

## Artículo científico

## Dinámica del oxígeno disuelto en una laguna facultativa

**Roberto Huinil Mejía**Ingeniero civil, M.Sc. en ingeniería sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala  
Universidad de San Carlos de GuatemalaDirección para recibir correspondencia: [robhuime@hotmail.com](mailto:robhuime@hotmail.com)

Recibido 10.06.2019 Aceptado 03.09.2019

### Resumen

La dinámica y distribución del oxígeno disuelto a lo largo de la longitud y profundidad de una laguna de estabilización facultativa se presentan en este artículo. Se realizaron mediciones de oxígeno disuelto en campo con frecuencia de dos horas en la entrada, centro y salida de la laguna en tres profundidades (superficie, centro y fondo), además se realizaron mediciones en el centro de la laguna a intervalos de 0.10 m para obtener perfiles de oxígeno disuelto en distintos horarios del día. Los resultados obtenidos en las correlaciones de Pearson de datos de entrada-centro, salida-centro y entrada-salida, son representativos para datos de superficie con coeficientes de correlación mayores a 0.90, mas no para profundidades a 0.75 y 1.50m en los cuales se obtuvo un coeficiente de correlación máximo de 0.30. La concentración de oxígeno disuelto en la superficie a lo largo del día tiene a un comportamiento senoidal, donde a las 6:00 horas la concentración de oxígeno disuelto es casi cero, después se incrementa para llegar a tener valores cercanos a 20 mg/l a las 14:00 horas, luego decrecer para tomar valores alrededor de 4 mg/l a las 20:00 horas. Los perfiles de oxígeno disuelto muestran una clara estratificación y poca mezcla, concluyendo que la actividad fotosintética se desarrolla en los primeros 0.30 m de profundidad de la laguna, en la zona fótica.

**Palabras clave:** correlación, estratificación, mezcla, radiación solar, temperatura, perfiles.

### Abstract

The dynamics and distribution of dissolved oxygen along the length and depth of a facultative waste stabilization pond is presented in this article. Measurements of dissolved oxygen were performed on field with a frequency of two hours at the inlet, center and outlet of the pond three depths (surface, center and bottom). In addition, measurements were made in the center of the pond by dividing it into 0.10 m intervals to obtain profiles of dissolved oxygen at different times of the day. The results obtained from Pearson correlations on the inlet-center, outlet-center and inlet-outlet were representative for surface data with correlation coefficients greater than 0.90, unlike for depths at 0.75 m and 1.50 m where a maximum correlation coefficient of 0.30 was obtained. The concentration of dissolved oxygen on the surface through the time has a sinusoidal behavior, were at 6:00 hours the concentration of dissolved oxygen is almost null, and then increases up to reach values around 20 mg/l at 14:00 hours and after this, it starts to decrease to values around 4 mg/l at 20:00 hours. The dissolved oxygen profiles showed a clear stratification and slight mixing, concluding that the photosynthetic activity is developed in the first 0.30 m of pond's depth, in the photic zone.

**Key Words:** correlation, stratification, mixing, solar radiation, temperature, profiles.

### Introducción

En este artículo se pretende dilucidar el comportamiento del oxígeno disuelto en una laguna facultativa a escala piloto, en un periodo de dos meses.

Se realizaron mediciones *in situ* de oxígeno disuelto mediante un aparato *YSI PRO20*, a lo largo de la laguna piloto (entrada, centro y salida), a tres niveles:

superficie, intermedio y fondo. Además de obtener datos para la construcción de perfiles de oxígeno disuelto.

Según los resultados, las correlaciones de datos de oxígeno disuelto en la superficie son significativos y representativos desde cualquier punto, mas no para datos a media profundidad y fondo de la laguna. Se determinó la dinámica del oxígeno disuelto en la superficie donde la concentración es mínima al

amanecer. Desde el amanecer hasta pasado mediodía el oxígeno disuelto va en aumento para luego decrecer llegando a valores mínimos durante el comienzo de la noche. Los perfiles de oxígeno disuelto durante el día muestran estratificación la mayor parte del tiempo, lo que permite establecer poca mezcla a lo largo de la profundidad de la laguna facultativa.

