promedio de 183 mg/L. Pese a los buenos resultados reportados y para mantener la eficiencia del sistema e inclusive mejorar el desempeño de la Estación se recomienda remover los sólidos sedimentados, principalmente en el primer canal de la laguna anaerobia, aumentando así el TRH, la mezcla y la distribución apropiada del flujo.

La tabla 1 presenta un resumen de los promedios calculados en los parámetros analizados tanto para el afluente bruto como para los efluentes de las lagunas anaerobia y facultativa.

Tabla 1. Resumen de valores medios de las características del afluente bruto y efluentes de las lagunas de la ETAR Marruco

Parámetros	Afluente bruto	Efluente laguna anaerobia	Efluente laguna facultativa
OD (mg/L)	5,96	6,1	7,4
pH	6,86	6,8	7,3
Temperatura (°C)	29,9	28,9	29,1
DQO (mg/L)	618,8	225,1	183,5
DBO (mg/L)	305,7	80,2	38,4
Coliformes totales (NMP/100mL)	3,24x10 ⁷	7,78x10 ⁶	1,25x10 ⁷
Coliformes fecales (NMP/100mL)	4,05x10 ⁶	1,54x10 ⁵	4,88x10 ⁵
Sólidos totales (mg/L)	597	526	488
Sólidos totales fijos (mg/L)	174	199	183

Sólidos totales volátiles (mg/L)	422	326	305
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	273	193	196
Sólidos suspendidos fijos (mg/L)	77	60	61
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	196	133	135
Sólidos sedimentables (mL/L)	No se midió	No se midió	0,06

En el afluente bruto las concentraciones de OD variaron entre 1,0 y 12,0 mg/L, los altos valores registrados fueron ocasionados por la configuración de lectura instantánea en la sonda de medición. Regularmente la concentración de OD para aguas residuales urbanas brutas esperada está entre 0,0 y 1,0 mg/L.

La concentración de OD del efluente de la laguna anaerobia varió de 1,8 a 9,8 mg/L; al igual que en el caso del afluente bruto, los altos valores se atribuyen a la configuración de la lectura instantánea, ya que se esperaban valores similares a los de este afluente. El OD medido a la salida de la laguna facultativa varió de 3,1 a 11,6 mg/L, con un promedio de 7,4 mg/L, y aunque tales valores concuerdan con la producción de OD en una laguna facultativa por las algas al realizar la fotosíntesis, también se justifican en parte a la lectura instantánea en el equipo.

El pH del afluente registró valores que variaron de 6,3 a 7,2 con promedio de 6,8; en el efluente de la laguna anaerobia, varió de 6,6 a 7,4 con promedio de 6,8; y en el efluente final varió de 6,7 a 7,9, con promedio de 6,8. En general el pH estuvo cercano a la neutralidad, con ligera tendencia a la acidez, permaneciendo dentro de los valores reportados por la literatura.

La temperatura medida en el afluente de la ETAR osciló entre 28,1 y 32,6 °C, con promedio de 30,0 °C; en el efluente de la laguna anaerobia, varió de 25,2 a 34,0 °C y promedio de 28,9 °C; y

en el efluente final, varió de 25,9 a 31,7 °C, con promedio de 29,1 °C. Los altos valores se deben a la alta tasa de insolación en el verano, una característica de la región donde está localizada la ETAR estudiada.

En los exámenes bacteriológicos realizados al afluente y efluentes, se determinó que la variación del número más probable (NMP) de coliformes totales/100mL fue de $2,50 \times 10^6$ a $1,03 \times 10^8$ en el afluente, de $2,00 \times 10^5$ a $4,76 \times 10^7$ en el efluente de la laguna anaerobia y de $8,00 \times 10^5$ a $5,77 \times 10^7$ en el efluente final; y la variación del NMP de coliformes fecales/100mL fue de $5,00 \times 10^3$ a $2,14 \times 10^7$ en el afluente, de $3,90 \times 10^3$ a $1,29 \times 10^6$ en el efluente de la laguna anaerobia y de $6,60 \times 10^3$ a $3,11 \times 10^6$ en el efluente final de la ETAR. La cantidad de coliformes fecales del efluente final cuyo valor promedio fue de $1,17 \times 10^5$ /100mL son muy altos para la disposición final en la corriente receptora, y aunque el valor mínimo fue aproximadamente de 6.600 CF/100mL, la legislación ambiental brasilera exige que siempre sea inferior a 1000 CF/100mL.

