

Artículo científico

Comportamiento de la temperatura aire-agua en una laguna facultativa primaria**Ana Sarai Montoya López**

Ingeniera civil, M.Sc. en ingeniería sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala
Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: ana.sarai22@gmail.com

Adán Ernesto Pocasangre Collazos

M.Sc. ingeniero civil, profesor titular en ERIS-USAC, Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: adan.pocasangre@crs.org
Recibido 04.09.2018 Aceptado 11.09.2018

Resumen

Este artículo presenta el análisis del comportamiento y de la correlación entre la temperatura del aire y la temperatura del agua en una laguna facultativa primaria piloto diseñada, construida y operada en la ciudad de Guatemala, aplicable a climas con temperaturas medias mensuales entre los 17°C y 23 °C, con el fin de proporcionar una ecuación para predecir la temperatura del agua en función de la temperatura del aire que es más fácil de conocer. Para la recolección de datos se instalaron sensores de temperatura HOBO MX2201 en el interior y en el exterior de la laguna, mismos que fueron programados para hacer lecturas a cada 30 minutos; las temperaturas del aire medidas con uno de los sensores se compararon con las temperaturas tomadas simultáneamente con una estación meteorológica automática, para verificar la confiabilidad de los datos. Para el análisis y procesamiento de los datos se empleó estadística descriptiva, estudio de correlación y regresión, y contraste de hipótesis. Se encontraron coeficientes de correlación en un intervalo de confianza del 95% (valor $p < 0.05$) entre los datos de temperatura del aire y la temperatura media de la columna de agua ($r^2 = 0.871$), y entre la temperatura del aire y la temperatura media superficial ($r^2 = 0.880$); los modelos de regresión lineal son: $T_{\text{Media-agua}} = 1.4815T_{\text{Media-aire}} - 8.0929$ y $T_{\text{Media-agua}} = 1.4607T_{\text{Media-aire}} - 6.4772$. Los datos que sirvieron de base para el estudio del comportamiento de la temperatura no mostraron una diferencia significativa con los datos históricos de INSIVUMEH (temperaturas medias registradas no mayor a 0.80 °C, prueba $p < 0.05$), la temperatura tuvo un comportamiento cíclico diario con las máximas temperaturas promedio mensuales de 22.46 °C a 22.75°C entre las 13:00 y las 16:00 horas, la temperatura del agua de la laguna no siempre se encontró por encima de la temperatura del aire como ha solido creerse.

Palabras clave: Ecuación, ambiente, sensor de temperatura, media, correlación, regresión.

Abstract

This article presents the analysis of the behavior and correlation between air temperature and water temperature in a pilot primary facultative lagoon designed, built and operated in Guatemala City, applicable to climates with average monthly temperatures between 17 ° C and 23 ° C, in order to provide an equation to predict the temperature of the water as a function of the temperature of the air which is easiest to obtain. For data collection, HOBO MX2201 temperature sensors were installed inside and outside the lagoon, programmed to collect information every 30 minutes; the air temperatures measured with one of the sensors were compared with the temperatures taken simultaneously with an automatic weather station, to verify the reliability of the data. For the analysis and processing of the data, descriptive statistics, correlation and regression studies, and contrast of hypotheses were used. Correlation coefficients were found in a confidence interval of 95% (p value < 0.05) between the data of air temperature and the average temperature of the water column ($r^2 = 0.871$), and between the air temperature and the average temperature superficial ($r^2 = 0.879$); the linear regression models are: $T_{\text{Average-water}} = 1.4815T_{\text{Average-air}} - 8.0929$ and $T_{\text{Average-water}} = 1.4607T_{\text{Average-air}} - 6.4772$. The data that served as the basis for studying the behavior of the temperature did not show a significant difference with the historical data of INSIVUMEH (average temperatures registered no higher than 0.80 ° C, test $p < 0.05$), the temperature had a daily cyclical behavior with the maximum monthly average temperatures from 22.46 ° C to 22.75 ° C occurring from 13:00 to 16:00 pm, the water temperature of the lagoon was not always found above the air temperature as it was commonly believed.

Key words: Equation, environment, temperature sensor, average, correlation, regression.

Introducción

En este artículo se presenta una ecuación para el cálculo de la temperatura media del agua y otra ecuación para la determinación de la temperatura media superficial del agua (primeros 50 cm de profundidad) en función de la temperatura del aire para regiones con temperaturas medias mensuales entre 17 y 24 °C, así como el análisis del comportamiento que tuvo la temperatura, a partir de los datos recolectados en una laguna facultativa primaria de 1.50 m de profundidad, ubicada en la planta piloto de aguas residuales "Arturo Pazos Sosa" de la colonia Aurora II de la ciudad de Guatemala. Los datos del aire y del agua fueron recolectados con sensores de temperatura HOBO MX 2201, de acuerdo al método APHA 2550 B, edición 23, también se utilizó una estación meteorológica automática para las mediciones de la temperatura del aire. Información recopilada desde febrero hasta mayo de 2018.

Los resultados obtenidos fueron: correlación de las temperaturas del aire medidas con los sensores y la estación automática; correlación de las temperaturas del agua medidas al inicio, centro y final de la laguna en el eje central; estudio del comportamiento de la temperatura media del agua y del aire; correlación y modelo de regresión de las temperaturas del agua y del aire; y comparación de los modelos encontrados con los existentes.

Antecedentes

Las lagunas facultativas son sistemas de agua naturales poco profundos (1.5 -2.0 m), por lo general reciben aguas residuales con grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes. Dentro de estos sistemas, ocurre una serie de procesos complejos de reacciones físicas, químicas y bioquímicas, que dan lugar al crecimiento de microorganismos, los cuales a su vez se encargan de estabilizar los desechos presentes. Tales procesos como son: la velocidad de fotosíntesis, tasa de mortalidad bacteriana y condiciones de mezcla dentro de una laguna, así como la regulación de presencia de formas de vida, digestión de los lodos y transferencia de oxígeno, se ven influenciados por distintos factores ambientales, de los cuales la temperatura es el más crucial (Yáñez, 1993).