**Antecedentes**

El empleo de lagunas de estabilización como un recurso técnico o como un medio aceptado para estabilizar aguas residuales, se ha desarrollado desde la segunda mitad del siglo XX (León Suematsu, G. 1995)

Se han realizado investigaciones sobre el uso de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo. Los resultados muestran claramente que las lagunas pueden tratar aguas residuales a un alto nivel. Tanto en la remoción de patógenos como en la de compuestos orgánicos, requiriendo mínimos recursos para su diseño, construcción, operación, y mantenimiento (Stewart M. Oakley, 2005).

La universidad de Dar es Salaam, en Tanzania, ha estudiado por más de 3 años las variaciones diurnas de pH, oxígeno disuelto, temperatura del aire y del agua e intensidad de la luz solar, en lagunas de estabilización para tratar sus aguas residuales, concluyéndose que éstas se dan debido a la variación diaria y horaria de la intensidad de la luz, ya que de ella depende la abundancia y actividad de grupos específicos de microorganismos (Kayombo *et al.*, 2002).

Importante resaltar, CONAGUA (2018) encontró lecturas de oxígeno disuelto más bajas justo antes de la salida del sol, debido al consumo de oxígeno disuelto durante la noche por parte de las bacterias y algas. Ya con la presencia de luz del día, los niveles de oxígeno disuelto más altos pueden observarse por la tarde (≈14:00 horas).

Montoya y Gattorno (2018), estudiaron el comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa, en la planta experimental “Arturo Pazos” de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Metodología**

**Descripción del sitio de estudio**

El área de estudio, figura 1, está ubicada en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), colonia militar Aurora II, en la zona 13, ciudad de Guatemala. Limitada al Norte con el Observatorio Nacional, al Este con el Aeropuerto Internacional “La Aurora” y al Sur y Oeste con barrancos. Sus coordenadas son 14° 35” de latitud Norte y 90° 32” de longitud Oeste. Su altitud varía entre 1455 m.s.n.m. y 1502 m.s.n.m. en la parte más alta. La planta de tratamiento recibe el agua residual de tipo doméstico de la colonia Aurora II, donde se trata a través de diferentes unidades experimentales.

**Figura 1. Ubicación del área de estudio**



**Descripción de la unidad experimental**

Las mediciones de oxígeno disuelto se realizaron en la laguna facultativa experimental diseñada y construida

por Montoya y Gattorno (2018) para el estudio "Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa" para un caudal de diseño de 0.035 L/s (3.02 m<sup>3</sup>/día) y con un tiempo de retención hidráulico nominal mayor o igual a 11.80 días.

A la unidad se le suministra agua residual doméstica que recibe del pretratamiento por medio de un sistema de rejillas. El método de diseño utilizado fue el de carga superficial por medio de radiación solar. Se tomó una radiación de 1.70E+08 kJ/ha-día, siendo el valor mínimo mensual correspondiente al mes de septiembre para la ciudad de Guatemala.

También se consideraron otros parámetros para el diseño: DBO<sub>5</sub> promedio 254 mg/l y sólidos suspendidos promedio de 283 mg/l, dichos datos se obtuvieron a través de investigaciones previas realizadas en la planta piloto.

### Medición de oxígeno disuelto y radiación solar

La medición de datos se realizó en el periodo del 4 de septiembre al 30 de octubre del año 2018. Para la medición del oxígeno disuelto se utilizó el método electrométrico que utiliza electrodo de membrana, método 2810B del APHA. Las mediciones de oxígeno disuelto en la laguna facultativa experimental fueron realizadas *in situ* mediante un aparato YSI PRO20.

La medición de la radiación solar, se realizó con una frecuencia de 30 minutos a través de la estación automática meteorológica Davis Instruments Vantage pro2, instalada en la planta piloto Aurora II, la cual se instaló a 90 metros de la laguna facultativa experimental.

