

Hydraulic parameters analysis in facultative ponds

Gerardo J. Aldana V.¹, Nibis Bracho¹ y Jesús Esteves²

¹Centro de Investigación del Agua. ²Instituto de Investigaciones Clínicas.
Universidad del Zulia, Apartado 15380, Delicias. Maracaibo, Venezuela.
E-mail: galdana@ica.luz.ve

Abstract

The main objective pursued in the present research was to determine the most important hydraulic parameters in a wastewater facultative pond. Several parameters, such as velocities, kinematic viscosity, density, Reynolds number and hydraulic flow were evaluated. The research was conducted in the University of Zulia and the samples were taken from a serie A facultative pond. The technique used was based on a tracer radioactive water triated [H^{+3}] by means of a stimulus response to adequate input. The samples were analyzed by a liquid sparkling spectrometric equipment. A total of 140 samples were taken at different points. Such points selected for taking the samples were the cross points of an imaginary grid traced for the conduction of the experiment. Each grid dimensions were 10 by 10 meters square. The experiment last was 22 days (twice the hydraulic theoretical retention time) with a flow rate of 5 l/s and the mean environmental temperature was 32°C. The following conclusions were derived: mean velocity of flow 0.38 m/h; mean density 1.140 kg/m³; kinematic viscosity $2,52 \times 10^{-4}$ m²/s, 30°C mean temperature and Reynolds number close 50. During this research the tracer concentration technique was verified as an efficient method for velocities measurements in comparison with physical methods existent, used for velocities lower than 1 m/h.

Key words: Hydraulic, velocity, Reynolds number, kinematic viscosity, wastewater facultative pond.

Análisis de los parámetros hidráulicos en una laguna facultativa

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue determinar los parámetros hidráulicos más importantes de una laguna facultativa. Los parámetros evaluados fueron: velocidad, viscosidad cinemática, densidad, número de Reynolds y régimen hidráulico. El estudio se desarrolló en las lagunas de estabilización de la Universidad del Zulia y se seleccionó la laguna facultativa de la serie A. La técnica que se empleó permite determinar las condiciones reales del flujo a través del uso de concentraciones de un trazador radioactivo (agua tritiada) utilizando una señal impulso. Las muestras fueron analizadas con un equipo de espectrometría de centelleo líquida para un total de 140 muestras, durante un tiempo seguido de 22 días para un caudal de 5 l/s y una temperatura ambiente promedio de 32°C. Los resultados de esta investigación arrojaron valores de velocidad promedio de 0,38 m/h; densidad promedio de 1.540 kg/m³; viscosidad cinemática de $2,52 \times 10^{-4}$ m²/seg, temperatura de 30°C y número de Reynolds cercano a 50. Se comprobó durante esta investigación que el método de las concentraciones resulta eficiente para medir valores bajos de velocidad en lagunas con respecto a los métodos físicos conocidos los cuales no permiten medir velocidades inferiores a 1 m/h.

Palabras clave: Hidráulica, velocidad, número de Reynolds, viscosidad cinemática, laguna facultativa.

Introducción

Las condiciones ambientales tales como: climatología, corriente de velocidad del viento y la temperatura, influyen en la obtención de una alta eficiencia en el agua tratada proveniente de lagunas facultativas.

Investigaciones recientes han encontrado que la eficiencia en los sistemas de lagunas depende notablemente de las condiciones climatológicas tales como: temperatura, luz solar, lluvia y el viento. En particular el viento cuya velocidad promedio es de 11 km/h para la ciudad de Maracaibo en la dirección noroeste, es mayor durante las tardes en comparación con las mañanas. Las corrientes generadas por el viento ejercen un efecto de movimiento en la masa de agua a nivel superficial ocasionando un flujo pistón durante la mañana, y en las tardes la mezcla que se logra por el efecto del viento es mayor en el interior de las lagunas [1].

Adicionalmente, la eficiencia de las lagunas facultativas puede estar afectada por el tipo de entradas y salidas: si están alineadas o no; el porcentaje de volúmenes muertos, volumen efectivo y flujos anómalos que generan interrupción de las líneas de flujo [2].

Es por ello, la importancia que tiene conocer los parámetros hidráulicos en el interior de las lagunas, tales como: velocidad del flujo, viscosidad cinemática, número de Reynolds y régimen hidráulico, así como también; se deben estudiar las propiedades físicas del fluido: temperatura, densidad y la turbidez. A fin de obtener criterios propios de la región para el diseño de lagunas facultativas, debido a que algunos criterios de diseño basados en estos parámetros obtienen áreas de lagunas que se ajustan al lugar de construcción, el cual no es aplicable a otros sitios, ya que los resultados obtenidos pueden variar apreciablemente [3].

El objetivo principal de esta investigación es determinar experimentalmente los parámetros hidráulicos más importantes, tales como: velocidad del flujo, densidad, viscosidad, número de Reynold, temperatura y turbidez; que rigen las condiciones del fluido en el interior de una laguna facultativa a fin de contribuir a la elaboración de diseños más acordes con las condiciones climatológicas de la región.

Parte Experimental

División del área superficial

El sistema de lagunas experimentales del centro de Investigación del Agua (C.I.A.) está conformado por tres series de lagunas (A, B y C), constituidas por facultativa - maduración - maduración. Este estudio fue realizado en la laguna facultativa (A1) de la serie A cuyas dimensiones son: 72,40m x 27,50m x 2,90m de profundidad y sección transversal trapezoidal ubicada en el campo de la Universidad del Zulia. Esta laguna facultativa es diferente en dimensiones a las otras 8 existentes, las dimensiones del resto de las lagunas están descritas en investigaciones previas [1].

Con el propósito de preparar un cronograma de toma de muestras en la investigación, se realizó una división cuadrangular del área superficial, las cuadrículas fueron divididas en un área de 10m x 10m, a fin de obtener puntos de muestreos con coordenadas fijas. Se tomaron muestras en la superficie a 0,40m por debajo del nivel de agua, en el medio 1, 10m y en el fondo a 2,00m de profundidad, según se observa en la Figura 1, a y b.