Los datos de temperatura han sido empleados en los procesos de diseño de sistemas lagunares, principalmente en dos formas: i) la temperatura media del aire en el mes más frío, ii) la temperatura media del

líquido en el mes más frío; siendo predominante la primera de ellas, debido a: se obtiene un factor de seguridad ya que el agua tendrá una temperatura más alta de 2 a 3°C (Sperling, 2007), es más fácil obtener datos históricos de la temperatura del aire y se carece de modelos que permitan predecir la temperatura media del líquido en función de las condiciones climáticas locales. Sin embargo, esta práctica podría tener un impacto negativo en los costos de los proyectos, ya que la sensibilidad de la temperatura del líquido en función de la temperatura del aire es notoria.

Con el objeto de predecir el comportamiento de la temperatura del agua en función de la temperatura del aire (T_a), se han realizado estudios de correlaciones por distintos investigadores en diferentes zonas, condiciones climáticas, período y frecuencia de recolección de datos, así como criterios de cálculo. Las ecuaciones que se encuentran en la literatura bajo las condiciones mencionadas se describen a continuación:

- i) $T_s = 9.336 + 0.780T_a$ ($R^2 = 0.831$),
- ii) $T_s = 10.433 + 0.688T_a$ ($R^2 = 0.828$), realizados en Lima, Perú (Burgers, 1982) para la temperatura superficial (T_s) de la laguna y para la temperatura promedio de la misma (T) respectivamente,
- iii) $T_s = 10.966 + 0.611T_a$ ($R^2 = 0.744$), estudio en Campina Grande Brasil (Auerswald, 1978),
- iv) $T_s = 2.688 + 0.945T_a$ ($R^2 = 0.975$), investigación en Al Samra, Amman, Jordania (Yáñez y pescod, 1988),
- v) $T_s = 3.685 + 1.137T_a$ ($R^2 = 0.970$), modelo desarrollado en Chile (Vargas y Sanchez, 1972),
- vi) $T_s = -0.236 + 1.404T_a$ ($R^2 = 1.00$), estudio en Chile (Vargas y Sanchez, 1982).

Otros dos estudios de correlaciones de temperatura son el desarrollado por Sperling, V. (2007), quien calculó una ecuación basado en los valores de los estudios presentados por Yáñez (2003) y Brito et al. (2000) obteniendo como resultado la ecuación $T_s = 12.7 + 0.54T_a$; y por Abis & Mara (2006), quienes reportan un mejor ajuste en las correlaciones, a partir de los promedios semanal y mensual de temperatura, en climas más templados como el de Reino Unido. Los resultados de esta investigación fueron las dos siguientes expresiones: $T = 0.959T_a$, $r^2 = 0.988$ para los promedios semanales y $T = 0.907T_a$, $r^2 = 0.965$ para los promedios mensuales, validas en un rango de temperatura de 3 a 18 °C. Si bien es cierto, en Guatemala un clima tropical prevalece, muchas veces pueden encontrarse temperaturas más frías la mayor parte del tiempo y ser representativas de condiciones climáticas templadas (Montoya & Gattorno, 2018).

Descripción del área de estudio

La información de campo fue recopilada en la ciudad de Guatemala, zona 13, colonia Aurora II, planta piloto de tratamiento de aguas residuales “Arturo Pazos Sosa”, área experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Ver figura 1). Las coordenadas geográficas del lugar son latitud 14°34’42’’N y longitud 90°32’12’’O, la altitud aproximada es de 1460 metros sobre el nivel del mar.

De acuerdo a la información de INSIVUMEH (2018) el clima de la zona es subtropical con variaciones de temperatura máxima y mínima media entre 29.9°C y 11.40°C respectivamente, y una precipitación promedio anual de 1,408.80 mm.

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Metodología

Para el desarrollo del estudio (Montoya & Gattorno, 2018), se diseñó, construyó y operó una laguna facultativa a escala piloto.

Descripción de la unidad experimental

La laguna facultativa piloto con las características físicas y operacionales descritas en la tabla 1, fue suministrada de agua residual doméstica pretratada mediante una rejilla.

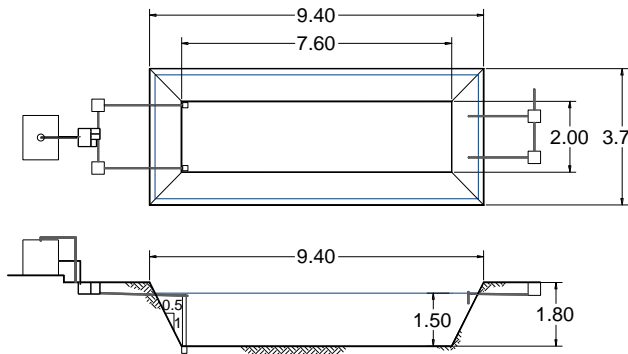
Tabla 1. Características del modelo experimental.

Caudal de diseño	$Q_{diseño} =$	3.02	m ³ /día
Caudal de operación promedio	$Q_{op} =$	2.42	m ³ /día
Tiempo de retención hidráulico teórico	TRH=	11.80	días
Relación de taludes	H:V=	0.5:1	adimensional
Dimensiones			
Profundidad	P=	1.50	m
Largo a nivel del agua	$L_1 =$	8.75	m
Ancho a nivel del agua	$a_1 =$	3.10	m
Largo en la base	$L_2 =$	7.60	m
Ancho en la base	$a_2 =$	2.00	m
Largo en la corona	$L_3 =$	9.40	m
Ancho en la corona	$a_3 =$	3.70	m
Área superficial	A=	27.13	m ²
Volumen útil de laguna	$V_u =$	35.68	m ³

Fuente: Montoya & Gattorno, 2018

Constó de un tanque regulador de caudal, una caja distribuidora de caudal con dos vertederos triangulares para el ingreso del agua al sistema y uno rectangular para excesos, cajas de interconexión, dos tuberías de entrada ubicadas a 0.05 m por debajo del nivel del agua, y dos tuberías de salida ubicadas a 1.50 m de altura desde el fondo, el esquema se presenta en la figura 2.