### Puntos de medición de datos de oxígeno disuelto

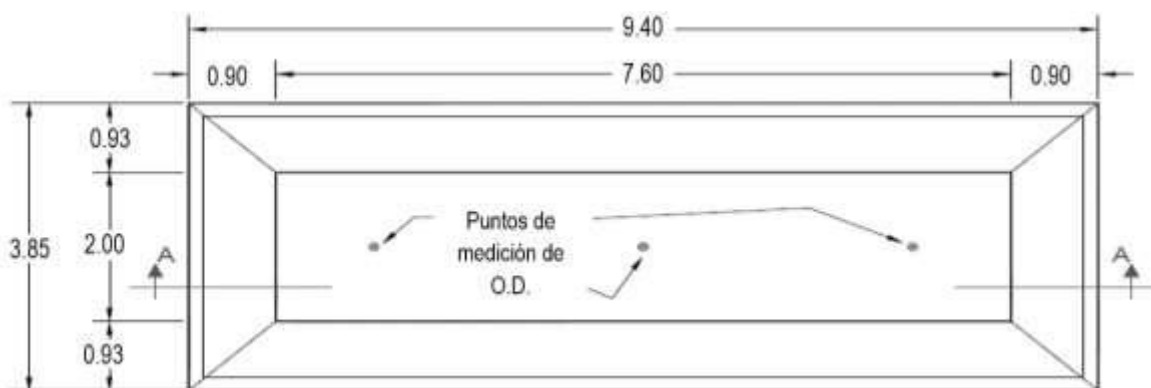
Para la frecuencia de dos horas de medición se consideraron nueve puntos de medición distribuidos estratégicamente para ser representativos a lo largo de la laguna, figura 2. También se tomaron mediciones en el centro de la laguna a cada 0.10 m en tres horarios distintos: 6:00, 12:00 y 18:00 horas.

### Pre-muestreo

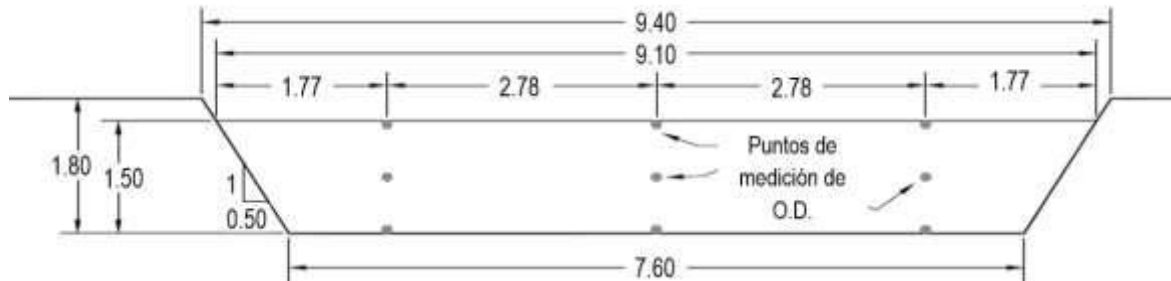
Los datos de oxígeno disuelto carecen de análisis estadístico que permita establecer una desviación estándar para dimensionar el tamaño de la muestra, por lo cual se desarrolló un pre-muestreo que permitiera determinar este valor y con base a ello, establecer el tamaño de la muestra del estudio.

El pre-muestreo realizado consistió en tomar datos de oxígeno disuelto *in situ* a las 10:00 horas durante dos días bajo las mismas condiciones.

Figura 2. Puntos de medición con frecuencia de dos horas



VISTA EN PLANTA



SECCION A-A

**Número de muestra**

Para la determinación del número de muestras se utilizó la ecuación de estimación de poblaciones finitas normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, de acuerdo con *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 2002.

La ecuación que se utilizó fue la siguiente:

$$n = \left[ \frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{e} \right]^2$$

Donde:

n: es el número sugerido de muestras

σ: es la desviación estándar

Zα/2: es el nivel de confianza, prueba t de Student para un nivel de confianza dado

e: error máximo tolerante.

**Análisis estadístico**

Se aplicó la estadística descriptiva a datos de oxígeno disuelto y datos de radiación solar. También se realizó análisis de correlación por medio del coeficiente de Pearson (r) y coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) para evaluar la correlación entre datos de oxígeno disuelto a la misma profundidad a lo largo de la laguna. Se consideraron las correlaciones significativas arriba de 0.80. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS.

**Resultados**

**Numero de muestras**

En base a resultados de la tabla 1, el promedio de oxígeno disuelto es 5.25 mg/l, con desviación estándar de 1.06 mg/l.