Cada uno de los puntos fueron accesados a través de un bote y una cuerda, la cual permitió mantener alineada y sin movimiento la embarcación a un punto de referencia con respecto a dos coordenadas. Una de las coordenadas fue tomada de la alineación de la cuerda, y la otra, directamente de la visual obtenida con un punto de referencia sobre la pared del talud frontal. El número total de puntos de medición para la laguna facultativa fueron 21.

Determinación de la concentración inicial del trazador

La técnica experimental utilizada fue mediante el uso de trazadores los cuales nos permiten determinar a través de concentraciones las condiciones reales del flujo en el interior de la laguna. Se utilizó un trazador radioactivo conocido como agua tritiada [H^+3], el cual fue determinado a partir de una concentración inicial de 25 mci/ml (25 milicurios/mililitro). El contenido de la sustancia del trazador se diluyó en el laboratorio en un volumen de agua de 6 ml y colocada en

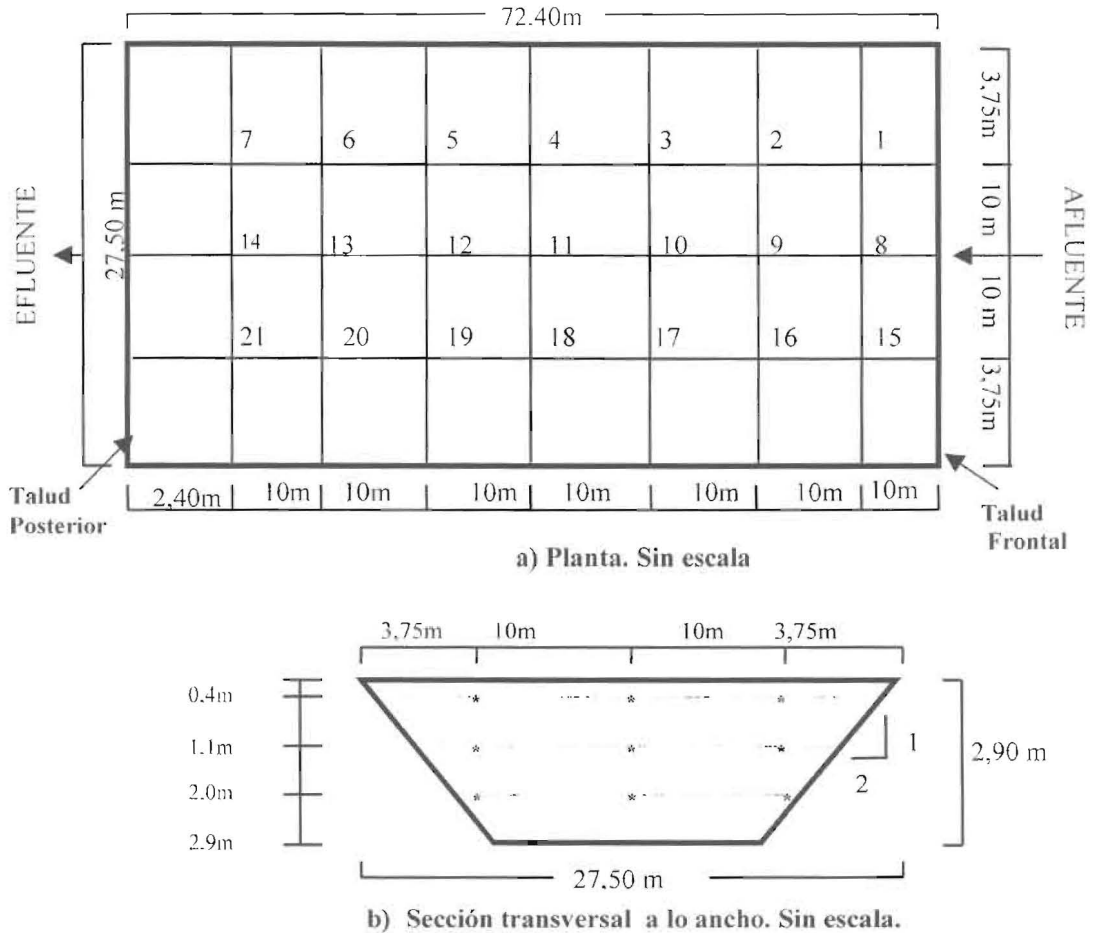


Figura 1. Laguna Facultativa de LUZ. Serie A.

un tambor de plomo para su posterior traslado hasta la laguna. Luego el trazador se vertió en la canaleta Parshall ubicada en el afluente de la laguna facultativa. La técnica utilizada en este ensayo está descrita detalladamente en investigaciones previas [1]. El volumen total efectivo de la laguna facultativa fue de 4.776 m³.

Antes de proceder a la inyección del trazador, previamente se calibró el equipo de espectrofotometría de centelleo líquida (contador Beta LKV, marca Wallak, modelo 1219) con una eficiencia típica de 63,5% para isótopos radioactivos [H³]. El líquido de centelleo utilizado fue gamma flúor. La calibración consistió en tomar muestras preliminares durante un lapso de un mes en la laguna, para determinar la línea base (background) de tritio existente. Se tomaron muestras continuas de superficie y fondo cada 24 horas.

Medición de parámetros físicos

El agua sin tratar se incorpora a la laguna facultativa A1 mediante una tubería proveniente de la estación de bombeo con un caudal de 5 L/s, seguidamente descarga en un canal rectangular donde se encuentra ubicada la unidad de medición de caudal (canaleta Parshall).

Teniendo en consideración que la composición del agua sin tratar que se incorpora en el interior de la laguna no es de una mezcla totalmente homogénea por lo ya señalado en la introducción es probable que existan diferentes densidades, debido a los cambios de concentración que presentan los sólidos y la temperatura [4].