Figura 2. Esquema de la laguna facultativa.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Durante el período de estudio la laguna funcionó a caudal promedio de 0.028 l/s.

Procedimiento experimental

El parámetro analizado en la investigación fue la temperatura, unidad de medición °C, con la utilización de un termómetro como equipamiento, de acuerdo al método APHA 2550 B (2017).

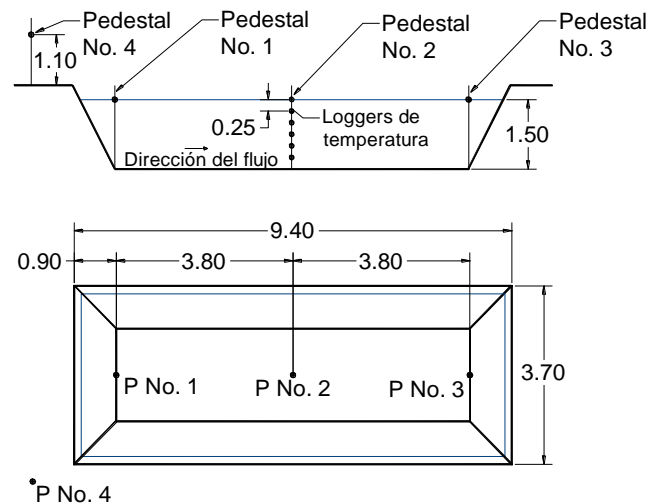
Las mediciones de temperatura en la laguna facultativa y el ambiente fueron realizadas mediante sensores de temperatura HOBO MX2201, dispositivos a prueba de agua que transmiten la información a través de bluetooth, su precisión es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -20° a 70°C , tienen un rango de acción de -20 a 70°C en aire y de -20 a 50°C en agua y un rango de transmisión de aproximadamente 30.5 m. Para corroborar el funcionamiento de los aparatos, se correlacionaron los datos de temperatura de aire con las lecturas realizadas con una estación meteorológica automática Davis Instruments Vantage pro2, de transmisión inalámbrica con resolución de 0.1°C , rango de medición de -40 a 65°C y precisión nominal de 0.5°C para la temperatura exterior. Ambos equipos fueron programados para realizar mediciones cada 30 minutos durante el periodo de febrero a mayo.

Dentro de la laguna los dispositivos fueron colocados en tres pedestales, dos de ellos (P No. 1 y P No. 3) al pie del talud en la entrada y salida de la laguna con un sensor cada uno, los cuales se rotaron en profundidades de 0.25, 0.75 y en la superficie, para correlacionar los datos recolectados por 24 días, con las temperaturas de los sensores del pedestal principal (P No. 2) ubicado en el centro de la laguna, todos en el

eje central de la unidad. Lo anterior fue realizado para determinar la representatividad de los datos de temperatura a una misma profundidad a lo largo de la laguna.

En el pedestal principal, seis sensores de temperatura fueron ubicados: en la superficie y en las profundidades de 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 m. Para la recolección de los datos de temperatura del aire se colocó un sensor en la borda de la laguna, en un poste de madera de 1.10m de altura. En total se recolectaron 47,616 datos de temperatura. El esquema de la ubicación de los sensores se muestra en la figura 3.

Figura 3. Ubicación de los sensores de temperatura.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Procesamiento de datos y análisis estadístico

Se empleó un análisis descriptivo de los datos de temperatura, para conocer el patrón de comportamiento general, así como el apartamiento del mismo. En el presente estudio, se tomaron las siguientes medidas de posición y de dispersión (Orellana, 2011): media y desviación estándar. Otros valores considerados fueron los máximos ($X_{m\acute{a}x}$) y mínimos ($X_{m\acute{i}n}$) de los rangos de datos analizados en los períodos de interés (horarios, diarios, semanales, mensual).

También se realizó un estudio de correlación y regresión entre las temperaturas del agua y del aire para medir la significación del grado o intensidad de asociación entre las dos variables. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, ya para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión.

Con la aplicación del análisis de regresión se encontraron las ecuaciones de la temperatura del agua (y-variable dependiente) en términos de la temperatura del aire (x-variable dependiente) de la forma $Y = a + bX$, por el método de mínimos cuadrados.

La estimación de los coeficientes de las ecuaciones determinadas, se realizó a partir de los promedios semanales de las temperaturas de la columna de agua de la laguna (superficie, 1.25, 1.00, 0.75, 0.50 y 0.25 m de profundidad) y los promedios semanales de temperatura del aire, así como de las temperaturas promedio superficiales del agua (superficie, 1.25 y 1.00 m de profundidad).

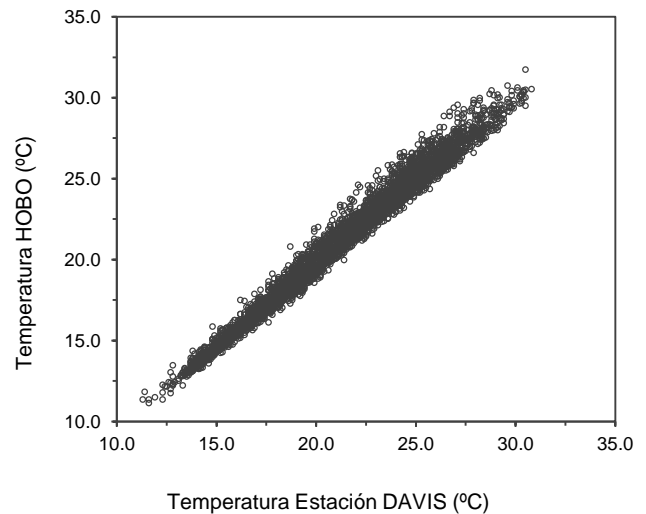
Por otra parte, se empleó un contraste de hipótesis bajo el concepto de “p-valor”, el cual puede considerarse como el valor límite para que un contraste sea significativo, es decir, elegido un nivel de significación α , se rechaza una hipótesis nula H_0 si $p \leq \alpha$.