**Tabla 1. Resultado de pre-muestreo de oxígeno disuelto**

No.	Fecha	Oxígeno disuelto (mg/l)
1	28/08/2018	6.12
2	28/08/2018	4.49
3	28/08/2018	6.92
4	29/08/2018	5.21
5	29/08/2018	4.28
6	29/08/2018	4.49

Para la determinación del número de muestras se utilizó un nivel de confianza del 90%, con lo cual se obtiene un valor de z de 1.476 y un error de tolerancia del 10% para datos de oxígeno disuelto. En base a resultados del cálculo de número de muestras N=9, tabla 2.

**Tabla 2. Determinación del número de muestras**

Datos	Resultados
Promedio (mg/l)	5.25
Desviación Estándar (mg/l)	1.06
Grados de libertad	5
"Z" 90%	1.48
Error (10%)	0.52
No. De datos	6
Número de muestras	9

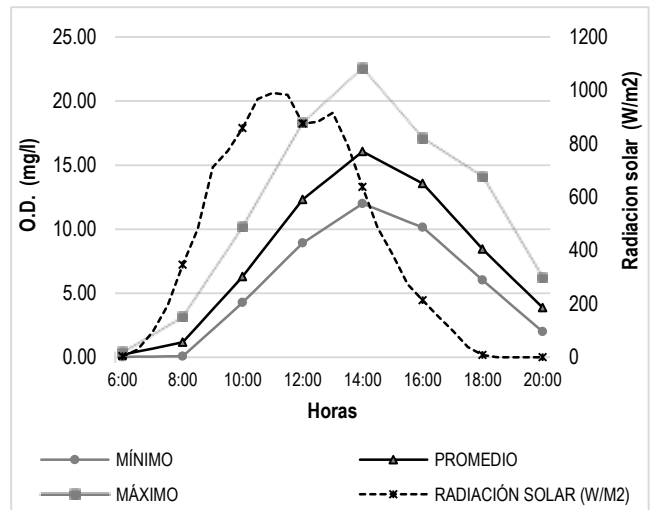
**Correlación de datos de oxígeno disuelto a lo largo de la laguna**

Los datos de oxígeno disuelto fueron correlacionados a lo largo de laguna, a tres profundidades: superficie, intermedio y fondo de la laguna. Correlaciones de entrada-centro; entrada-salida; centro-salida mostraron coeficiente de determinación entre 0.90 a 0.94 para datos de superficie. Para datos de profundidad intermedia se obtuvo coeficientes entre 0.01-0.25, y para datos de fondo los coeficientes fueron entre el rango de 0.00 a 0.30.

**Dinámica del oxígeno disuelto en la zona fótica**

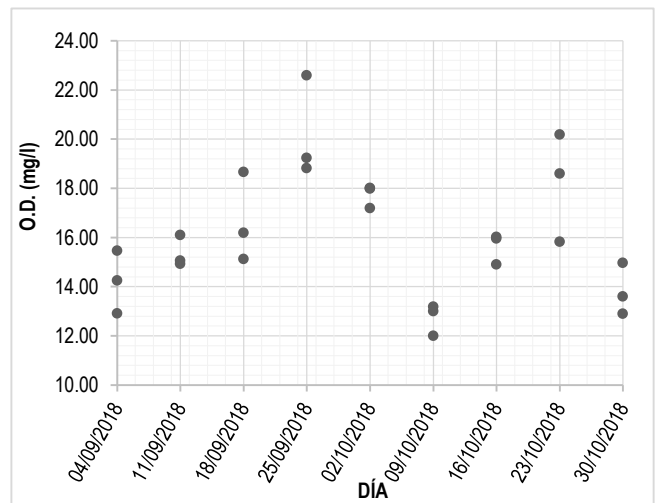
La figura 3, muestra el promedio, mínimo y máximo de la concentración de oxígeno disuelto en la superficie. Estos datos fueron tomados durante el periodo de septiembre y octubre del 2018. Además, en la misma figura se muestra datos promedios de radiación solar medidos en el mismo periodo.

**Figura 3. Oxígeno disuelto mínimo, promedio y máximo en la superficie de la laguna, y radiación solar promedio**



Se presenta a continuación, figura 4, que indica la concentración de oxígeno disuelto a las 14:00 horas, durante el periodo de medición de datos *in situ*.