Los valores de la densidad fueron calculados en base a la fórmula de Crowley [5] siguiente:

$$\rho = 0,9999 + (28,14 - 0,0735T^2) + (0,802 - 0,002T)(S - 35) \tag{1}$$

donde:

- ρ = densidad del agua (kg/m^3)
- T = temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)
- S = sólidos totales (mg/l).

Se tomaron valores de referencia de investigaciones realizadas para los valores de sólidos suspendidos totales (S) y temperatura (T) en los puntos (8,10,12,14,7 y 21) en la superficie (0,40m) y en los puntos (7,14 y 21) en el fondo (2,00m) de la laguna [6].

Con la finalidad de determinar la existencia de estratificación térmica en el cuerpo de agua, que pudiera afectar los resultados con el trazador inyectado, se midió la temperatura cada 10cm de profundidad en el interior de la laguna con un equipo portátil de campo para obtener un perfil de la variación de la temperatura.

Estas lecturas fueron medidas en tres sitios específicos: margen izquierdo, centro y margen derecho de la laguna.

Los valores de la turbidez fueron determinados por el método standard en el laboratorio, expresada mediante unidades de turbidez (U.T.).

Los valores de la velocidad del viento fueron tomados de la estación meteorológica del Instituto de la Facultad de Arquitectura (IFA) de la Universidad del Zulia, el cual se encuentra ubicado aproximadamente a 800m hacia el sur del sistema de lagunas. Los valores reportados fueron de 11km/h para la velocidad promedio del viento en una dirección predominante noreste 30° para la ciudad de Maracaibo.

Medición de parámetros hidráulicos

El fluido en lagunas de estabilización tiene una velocidad muy baja, no siendo detectable con los métodos físicos conocidos. Se requiere el uso de trazadores (colorantes, isótopos radioactivos, etc.), para su determinación a través de tomas de muestras y análisis de las concentraciones en cada punto de la laguna [7].

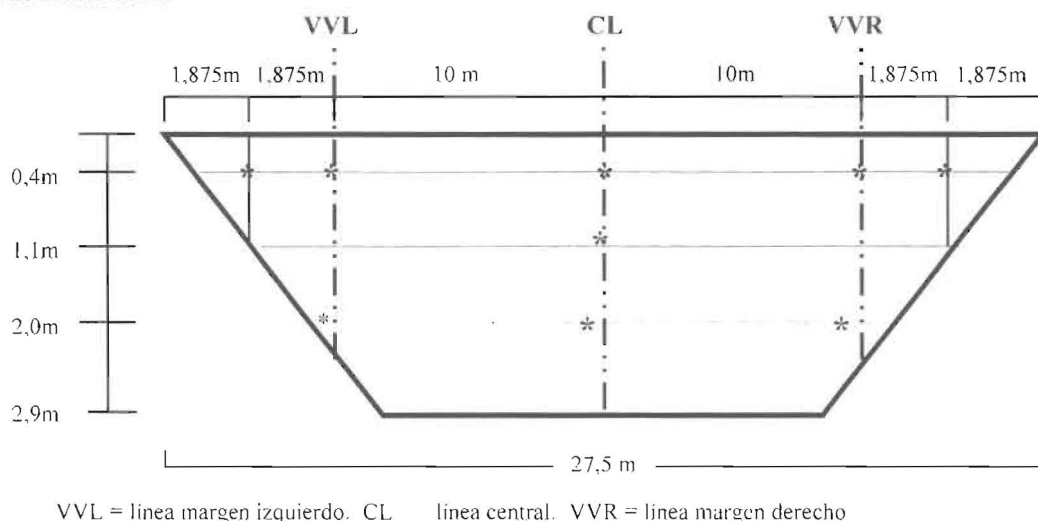
Las muestras fueron tomadas en los puntos de las coordenadas respectivas para las líneas ubicadas en la izquierda, media y derecha de la laguna a profundidades de 0,40m; 1,10m y 2,00m como se muestra en la Figura 2.

El cálculo de la velocidad de la referencia [8] se realizó mediante la fórmula siguiente de caudal descrita en el capítulo 7 de mediciones especiales en canales abiertos.

$$Q = \frac{F * Co * Vol. laguna}{(DPMi - DPMb)(ti - to)} \tag{2}$$

donde:

- Q = volumen por unidad de tiempo
- Co = concentración inicial de agua tritiada en destellos por minutos ($3,4 \times 10^{12}$ DPM)
- ti = tiempo cuando se ejecutó el muestreo
- to = tiempo inicial (0 horas)
- F = factor de calibración del equipo (0,45)
- DPMi = concentración en el punto de muestreo
- DPMb = concentración promedio del background (45 DMP) en la laguna



VVL = línea margen izquierdo. CL línea central. VVR = línea margen derecho

Figura 2. Vista de los puntos donde fueron tomados los valores de la concentración. Sin escala.

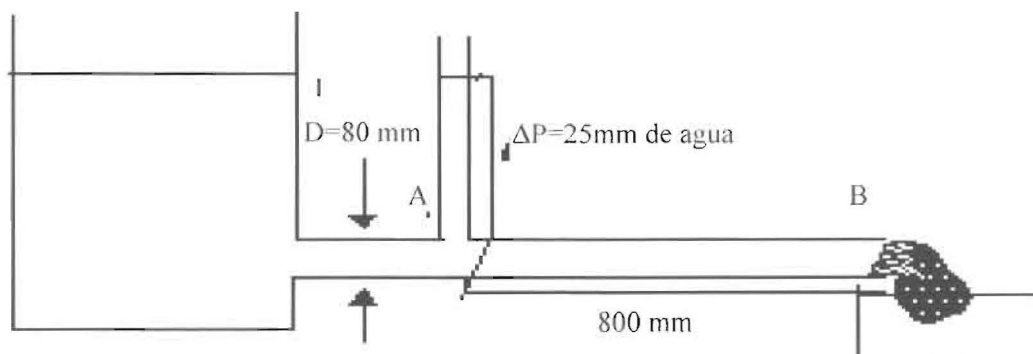


Figura 3. Tubo capilar para mediciones de viscosidad.