Resultados

Correlación entre datos recopilados con dispositivos de temperatura

El valor de correlación entre los datos de temperatura del aire recopilados con los sensores y con la estación automática fue de $r^2 = 0.985$, en la figura 4 se presentan los puntos graficados.

Figura 4. Comparación de temperatura entre dispositivos de medición.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

También se calculó la correlación de la temperatura del agua medida con 3 sensores a la misma profundidad en el inicio, centro y final de la laguna en su eje central, los valores de r^2 estuvieron entre 0.989 y 0.998.

Comportamiento de la temperatura media del agua y aire

Las temperaturas medias mensuales del aire fueron comparadas con los datos históricos de la estación INSIVUMEH para el período de 1990-2016, los resultados se muestran en la tabla 2.

El comportamiento de ambas variables se muestra en la figura 5, para registros a cada 30 min desde el 24 de enero al 31 de mayo de 2018. La temperatura del aire estuvo entre 11.15 °C y 31.74 °C, y la temperatura media de la laguna (promedio de los seis sensores ubicados a cada profundidad) entre 17.70 °C y 26.25 °C.

En la figura 6 se puede apreciar el patrón que tuvieron la temperatura del aire y la temperatura del agua por hora durante 3 días (del 05 al 08 de marzo de 2018).

Durante el periodo mencionado la temperatura del aire estuvo ente los 11°C y los 28°C y la temperatura del agua entre los 17 °C y los 22°C.

Las diferencias entre ambas temperaturas variaron entre -10 °C a 9 °C como se muestra en la figura 7.

temperatura del aire fue mayor a la temperatura del agua (puntos marcados) y viceversa (espacios en blanco).

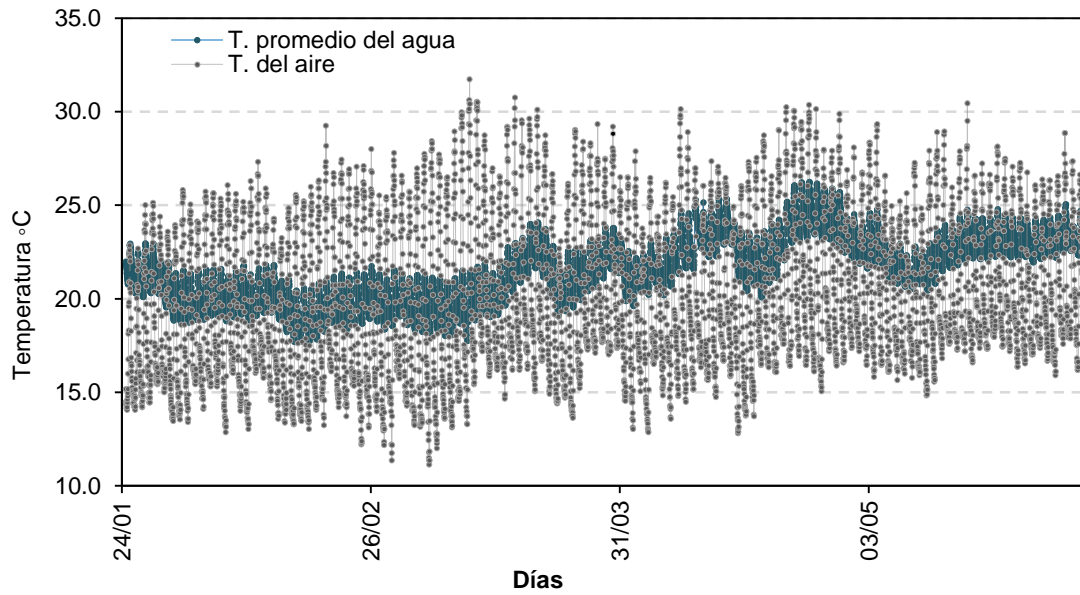
No siempre la temperatura del agua fue mayor a la del aire, la figura 8 muestra las horas del día donde la

Tabla 2. Comparación de temperaturas medias del aire con datos históricos.

Temperatura	Enero*	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	junio
<i>Medidas</i>						
Media	17.92	18.87	20.21	20.35	20.68	19.65
Máx. promedio	23.95	25.97	28.17	27.56	27.18	25.90
Mín. promedio	14.35	14.05	14.96	15.36	16.70	16.26
Máx. absoluta	25.14	29.26	31.74	30.37	30.46	28.74
Mín. absoluta	13.47	12.18	11.15	12.82	14.84	14.58
<i>Históricas INSIVUMEH</i>						
Media	18.10	19.07	20.10	21.10	21.20	20.44
Máx. promedio	24.35	25.75	26.82	27.73	27.13	25.77
Mín. promedio	13.25	13.69	14.64	16.15	16.86	16.84
Máx. ABS	27.87	29.40	30.08	30.70	30.34	28.40
Mín. absoluta	9.66	10.43	11.08	13.33	15.00	15.10