**Figura 4. Concentración máxima de oxígeno disuelto por día**

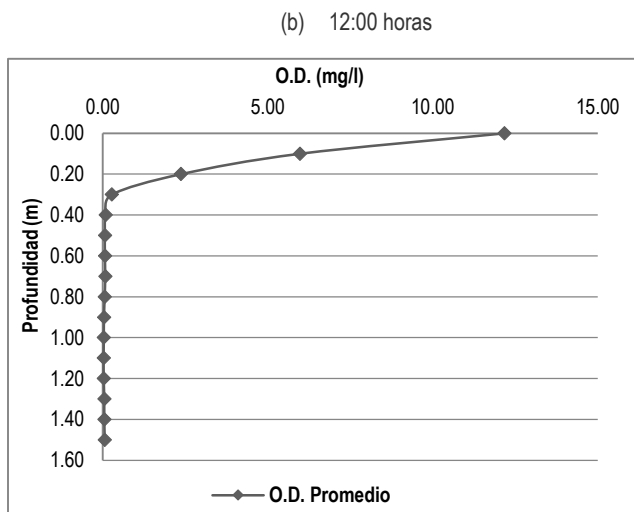
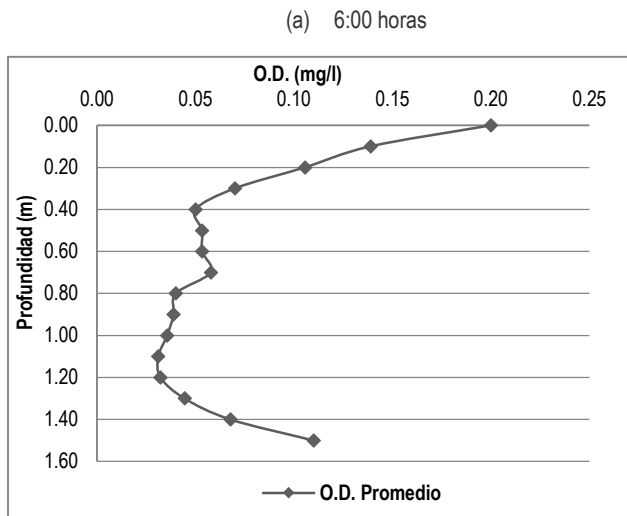


**Perfiles de oxígeno disuelto**

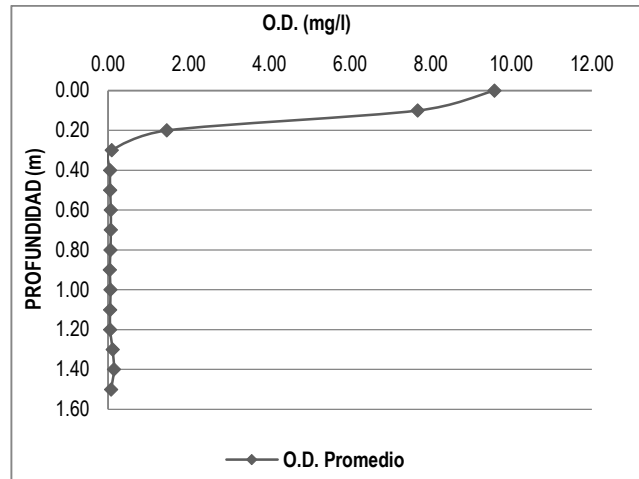
Durante las mediciones de oxígeno disuelto se consideró tomar datos a cada 0.10 m para obtener perfiles, que muestren la concentración de oxígeno disuelto a lo largo de la profundidad de la laguna. En la figura 5 se muestran los perfiles promedios en horario

de 6:00 (a), 12:00 (b) y 18:00 (c) horas respectivamente.

**Figura 5. Perfiles de oxígeno disuelto promedio**



(c) 18:00 horas



**Análisis de resultados**

**Correlación de datos de oxígeno disuelto a lo largo de la laguna**

En base a las correlaciones de datos de superficie se obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0.90 por lo que son correlaciones altamente significativas y positivas, se determinó que existe una mayor dispersión de datos a medida que aumenta la concentración del oxígeno disuelto. A partir de los valores obtenidos de  $r^2$  se deduce que los datos de oxígeno disuelto en la superficie de la laguna son representativos desde cualquier punto de medición, se debe tener en cuenta que esto pudo haber sido condicionado por las dimensiones longitudinales de la laguna.