Vol laguna = volumen de la laguna facultativa
(4.776m³)

Una vez obtenido el caudal, el valor de la velocidad viene dado por el cociente del caudal entre el área transversal de la laguna. La ecuación utilizada para el cálculo del área transversal viene dada por el área de un trapecio:

$$A = \frac{(bm + BM)h}{2} \quad (3)$$

donde:

A = área transversal en la mitad de la sección de la laguna (71,00m²)

h = profundidad de la laguna (h = 2,90m)

BM = base mayor medida en la superficie de la laguna (27,50m)

bm = base menor medida en el fondo de la laguna (21,40m)

Los valores definitivos estimados de la velocidad se calcularon mediante el uso de dos métodos: 0,4 velocidad media (U) y el de dos dimensiones. El primero consiste en calcular un promedio entre los valores de la velocidad a profundidades de 0,40m, 1,10m y 2,00m, el equivalente a un 20%, 40% y 80% de la profundidad. Siendo el valor de la velocidad el valor promedio de las tres profundidades [7].

El segundo método consiste en graficar tres perfiles de velocidades tomando en cuenta el comportamiento de las concentraciones en las secciones longitudinales correspondientes a los puntos de las cuadrículas: 1,4,7; 8,11,14 y 15,18,21 según se aprecia en la Figura 1, a nivel de superficie y fondo; y también la cuadrícula (8,11 y 14) a nivel del medio.

El método empleado para medir la viscosidad fue el tubo capilar, el cual consistió en hacer pasar el fluido extraído de la laguna y refrigerado a 4°C a través de un tubo de 80mm de diámetro, similar a como se muestra en la Figura 3 [9]. El experimento se realizó a una temperatura de 20°C.

La viscosidad cinemática del fluido [9] viene dada por la fórmula siguiente descrita en el capítulo 17 métodos de medición del texto en referencia:

$$\gamma = \frac{\pi * D^4 * \Delta P * g}{128 * q * L} \quad (4)$$

donde:

π = constante (3,1416)

γ = viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

D = diámetro de la tubería (8 x 10⁻²m)

g = constante de la gravedad (9,81 m/s²)

L = longitud de la tubería (0,80m)

q = caudal que circula por unidad de tiempo (0,00163 m³/s)

Δp = presión medida en el manómetro punto A (25 x 10⁻³m)

El número de Reynolds [3] se calculó por la siguiente fórmula:

$$Re = \left(\frac{4 * L * W * Z}{W + 2 * Z} \right) * \frac{1}{\theta * \gamma} \quad (5)$$

donde:

L = longitud de la laguna (72,40m)

W = ancho de la laguna (27,50m)

Z = profundidad de la laguna (2,90m)

γ = viscosidad cinemática calculada por la fórmula (4) (2,52x10⁻⁴ m²/seg)

θ = tiempo de ejecución del ensayo (4 días).

Metodología utilizada para la toma y análisis de muestras

- La metodología empleada durante la investigación fue la siguiente:
- Ubicación de los puntos de coordenadas en el interior de la laguna.
- Inyección del trazador previamente preparado en la canaleta Parshall del afluente de la laguna facultativa A1.
- Toma de muestras en la superficie y fondo según el horario de muestreo estipulado.
- Almacenamiento de las muestras en bolsas debidamente identificadas y colocadas en un depósito para su protección.
- Traslado de las muestras por grupo de 10 bolsas hasta el laboratorio que contenía el equipo.
- Preparación de las muestras con el reactivo gamma flúor (8ml) con una pipeta precisa

en viales plásticos de 10ml agregándole 2ml de muestra.

- Identificación de los viales, indicando: número de muestra, fecha y lugar.
- Lectura de los viales en el equipo de espectrometría de centelleo líquida.

Resultados y Discusión

Parámetros físicos

Los valores de la temperatura del agua varían con la profundidad en el interior de las lagunas, según se aprecia en la Figura 4. Se observó en la Figura 4 que existe una variación gradual térmica en los primeros 30 cm de profundidad variando la temperatura aproximadamente 2 a 3°C. Los valores de la densidad presentaron variación con respecto a la temperatura a nivel de la superficie y el fondo, oscilando en un rango de 1.102,3 a 1.198,4 kg/m³ en la superficie y 1.083 a 1.320 para el fondo (Figura 5).