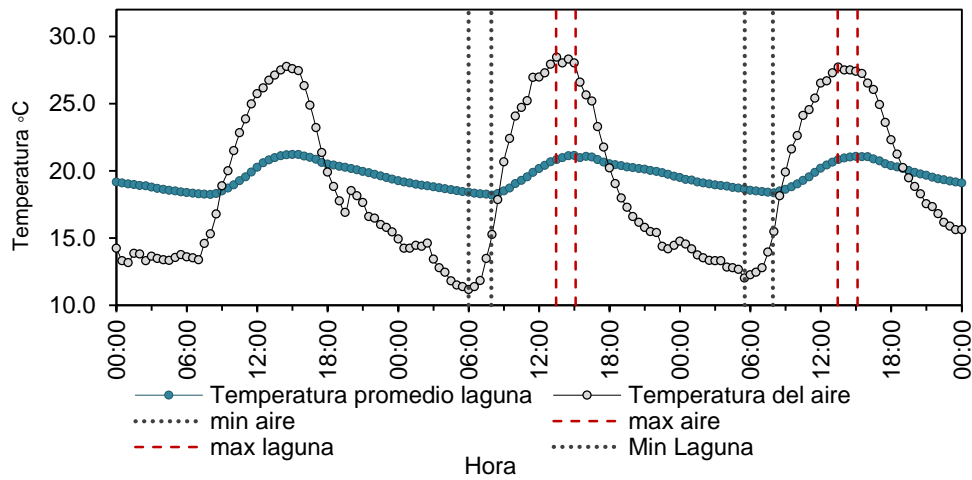
Fuente: Montoya & Gattorno, 2018

Figura 5. Variación de la temperatura del aire y la temperatura media de la columna de agua.



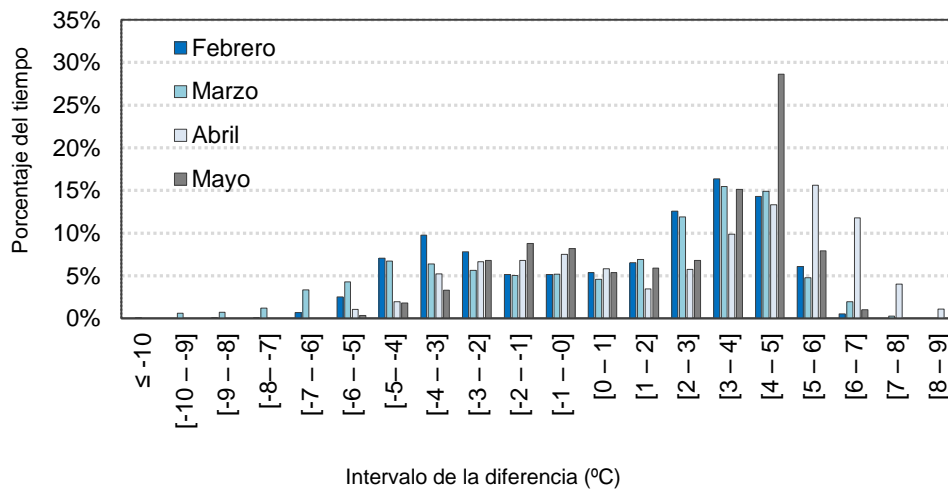
Fuente: Montoya & Gattorno, 2018

Figura 6. Desfase temporal entre las temperaturas máximas y mínimas del aire.



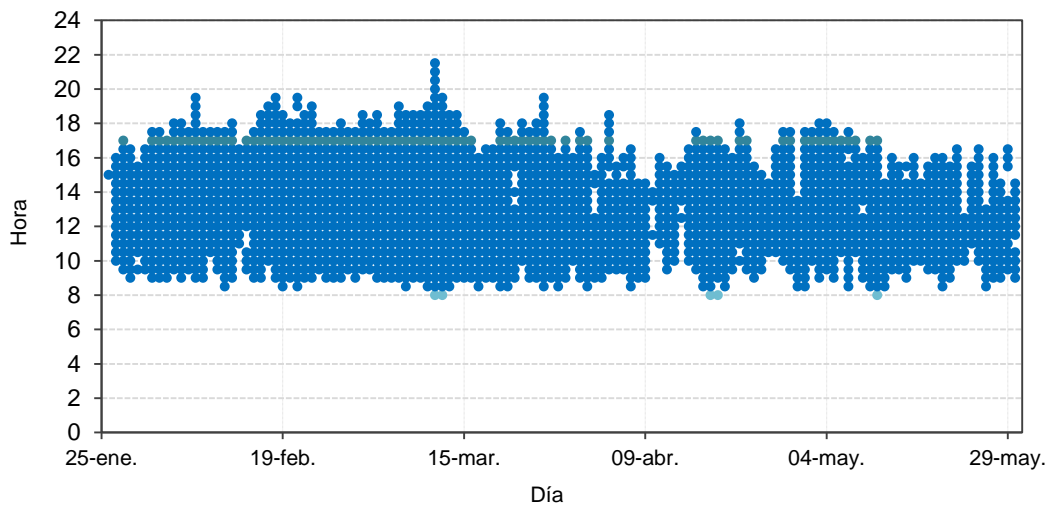
Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Figura 7. Distribución de frecuencia de la diferencia entre la temperatura media de la laguna y temperatura del aire.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Figura 8. Horas del día donde la temperatura del aire es mayor a la temperatura media de la laguna.



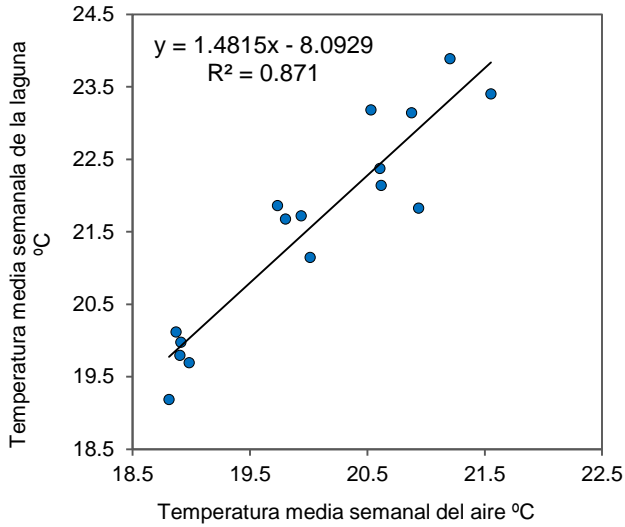
Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Correlación y modelo de regresión para la temperatura media de la laguna y la temperatura del aire

La tabla 3 y figura 9 contienen los resultados estadísticos y gráficos de los datos ajustados a la recta $T_o = \beta_1 T_a + \beta_0$ para los datos promedio semanales (columna de agua) en un intervalo del 95% de

confianza, donde β_1 es la pendiente y β_0 intercepto/coeficiente y T_a la temperatura del aire respectivamente.