Los datos de oxígeno disuelto a media profundidad de la laguna, 0.75 m, no son significativos a lo largo de la laguna, debido a bajas correlaciones, en la cual se obtuvo coeficientes de determinación entre 0.01 a 0.25. Estas correlaciones pudieron haber sido condicionada por las bajas concentraciones que oxígeno disuelto presentes a la profundidad señalada, cuando hay pequeños cambios de oxígeno disuelto, afecta la dinámica de un punto a otro, debido a que no siempre tienen la misma variación al mismo tiempo. Lo mismo sucede en la zona anaerobia de la laguna, la cual obtuvo coeficientes de determinación no significativas en el fondo.

**Dinámica del oxígeno disuelto en la zona fótica**

Con la salida del sol cerca de las 6:00 horas la radiación solar empieza a aumentar, los incrementos de

gradiente de radiación estuvieron entre 9-255 W/m<sup>2</sup>/hora obteniendo la mayor radiación entre 11:00 a 13:00 horas la mayor parte del tiempo. Al igual que la radiación solar, el oxígeno disuelto va en aumento desde el amanecer hasta lograr valores máximos cerca de 20 mg/l a las 14:00 horas. Después de alcanzar el máximo valor la radiación empieza a decrecer hasta llegar a valores cercanos de 0 W/m<sup>2</sup> a las 18:00 horas con gradientes de decrecimiento entre 120-210 W/m<sup>2</sup>/hora entre 14:00 a 16:00 horas y 4-110 W/m<sup>2</sup>/hora entre 18:00 a 20:00 horas. Lo mismo sucede con el oxígeno disuelto que empieza a decrecer, a partir de las 14:00 horas llegando a valores cercanos a 4 mg/l a las 20:00 horas. Los gradientes de crecimiento y decrecimiento del oxígeno disuelto varían entre 0.5-3.0 mg/l/hora y 1.20-2.50 mg/l/hora respectivamente.

En las primeras horas de la salida del sol la dispersión del oxígeno disuelto es mínimo y esta dispersión aumenta hasta tener valores altos cuando se alcanza la máxima concentración, la desviación estándar de oxígeno disuelto a las 6:00 horas es de 0.09 mg/l, mientras que a las 14:00 horas es de 2.55 mg/l. la mayor dispersión alcanzada se debe principalmente a la alta actividad fotosintética de las algas a esa hora del día. También se observa que a medida que decrecen los valores de oxígeno disuelto también decrece la dispersión de datos, entre ellos.

Los datos muestran una mayor concentración de oxígeno disuelto a las 14:00 horas obteniendo valores mínimos y máximos de 12.00 y 22.59 mg/l respectivamente con un valor promedio de 16.06 mg/l, la menor concentración de oxígeno disuelto se obtuvo el día 04 de septiembre y 09 de octubre de 2018, ver figura 4, mismo día en donde la radiación solar fue menor al promedio presentado durante las mediciones, la radiación máxima alcanzada esos días fueron de 858 y 907 W/m<sup>2</sup> respectivamente, lo cual fue solo un pico durante las 10:00 horas pasando la mayor parte del día nublado, lo cual condicionó la actividad de las algas presentes en la laguna.

### Perfiles de oxígeno disuelto

En la figura 5a, se muestra el perfil de oxígeno disuelto con datos a cada 0.10 m durante 2 meses de medición, con frecuencia semanal, en horario de 6:00 horas, se muestra que en la superficie presenta mayor concentración de oxígeno disuelto a medida se va bajando en profundidad, el oxígeno disuelto disminuye logrando valores muy cercanos a 0 mg/l, obteniendo

saltos cercanos al fondo de la laguna, debido a la destratificación durante esa hora.