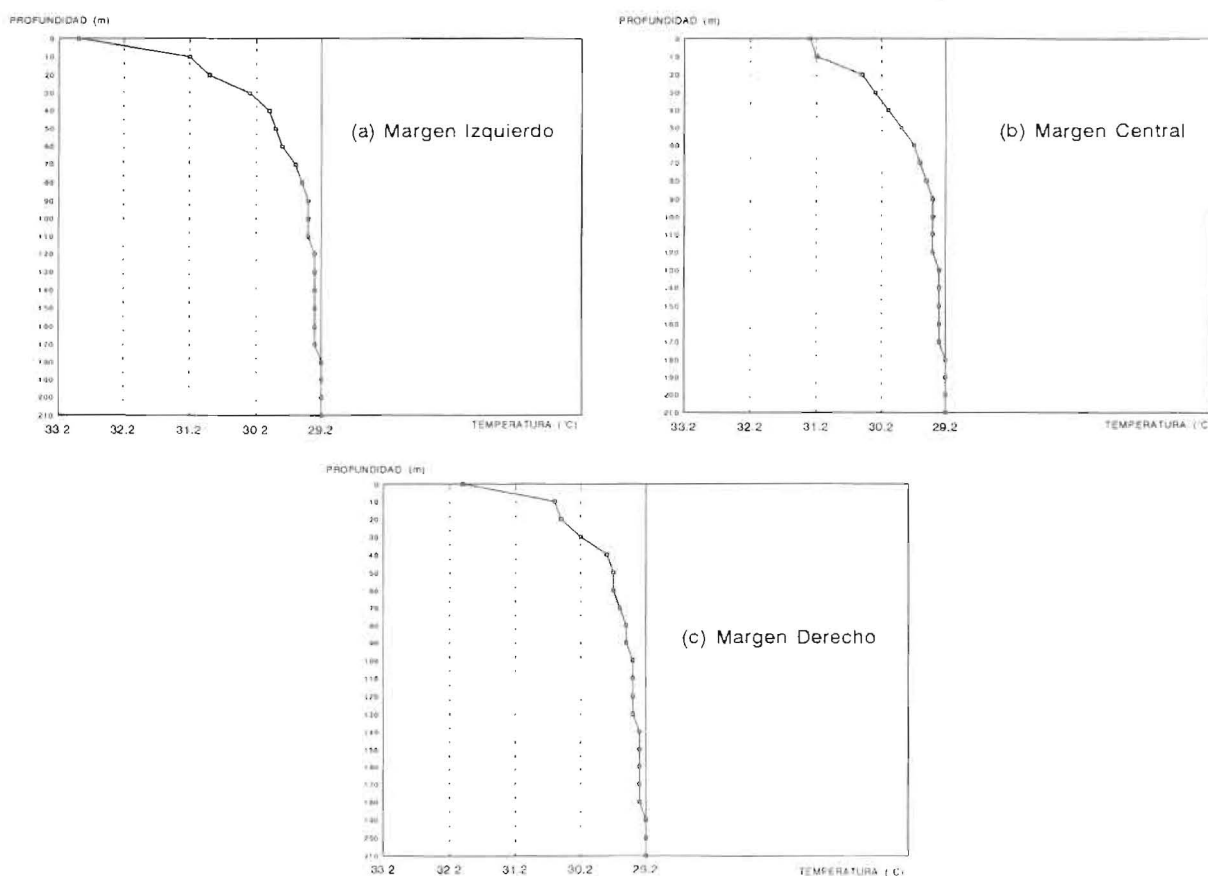


Figura 4. Medición de temperatura.

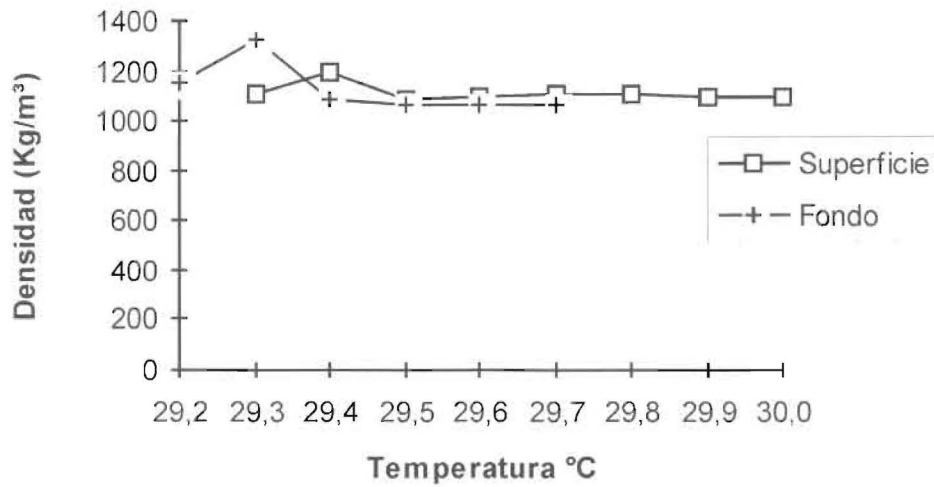


Figura 5. Variación de la densidad con respecto a la temperatura.

Tabla 1
Valores de la Velocidad (m/h). Método 0.40 U (4 días después de inyectado el trazador)

Pto	VVR (0,4m) 20%	CL Pto (0,40m) 20%	VVL Pto (0,40m) 20%	VVR Pto (2m) 80%	CL Pto (2m) 80%	VVL Pto (2m) 80%	CL Pto (1,1m) 40%
S1	0,50	S8 0,37	S15 0,44	F1 0,42	F8 0,32	F15 0,30	M8 0,39
S2	0,20	S9 0,24	S16 0,51	F2 0,30	F9 0,12	F16 0,26	M9 0,45
S3	0,61	S10 0,28	S17 0,34	F3 0,37	F10 0,40	F17 0,30	M10 0,39
S4	0,43	S11 0,32	S18 0,41	F4 0,55	F11 0,38	F18 0,42	M11 0,41
S5	0,32	S12 0,27	S19 0,49	F5 0,28	F12 0,34	F19 0,39	M12 0,52
S6	0,24	S13 0,28	S20 0,32	F6 0,37	F13 0,33	F20 0,36	M13 0,35
S7	0,40	S14 0,34	S21 0,32	F7 0,23	F14 0,04	F21 0,32	M14 0,29
Med	0,38	0,30	0,40	0,36	0,32	0,34	0,40

Valor promedio total 0,36 Superficie. 0,37 por día. 0,34 Fondo. 0,40 Centro.

Los valores de la densidad tienden a ser más constantes en la superficie (0,80m) por debajo del nivel de agua, manteniéndose el valor promedio alrededor de 1.150 kg/m^3 , con respecto a los valores en el fondo donde las fluctuaciones son mayores, alcanzando un promedio alrededor de 1.200 kg/m^3 . Esto pone en evidencia que existen dos capas de flujo, una a nivel de la superficie y otra a nivel del fondo, donde son depositados los hidrocarburos con una concentración aproximada de 13 mg/L (muestra puntual medida en sitio) los cuales producen incremento en la densidad.

La variación térmica que se observa a nivel de la superficie entre los primeros 30 cm, se debe a la diferencia entre las temperaturas promedios

de la atmósfera (32°C) y la del agua de la laguna ($29,4^\circ\text{C}$). Este fenómeno de variación gradual de temperatura produce una zona activa que comprime el agua entre la superficie y una capa de 30 cms de profundidad de la laguna. Aunado a ello, contribuye los tipos de entradas y salidas del sistema, entre las cuales existe una diferencia de altura de 40 cm por debajo del nivel de la superficie; es decir, se represa una lámina de agua con este espesor. Esto pone en evidencia que sólo en esta zona exista un tipo de flujo pistón que conduce a un movimiento de flujo superficial, permitiendo sólo la renovación de cierto volumen de agua en relación al volumen total de la laguna lo cual ha sido reportado por otros investigadores en España [10].