Teniendo en cuenta que, tal como se observa en el gráfico 3, la corriente Jacu Queimado se convierte en un tributario del Río Paraná, las cantidades de coliformes fecales en el efluente final representan un posible riesgo al afectar de manera negativa la calidad del agua del cuerpo receptor final, ello cobra mayor importancia al considerar que en lugares cercanos a la confluencia de la corriente con el Río Paraná hay zonas traseras de algunas fincas que utilizan el río como alternativa de transporte, pesca e incluso para natación. Por los motivos anteriormente citados y con énfasis particular de la remoción de coliformes fecales, la estación requiere de un pos-tratamiento para minimizar el ingreso de este tipo de microorganismos en la corriente Marruco.

En el afluente bruto los ST oscilaron entre 116 y 1.476 mg/L (promedio de 597 mg/L), con 32 a 476 mg/L de STF y 70 a 1.282 mg/L de STV; en el efluente final las concentraciones variaron de 164 a 1.346 mg/L de ST (promedio de 488 mg/L), con 42 a 690 mg/L de STF y de 38 a 644 mg/L de STV. Por los resultados presentados, se afirma que existe remoción de ST en la ETAR, independiente de la estabilización de la MO que ingresa a las lagunas, pues la concentración de sólidos en el efluente fue menor que en el afluente. Es previsible que al efectuar mantenimiento de la laguna anaerobia al retirar los sólidos sedimentados se logre mejorar la eficiencia de esa unidad de tratamiento en cuanto a su remoción y por ende mejore respecto a la remoción de MO.

Los SST en el afluente variaron de 48 a 724 mg/L (promedio de 273 mg/L), divididos entre SSF de 16 a 272 mg/L, y SSV de 32 a 616 mg/L. En el efluente final la variación fue de 40 a 340 mg/L (promedio de 196 mg/L), con 20 a 120 mg/L de SSF y 20 a 280 mg/L de SSV. Los resultados muestran que la Estación removi6 este componente de los sólidos afluentes en un valor medio cercano al 28%. En el efluente de lagunas facultativas es factible disminuir la salida de SV con dispositivos de salida sumergidos que retengan parte de las algas propias de tales sistemas.

Los sólidos sedimentables son un parámetro de control normativo del desempeño de las ETAR, cuyo valor máximo admisible en la legislación brasilera es de 1,0 mL/L en el ensayo en cono de Imhoff.^{24,25} Pese a las elevadas concentraciones de sólidos del efluente, los sólidos sedimentables reportaron un valor medio de 0,50 mL/L, lo que indica que por este concepto hubo cumplimiento de la normativa.

CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de lagunas de estabilización anaerobias seguidas de lagunas facultativas es una opción técnica y económicamente viable para países en vías de desarrollo. Tales sistemas contribuyen a la reducción de los impactos ambientales producidos por la disposición de aguas negras en los cuerpos de agua receptores y por ende favorecen la preservación de la salud pública. La ETAR de Santa Fé do Sul evidenció problemas operacionales principalmente por falta de mantenimiento adecuado del sistema de tratamiento primario y ausencia de unidades complementarias. Particularmente se puede concluir que:

El estudio batimétrico indicó que hay una acumulación considerable de lodos principalmente en el primer canal de la laguna anaerobia, con un volumen estimado de 3.850m³, que representa cerca del 40,5% del volumen, lo que reduce su capacidad de tratamiento al trabajar con un TRH menor que el recomendado por la literatura.

La acumulación de los lodos se pudo producir por falta de rigurosidad en la frecuencia de las rutinas de operación del desarenador localizado a la entrada de la ETAR, pues según el manual de operación la limpieza de las cámaras del desarenador debe realizarse diariamente.

El no registro de parámetros de control diarios tales como caudal, pH, temperatura y OD, dificultan el acompañamiento de la evolución del tratamiento de la ETAR.

El efluente estudiado en el monitoreo logró superar el porcentaje mínimo de remoción de la DBO exigido por la legislación estatal, ya que con un 89% superó el 80% exigido por el Decreto 8464 de 1976.