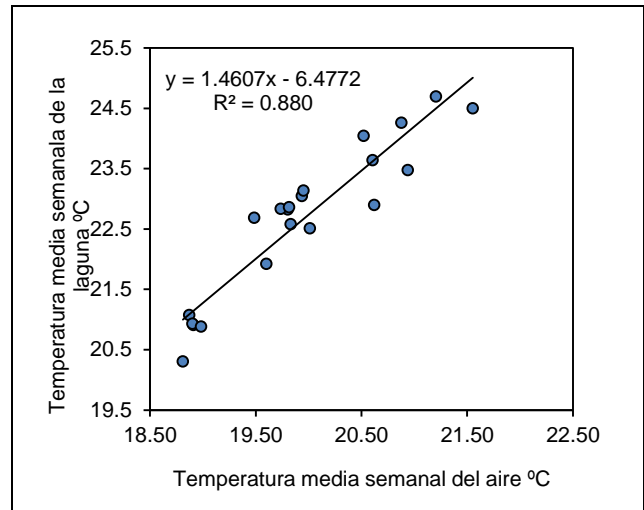
Figura 9. Línea de mejor ajuste para los datos promedios semanales a partir de las temperaturas de toda la profundidad.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

La recta y el coeficiente de correlación para los promedios semanales de la temperatura superficial del agua son presentados en la figura 10.

Figura 10. Línea de mejor ajuste para los promedios semanales, a partir de las temperaturas superficiales de la laguna.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

La ecuación encontrada para la determinación de la temperatura media del agua es:

$$T_{\text{Media-agua}} = 1.4815T_{\text{Media-aire}} - 8.0929$$

La ecuación encontrada para el cálculo de la temperatura media superficial es:

$$T_{s_{\text{Media-agua}}} = 1.4607T_{\text{Media-aire}} - 6.4772$$

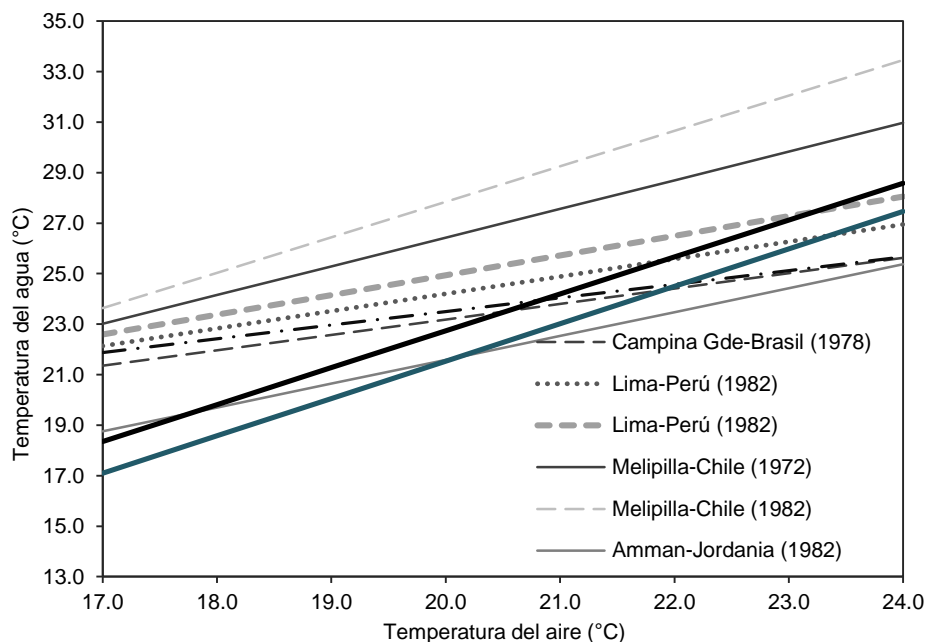
Las rectas antes descritas se compararon con las rectas de las ecuaciones existentes, el resultado se presenta en la figura 11 y tabla 4.

Tabla 3. Cálculos estadísticos de regresión lineal.

Valores	Coef.	Desviación típica	Valor t	Valor p	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-8.092	3.048	-2.654	0.018	-14.631	-1.554
Pendiente	1.481	0.152	9.738	0.000	1.155	1.808
Estadísticas de la regresión						
Coeficiente de correlación múltiple						0.933
Coeficiente de determinación R ²						0.871
R ² ajustado						0.862
Error típico						0.543
Observaciones						16.000

Fuente: Montoya & Gattorno, 2018

Figura 11. Comparación de modelos de regresión.



Fuente: Montoya & Gattorno, 2018

Tabla 4. Comparación de temperaturas del agua con modelos existentes.

T. del aire	Brasil (1978)	Lima-Perú (1982)	Lima-Perú (1982)	Chile (1972)	Chile (1982)	Jorda. (1982)	Prom. (2007)	Prom. Semanal Superficial Guatemala (2018)	Prom. Semanal Guatemala (2018)
17.00	21.35	22.14	22.60	23.01	23.63	18.75	21.88	18.35	17.09
18.00	21.96	22.83	23.38	24.15	25.04	19.70	22.42	19.82	18.57
19.00	22.58	23.52	24.16	25.29	26.44	20.64	22.96	21.28	20.06
20.00	23.19	24.20	24.94	26.43	27.84	21.59	23.50	22.74	21.54
21.00	23.80	24.89	25.72	27.56	29.25	22.53	24.04	24.20	23.02
22.00	24.41	25.58	26.50	28.70	30.65	23.48	24.58	25.66	24.50
23.00	25.02	26.27	27.28	29.84	32.06	24.42	25.12	27.12	25.98
24.00	25.63	26.96	28.06	30.97	33.46	25.37	25.66	28.58	27.46

Fuente: Montoya & Gattorno, 2018.