Tabla 2
Valores de la Velocidad (m/h). Método 0.40 U (9 días después de inyectado el trazador)

	VVR	CL	VVL	VVR	CL	VVL	CL
Pto	(0.4 m)	Pto	(0,40m)	Pto	(0,40m)	Pto	(2 m)
	20%		20%		20%		80%
S1	0,10	S8	0,15	S15	0,10	F1	0,12
S2	0,12	S9	0,15	S16	0,12	F2	0,12
S3	0,10	S10	0,11	S17	0,13	F3	0,10
S4	0,18	S11	0,13	S18	0,12	F4	0,13
S5	0,17	S12	0,12	S19	0,13	F5	0,17
S6	0,11	S13	0,10	S20	0,06	F6	0,11
S7	0,18	S14	0,13	S21	0,09	F7	0,10
Med	0,14		0,13		0,12		0,12

Valor promedio total 0,13 Superficie. 0,13 por dia. 0,12 Fondo. 0,14 Centro.

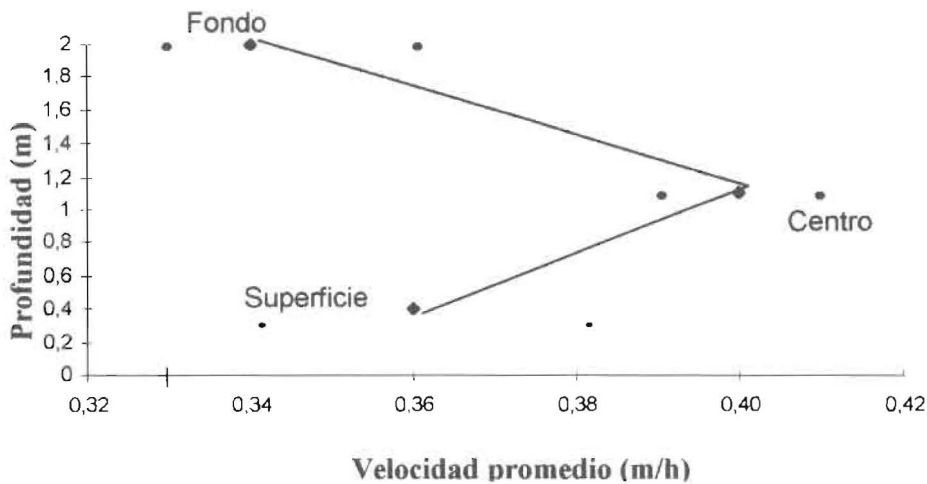


Figura 6. Variación de la velocidad en todos los puntos del interior de la laguna. Método 0,4 U.

Los valores obtenidos para la velocidad se indican en las Tablas 1 y 2 a 4 días y 9 días después de haber sido inyectado el trazador, recolectadas y analizadas las muestras según la metodología descrita. En estas tablas se observan los valores promedios calculados utilizando el método de 0,40 U. Se observó que para la superficie (0,40m) los valores son mayores en los extremos, variando desde 0,40m/h para el margen izquierdo a 0,38m/h para el margen derecho; en el centro el valor fue menor de 0,30m/h. El valor promedio total en la superficie de la velocidad fue de 0,36 m/h.

A una profundidad de 1,10m, el valor promedio total de la velocidad resultó ser de

0,40m/h en el centro, siendo esta velocidad obtenida la máxima durante la investigación.

En el fondo la velocidad promedio varió desde 0,34m/h (margen izquierdo) hasta 0,36m/h (margen derecho), siendo la velocidad promedio del fondo para el centro de 0,32m/h. El valor promedio total de la velocidad en el fondo fue de 0,34m/h.

Con este método los valores indican que la velocidad del fluido en la superficie es ligeramente mayor con respecto a la del fondo, así como también la velocidad promedio de la laguna, o sea, en el perfil central (1,10m), es superior (0,40m/h) que la obtenida en los márgenes izquierdos y derechos (Tabla 1). La tendencia del

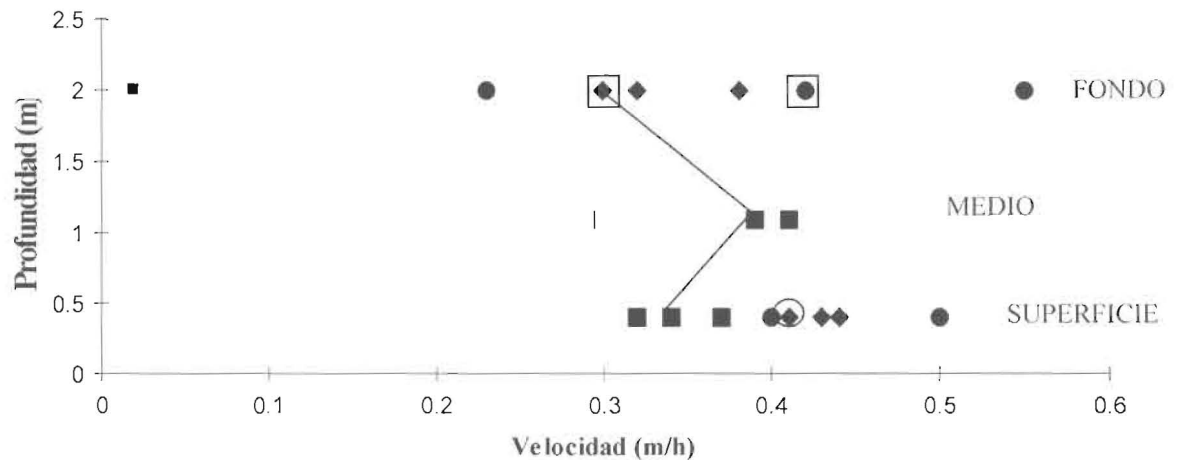


Figura 7. Variación de la velocidad longitudinalmente. Método 2D.