La destratificación solo ocurrió generalmente pasadas las 0:00 horas, cuando la temperatura de la parte superior de la laguna llegara a temperaturas cercanas a las del fondo y estas pudiesen mezclarse. (Montoya López y Gattorno Fúnez, 2018)

En los perfiles de 6:00 horas, se observa la mezcla del oxígeno disuelto, lo cual sucede en las primeras horas de radiación solar, comparado con los resultados obtenidos por Montoya y Gattorno (2018), en donde casi todo el tiempo la mezcla sucedió durante la madrugada (0:00-6:00 horas), por lo que se puede comprobar que la mezcla del oxígeno disuelto depende del comportamiento térmico de la laguna. Mientras que a las 12:00 y 18:00 horas, la concentración de oxígeno disuelto se encuentra estratificada igual como sucede con la temperatura.

El déficit de oxígeno disuelto observado en el estrato superior de la columna de agua durante las primeras horas de medición, se debió a su consumo por los procesos de descomposición de la materia orgánica durante el ciclo oscuro, cuando no ocurre compensación a través de producción, por la actividad fotosintética del producto fitoplancton (Kayombo et al, 2002).

Los perfiles obtenidos a las 12:00 y 18:00 horas muestran una clara estratificación de concentración de oxígeno disuelto. En los primeros 0.30 m, el oxígeno disuelto en la superficie alcanzó valores cercanos a 12 mg/l a las 12:00 horas, logrando valores cercanos de 0 mg/l, a partir de esa profundidad hasta el fondo de la laguna. Mientras a las 18:00 horas se obtuvo valores alrededor de 10 mg/l en los primeros 0.20 m, y desde esa esa profundidad hasta el fondo de la laguna los valores fueron cercanos a 0 mg/l.

Otra condicionante para la estratificación puede deberse a la ausencia de la influencia del viento sobre el mezclado, por tratarse de un sistema piloto y la cercanía de vegetación a menos de 100 m.

### Conclusiones

La concentración de oxígeno disuelto en la superficie es representativo en cualquier punto a lo largo de la longitud de la laguna, puesto que el coeficiente de determinación es mayor a 0.90. Para datos intermedios

y datos de fondo no cumple esa condición ya que el coeficiente de determinación es menor a 0.25.

El comportamiento del oxígeno disuelto en la superficie de la laguna tiene un comportamiento senoidal condicionado por la radiación solar durante el día. Ya que a primera hora del día, el oxígeno disuelto tiene valores cercanos a 0 mg/l, con la salida del sol el oxígeno disuelto va en aumento desde el amanecer hasta lograr valores máximos cerca de 20 mg/l a las 14:00 horas después empieza a decrecer llegando a valores cercanos a 4.50 mg/l a las 20:00 horas.

La baja estratificación térmica durante las primeras horas de la mañana permite cierto grado de mezcla, logrando una relativa distribución de oxígeno disuelto a lo largo de la profundidad. Al medio día (12:00 horas) el oxígeno disuelto se concentra en los primeros 0.25 m. Mientras en la tarde (18:00 horas), el oxígeno disuelto está concentrado en los primeros 0.30 m, pero con una concentración de oxígeno disuelto en descenso por falta de radiación solar a esa hora. Se pudo comprobar que la mezcla y estratificación del oxígeno disuelto viene condicionado principalmente por el comportamiento térmico de la laguna.

## Referencias

- Changi W.Y.B. and Hai Ouyang. (1988). Dynamics of Dissolved Oxygen and Vertical Circulation in Fish Ponds. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- CONAGUA. (2016). Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Huinil Mejía, R. (2019). Efecto de la radiación solar en la dinámica de la distribución del oxígeno disuelto en la laguna facultativa de la planta piloto Aurora II. Guatemala: ERIS-USAC.
- Kayombo, S., Mbwette, T. S., Mayo, A. W., Katima, J. H. and orgensen, S. E. (2002). Diurnal Cycles of Variation of Physical-Chemical Parameters in Waste Stabilization Ponds. Revista ecological engineering. Vol. 18., 287-291.
- León Suematsu, G. (1995). Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización. Colombia: CEPIS.
- Mara, D. (2003). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. London: UK: MapSet.
- Montoya López, A. S., & Gattorno Fúnez, J. F. (2018). Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa. Guatemala: ERIS-USAC.
- Stewart M. Oakley. (2005). Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad. Chico, California: Universidad Estatal de California.

## Información del autor

Ingeniero civil, Roberto Huinil Mejía, graduado en la Universidad de San Carlos de Guatemala (2016). Maestro en ciencias en ingeniería sanitaria por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria ERIS-USAC (2019).