Análisis de resultados

Correlación entre datos recopilados con dispositivos de temperatura

Los datos de temperatura del aire tomados con los sensores y con la estación automática, mostraron una correlación altamente significativa y positiva ($r^2=0.985$) y poca dispersión, como se muestra en la figura 4, la diferencia entre los valores medios de las lecturas fue de $0.20\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.54\text{ }^\circ\text{C}$. Asimismo, se determinó con la prueba de hipótesis que la diferencia de medias no fue estadísticamente mayor de $0.75\text{ }^\circ\text{C}$ (prueba-t, $p<0.0001$). Lo anterior muestra la confiabilidad y precisión que presentaron los aparatos utilizados en contraste con un equipo más sofisticado como lo es una estación automática.

Las correlaciones de los datos de temperatura registrados con los sensores ubicados a una misma profundidad en los tres pedestales fueron altas (entre 0.989 y 0.998), lo que significa que los datos de temperatura en las distintas profundidades a los que se

instalaron los sensores en el pedestal P No. 2, son representativos e isotermos a lo largo de la laguna.

Comportamiento de la temperatura media del agua y aire

Como se muestra en la tabla 2, se comprobó que la diferencia entre las temperaturas medias registradas, y las temperaturas históricas de INSIVUMEH no fue estadísticamente mayor a $0.80\text{ }^\circ\text{C}$ (prueba-t, $p<0.05$), lo cual indica la representatividad de las mediciones registradas durante la investigación.

Como puede apreciarse en la figura 5 durante la temporada más fría de medición del 24 de enero al 10 de marzo, la temperatura media de la laguna se mantuvo más estable ($19.95 \pm 1.05\text{ }^\circ\text{C}$) en comparación con la temporada más cálida ($22.28 \pm 1.53\text{ }^\circ\text{C}$), del 10 de marzo al 8 de mayo, donde presentaron cambios más bruscos con caídas e incrementos de $3\text{-}5\text{ }^\circ\text{C}$ en cortos períodos de tiempo; estos cambios se debieron principalmente a las diferencias en las condiciones ambientales en ambas temporadas, donde la radiación

solar y las condiciones de viento en las instalaciones ejercieron el papel principal. A pesar de ello, la temperatura de la laguna creció gradualmente hasta estabilizarse nuevamente cerca del 8 de mayo.

La temperatura del aire, así como la temperatura media de la laguna siguieron un patrón cíclico de comportamiento diario, teniendo ambas un tiempo de respuesta diferente a las condiciones ambientales. La figura 6 muestra un desfase entre el tiempo en que ambas temperaturas alcanzan sus valores mínimos. La temperatura del agua de la laguna tuvo un tiempo de respuesta más lento y tarda más en enfriarse en comparación con la temperatura del aire. Este desfase ocurrió siempre y fue de 0 a 7 horas (entre 0-5 horas el 95.28 % del tiempo). Por otra parte, el desfase entre el tiempo en el cual ambas temperaturas alcanzan sus valores máximos, fue de 0 a 4 horas; sin embargo, esto solo ocurrió el 69.29 % del tiempo, ya que el tiempo restante alcanzaron sus valores máximos a la misma hora del día.

El conocimiento de los intervalos de tiempo, donde suceden las temperaturas máximas de la laguna, puede marcar una pauta de la ocurrencia de un mayor o menor desempeño de la laguna para ciertos procesos, como, por ejemplo, la extinción bacteriana, debido al incremento del pH producto de las altas temperaturas y mayor actividad de las algas, así como la mayor producción de oxígeno disuelto, lo cual de acuerdo a lo encontrado tomaría lugar entre las 13:00 – 16:00 horas la mayor parte del tiempo.

La temperatura media de la laguna estuvo por encima de la temperatura del aire el 66.73 % (mayor distribución a la derecha del gráfico de la figura 7), mientras que el resto del tiempo lo fue la temperatura del aire (33.27 %, distribución a la izquierda del gráfico), ambas con valores frecuentemente en el rango de 1 a 6 °C. En los períodos más fríos de febrero y marzo se encontró los valores más extremos siendo la temperatura del aire (cola izquierda del gráfico) ≥ 6 °C, en los meses más calientes abril y mayo los valores extremos de la temperatura de la laguna estuvieron por encima de la temperatura del aire (cola derecha del gráfico) ≥ 7 °C. A pesar de esto, en todos los meses se puede notar una distribución similar en los intervalos desde [-6 – -5] °C hasta [6 – 7] °C, es decir, se observa, tantos incrementos de la temperatura del aire sobre la del agua y viceversa.

En la figura 8 se pueden notar mayores valores de la temperatura media de la laguna sobre la temperatura

del aire comúnmente entre las 0:00 y las 9:00 horas, y entre las 19:00 y las 0:00 horas; se observaron valores mayores de la temperatura del aire sobre la de la laguna entre las 9:00 y las 19:00 horas, aumentando y disminuyendo cada una su rango en la temporada de verano. De esta manera, es evidente que la ocurrencia de ambos casos fue un hecho diario, no temporal. La temperatura media de la laguna no siempre se encuentra por arriba de la temperatura del aire en un clima como el de Guatemala. Asimismo, cuando llegaron a suceder diferencias entre 7 y 10 °C, se pudo constatar que los valores de la temperatura media de la laguna se encontraron por debajo de la temperatura promedio del mes más frío o de diseño; sin embargo, su frecuencia fue bastante baja limitándose a algunas horas.