● Puntos 1, 4 y 7 (margen derecha); ■ Puntos 8, 11 y 14 (centro);
 ◆ Puntos 15, 18 y 21 (margen izquierda); ◼ Puntos superpuestos.

fluido se observa en la Figura 6, considerando las velocidades promedio en la laguna. El cálculo de la velocidad promedio estimada (U') con este método en la laguna según la referencia [7] viene dado por: 20% (0,36m/h); 40% (0,40m/h) y 80% (0,34m/h).

$$U = (0,36 + 0,34)/2 = 0,35\text{m/h}$$

$$U' = (0,35 + 0,40)/2 = 0,38\text{m/h}$$

En la Figura 7 se observa la variación de la velocidad longitudinalmente obtenidos con el método de cálculo de la velocidad de 2D, notándose similitud con respecto al método de $0,40 U$ para la variación de la velocidad longitudinalmente en la línea del centro, puntos (8, 11 y 14). En las margen derecha e izquierda no se midió la velocidad en el medio por lo tanto no se representa la variación en la Figura 7. El comportamiento hidráulico de la velocidad para canales trapezoidales abiertos debe ser equivalente a la sección transversal de una laguna facultativa; en este estudio se demuestra que el valor de la velocidad en el centro es mayor en relación con la de superficie y fondo, manteniéndose la similitud hidráulica entre una laguna facultativa y un canal trapezoidal.

La temperatura ambiente varió en un rango (30-33°C) durante el experimento. Tanto la temperatura como la radiación solar aumentan la temperatura en la superficie del agua, este incremento induce a que las corrientes de densidades se formen, debido al cambio de temperatura existente entre el fluido que ingresa a la laguna cuya

temperatura es mayor (34°C) y el coexistente en el cuerpo de agua. A nivel del fondo la velocidad tiende a disminuir un poco por la disminución de la temperatura (29°C), pero como las densidades se incrementan, existe tendencia a que se formen zonas en la masa de agua, con corrientes de densidades que inducen a mover el fluido hacia la superficie [10]. Este fenómeno produce flujo anómalo generando recirculación del fluido desde el fondo hacia la capa comprimida de la superficie ya mencionada incrementando la velocidad hasta un valor teórico infinito (superior a 0,40m/h) lo que crea interrupción de las líneas de flujo en la zona [1].

Estudios realizados por Harleman en recipientes abiertos de 3m de profundidad y 3 horas de tiempo de sedimentación, demostraron que la velocidad del flujo se podría ver afectada por la turbidez del fluido. Produciendo un cambio en la velocidad debido a la corrientes de densidades la cual podría mover el fluido desde la entrada hasta la salida incrementando de 1 a 10 veces el tiempo de retención nominal, con el agravante de producir deposición de lodos [11].

Esta velocidad [11] que se imprime al fluido debido a la corriente de densidad (\bar{u}) puede ser calculada por la fórmula de Harleman:

$$\bar{u} = \sqrt{8 * g * \frac{\Delta\rho * h * S}{\rho * f * (1 + \alpha)}} \quad (6)$$

donde:

- g = constante de la gravedad (m/s^2)
- $\Delta\rho$ = variación de la densidad entre la superficie y el fondo (kg/m^3)
- ρ = densidad promedio de la laguna facultativa (kg/m^3)
- h = diferencia de altura entre la superficie y fondo (m)
- $h = 2,90$ m. Valor tomado del promedio entre las profundidades de entrada (2,70 m) y el de salida (3,10m) de la laguna
- S = pendiente longitudinal del fondo de la laguna (5,33%)
- f = factor de fricción de la laguna. Calculado por la fórmula de Blasius
- $f = 0,12$; según fórmula: $0,316/Re^{0,25}$
- Re = número de Reynolds (calculada por la ecuación 5)
- α = coeficiente para canales abierto = cero
- \bar{u} = velocidad del fluido debido a densidad de corriente (m/h)

El valor calculado por la velocidad del fluido debido a corriente de densidad ($\bar{u}=0,83m/h$) demuestra lo ya planteado, siendo la magnitud de \bar{u} aproximadamente el doble de la velocidad promedio del fluido ($v=0,38m/h$). Esto es un análisis teórico de lo que posiblemente ocurre en la laguna,

debido a que la determinación de las corrientes de densidades experimentalmente implicaría un estudio termodinámico de la hidrodinámica de la masa de agua lo cual no es objetivo de este estudio.

La velocidad del viento de 11km/h es mayor en las tarde en comparación con las mañanas. Esta disminución de la corriente de la velocidad del viento durante las mañanas ocasiona un efecto de baja dispersión en la hidráulica del fluido [1], aumentando la concentración del trazador, y a la vez genera un flujo tipo pistón que favorece el mecanismo de movimiento de la masa de agua en las direcciones longitudinal y transversal. En la Figura 8 se aprecia un esquema de cómo varía hidráulicamente la concentración de fluido para el caso de la utilización de un trazador. Por las tardes se genera una mezcla completa principalmente en el fondo, se aprecia en la Figura 9, ocasionada por el efecto de mayor dispersión y mezcla creada por la formación de un epicentro (lugar donde las concentraciones son máximas) ubicada aproximadamente en el centro de las lagunas, produciendo variaciones en las concentraciones del trazador, incremento o disminución en las márgenes derecha e izquierda [1].