La cantidad del NMP de coliformes fecales medidos en el efluente final de la Estación supera los valores permitidos por la legislación ambiental brasilera para efectos de su disposición final en cuerpos de agua receptores, pues el mínimo valor registrado en las 24 horas fue de 3900 CF/100mL y la norma establece que tal valor deberá ser menor de 1000, lo que evidencia la necesidad de un pos tratamiento.

El elevado número de CF del efluente de la ETAR incide negativamente en la calidad del agua del cuerpo receptor, ya que la corriente Marruco es uno de los tributarios del río Paraná y en las proximidades de su desembocadura hay fincas que utilizan el río como medio de transporte y donde se practica esporádicamente la pesca y la natación, lo que puede acarrear problemas de salud pública.

RECOMENDACIONES

Ya que la laguna anaerobia operó en el límite de su carga volumétrica, mayores acumulaciones de lodo pueden provocar un desequilibrio en el proceso de tratamiento; por tal razón, la laguna debe ser sometida a un dragado de los lodos acumulados en la laguna anaerobia, principalmente de los localizados en el canal o compartimento inicial, ello favorecerá el desempeño de la laguna en términos de remoción de sólidos y materia orgánica.

Se recomienda adoptar de manera rigurosa las rutinas de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento en el sentido de efectuar la limpieza diaria de las cámaras del desarenador, igualmente es recomendable adoptar la medición y registro de parámetros de control diarios tales como caudal, OD, temperatura y pH.

Para reducir la cantidad de coliformes fecales presentes en el efluente final se recomienda adoptar un sistema de pos tratamiento por medio de una laguna de maduración, cuya eficiencia puede estar respaldada por la alta insolación de la zona.

Incorporar una unidad para secado de los lodos primarios que diariamente se deben remover como parte de las labores de mantenimiento de la Estación para su disposición adecuada ya que en ausencia de tal unidad se propicia la proliferación de moscas, roedores y otras especies que pueden provocar problemas en la salud pública. Igualmente es importante realizar labores de mantenimiento periódico en aras de conservar condiciones de limpieza e higienización de la ETAR y su entorno.

REFERENCIAS

1. Mansur, A. M. Sistemas Econômicos de Tratamento de Esgotos Sanitários. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Rio de Janeiro, 2000: 192.
2. Kellner, E., Pires, E. C. Lagoas de Estabilização-Projeto e Operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998: 13-17, 28-36, 48-59.
3. Peña V. M., Mara, D. Waste Stabilisation Ponds. IRC International Water and Sanitation Centre. The Netherlands. 2004:37.
4. Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 1096 de noviembre 17 de 2000. Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, República de Colombia, 2000.
5. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e Manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série Manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989: 91.
6. Crites, R., Tchobanoglous, G. Small and decentralized wastewater management systems. McGraw Hill, Boston, 1998: 1084.
7. Ibíd.
8. Yáñez, F. C. Lagunas de Estabilización. Teoría, diseño y mantenimiento. ETAPA, Cuenca, Ecuador, 1993: 421.
9. Kellner, E., Pires, E. C. Lagoas de Estabilização-Projeto e Operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998: 13-17, 28-36, 48-59.
10. Crites, R., Tchobanoglous, G. Small and decentralized wastewater management systems. McGraw Hill, Boston, 1998: 1084.
11. Yáñez, F. C. Lagunas de Estabilización. Teoría, diseño y mantenimiento. ETAPA, Cuenca, Ecuador, 1993: 421.
12. Kellner, E., Pires, E. C. Lagoas de Estabilização-Projeto e Operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998: 13-17, 28-36, 48-59.
13. 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.
14. APHA, AWWA & WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. Public Health Association Inc. New York, 1998.
15. 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.
16. von Sperling, M. Lagoas de Estabilização - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009: 196.
17. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, Metcalf & Eddy Inc. 3ª ed., 1991: 1334.
18. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e Manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série Manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989: 91.
19. Ibíd.
20. von Sperling, M. Lagoas de Estabilização - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009: 196.
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.

22. von Sperling, M. Lagoas de Estabilização - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009: 196.
23. 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. Disponível em internet URL: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>
24. *Ibíd.*
25. Brasil. Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em internet URL: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>.