Correlación y modelo de regresión para la temperatura media de la laguna y la temperatura del aire

Los promedios de temperatura horarios, diarios y semanales fueron evaluados, donde los últimos resultaron con el mejor ajuste, siendo consistente con estudios previos (Yáñez, 1993; Abis y Mara, 2006). La correlación entre ambas variables mostró una mayor relación lineal y menor dispersión para los promedios semanales en los datos de los meses de estudio (febrero-mayo), comprendiendo temperaturas en un rango de 18.81 a 21.55 °C.

El valor-p <0.05 mostrado en la tabla 3, fue altamente significativo para la pendiente, evidenciando la linealidad e indicando que la temperatura media del agua fue afectada por los cambios en la temperatura del aire ($r^2=0.871$, ver figura 9).

Un modelo similar fue obtenido para la temperatura superficial media semanal (promedio de 3 sensores hasta 0.50 m de profundidad) de la laguna con un coeficiente de determinación $r^2=0.880$ para los meses de febrero-junio del 2018 (figura 10).

La figura 11 muestra una comparación entre las ecuaciones que se encuentran en la literatura y las obtenidas en este estudio para un rango de temperatura del aire entre 17 y 24 °C. En la tabla 4 se puede observar que, a valores más bajos de la temperatura del aire, las ecuaciones obtenidas en este estudio presentan menores valores en comparación con otros modelos, las condiciones climáticas donde fueron desarrolladas cada una de ellas es el factor principal de tal diferencia.

En temperaturas del aire entre 17 y 20 °C, la ecuación de los promedios semanales superficiales y promedios semanales de la columna de agua indican que la laguna se encontraría más caliente de 1.35 a 2.75 °C y de 1 a 1.55 °C, respectivamente. Mientras que a temperaturas del aire en el rango de 20 a 24 °C, la temperatura de la laguna subiría de 2.75 a 4.60 °C y de 1.55 a 3.50 °C, para ambos casos en el mismo orden.

Conclusiones

Los datos de temperatura utilizados para este artículo son representativos de la ciudad de Guatemala, ya que al hacer la comparación con los datos históricos de INSIVUMEH, no se mostró una diferencia significativa mayor a 0.80 °C (prueba-t, p<0.05).

El comportamiento de la temperatura media de la columna de agua fue cíclico diario, con temperaturas máximas promedios mensuales de 22.46 °C a 22.75°C entre las 13:00 y las 16:00 horas.

Se pudo verificar que la temperatura del agua de la laguna no siempre se encontró por encima de la temperatura del aire en un clima como el de Guatemala, entre las 8:00 y las 16:00 horas la temperatura del aire fue casi siempre mayor, con una diferencia de hasta 16°C por encima de la temperatura del agua.

Lo resultados mostraron una mejor correlación entre los datos de temperatura del aire-agua para los promedios semanales, en comparación con los horarios y diarios. Para la temperatura media semanal del agua y la temperatura media semanal del aire se obtuvo un r²=0.871, y para la temperatura superficial media semanal del agua y la temperatura media semanal del aire fue de r²=0.880.

Donde la temperatura media mensual del aire esté entre 17 y 24 °C, la temperatura media del agua de una laguna facultativa es:

$$T_{\text{Media-agua}} = 1.4815T_{\text{Media-aire}} - 8.0929 \quad (1)$$

La temperatura media superficial es:

$$T_{\text{SMedia-agua}} = 1.4607T_{\text{Media-aire}} - 6.4772 \quad (2)$$

Para los mismos valores de temperatura media mensual del aire, la temperatura media del agua estará más caliente entre 1 y 3.50°C utilizando la ecuación 1, y entre 1.35 y 4.60 °C empleando la ecuación 2.

Agradecimientos

Esta investigación pudo llevarse a cabo gracias a la colaboración de: la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria por prestar las instalaciones para desarrollar las construcción y experimentación en la planta piloto, el Servicio de Intercambio Alemán (DAAD) por el otorgamiento de fondos y al Ing. Juan Francisco Gattorno con quien se realizó el estudio “Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa”.

Referencias

Abis, Karen; Mara, Duncan. Temperature measurement and stratification in facultative waste stabilisation ponds in the UK climate. School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK, 2006. 114: 35-47 p.

American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environmental Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23 rd ed., American Public Health Association, Washington, D.C., 2017.

Auerswald, W.A. Estudio de lagoas facultativas na regio nordeste do Brasil. Disertacao para grado de mestre en ciencias. Universidad Federal de Paraiba, Brasil, 1978.

Burgers, Miss Lizeth. Temperature behavior in stabilization ponds under tropical conditions. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS)- Pan American Health Organization, Lima, Perú, 1982.

Montoya, Ana; Gattorno, Juan. Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa, 2018.

Orellana, Liliana. Estadística Descriptiva, 2011. Disponible en línea en: http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf. Consultado el 13 de agosto de 2018.

Sperling, M.V. Waste stabilization ponds. Biological wastewater treatment series, volume three, IWA Publishing, 2007.

Vargas, C.; Sánchez, A. Puesta en marcha y 1ra. etapa de experimentación en las lagunas de estabilización de Melipilla. Publicación I-24, Universidad de Chile, 1972.

Yanez, Cossio Fabián.; Pescod, M.B. Wastewater treatment and reuse in Jordan. UNDP/ World

Bank Integrated Resource Recovery Project.
Joint mission report, 1988.

y Recursos Hidráulicos (ERIS), de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Información del autor:

Ingeniera civil, Ana Sarai Montoya López, graduada de la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de Honduras, 2011. Maestra en Ciencias en Ingeniería Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria

Ingeniero civil, Adán Ernesto Pocasangre Collazos, graduado de la Universidad de San Carlos de Guatemala, maestro en ciencias en ingeniería sanitaria y profesor titular de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.