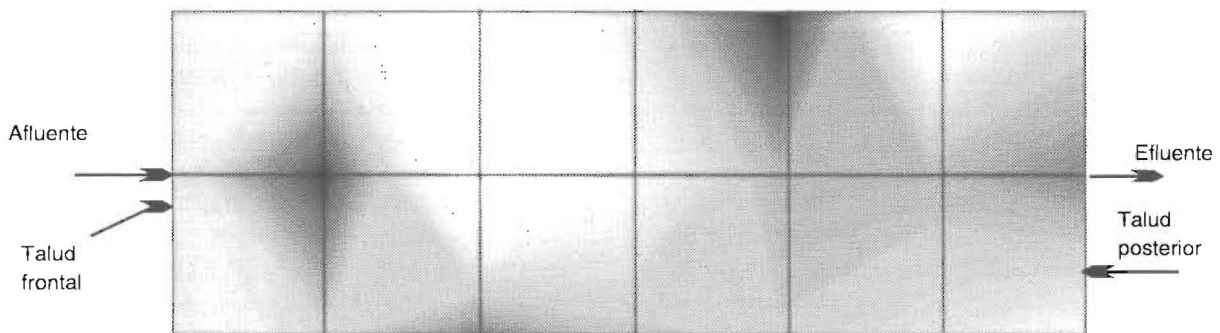


Figura 8. Variación de la concentración en la superficie de la laguna facultativa utilizando un trazador.

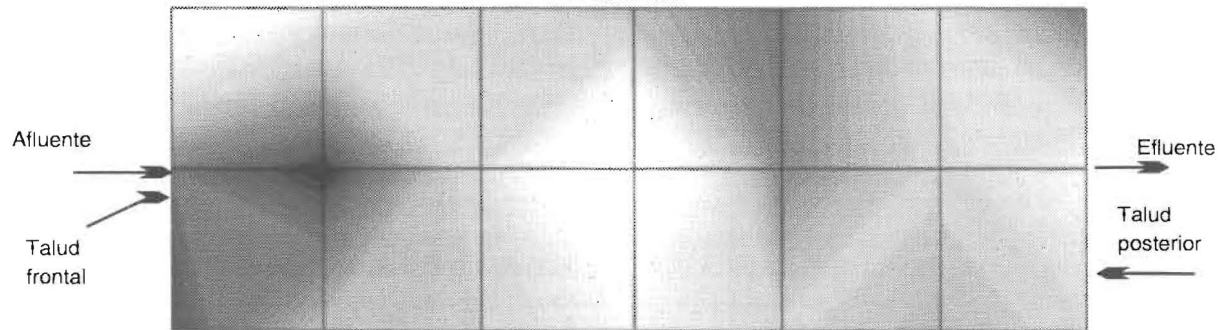


Figura 9. Variación de la concentración en el fondo de la laguna facultativa utilizando un trazador.

Tabla 3
Valores del Número de Reynolds

θ (horas)	LUZ, Venezuela	Thailandia, Asia	Corime, USA
4	189,00	23,6	355,4
8	94,43	19,2	-
16	47,21	18,7	-
24	31,48	14,5	313,7
48	15,74	12,2	-
72	10,49	11,3	288,5
120	7,87	10,5	-
124	6,30	10,2	252,7
168	6,09	10,1	222,9
192	4,50	9,5	170,1
216	3,93	9,4	-
240	3,50	9,8	-
264	3,16	8,7	-
Prom	30,47	12,9	267,22

Los espacios en blanco indican valores no reportados.

El número de Reynolds se determinó por la ecuación 5 y los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3, comparándolo con valores obtenidos en países tales como: Asia (Bangkok, Tailandia) y Estados Unidos (Corime, Utah) [3], cuyas lagunas operan en un clima diferente al estudiado, siendo la temperatura de esos países mucho menor con respecto al trópico. Según se observan los valores en la tabla, el número de Reynolds para lagunas facultativas está por debajo de 500, en el caso particular de las lagunas de LUZ está por debajo de 50, coincidiendo éste con el valor de las lagunas de Utah, USA.

El régimen hidráulico de las lagunas facultativas corresponde a régimen sub-laminar debido a que el número de Reynolds está muy por debajo de 2.000, siendo éste el valor límite máximo para el régimen laminar, utilizando como referencia los estudios realizados en tuberías, debido a que no existe en la literatura estudios previos que realicen una clasificación del régimen hidráulico en lagunas facultativas.

Conclusiones

En esta investigación se comprobó que la dinámica del flujo en la laguna facultativa duran-

te 22 días que duró el ensayo está condicionada por los siguientes factores climatológicos: (1) temperatura, tanto la del ambiente como la interna del agua, siendo la diferencia entre ellas aproximadamente 3°C. (2) La radiación solar, que produce una variación térmica en la superficie de la laguna en los primeros 30cm, originando cambios en las densidades del agua, aumento de la velocidad debido a corriente de densidad y (3) viento que genera un movimiento debido al efecto cortante producido por la corriente de la velocidad del viento (11km/h) en la superficie de la laguna.

El método de las concentraciones utilizando un trazador radioactivo es adecuado para determinar velocidades muy bajas menores a 1m/h, específicamente en el caso de lagunas de estabilización donde la velocidad promedio obtenida fue de 0,38m/h en comparación a los métodos físicos ya conocidos, tales como: objetos flotantes (bolitas de poliestireno) que detectan la velocidad para valores superiores a 1m/h.

La viscosidad cinemática obtenida fue de $2,52 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ para aguas residuales municipales en el interior de la laguna, la cual es ligeramente superior a la del agua potable equivalente a $0,804 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ a 29°C.

El régimen hidráulico predominante en la laguna fue el sub-laminar, con un número de Reynolds inferior a 50, coincidiendo con valores obtenidos en lagunas de Utah, USA y Thailandia, Asia. En este estudio se demuestra que la velocidad en las lagunas facultativas es mayor en el centro en relación a la superficie y el fondo, manteniendo similitud con el comportamiento hidráulico de la velocidad en los canales trapezoidales.

La acción de la corriente inducida por el viento influye directamente sobre las variables dinámicas de la laguna, en la hidráulica condicionando patrones de flujo bien diferenciados tales como pistón o mezcla completa de acuerdo al incremento o disminución de la corriente inducida por el viento. El movimiento de la masa de agua está influenciado por esta corriente desplazándose la masa uniformemente a diferentes velocidades desde el centro hacia las márgenes derecha e izquierda a nivel de la superficie, medio y fondo [1].

Referencias Bibliográficas

1. Aldana, G.; Aiello, C.; Morán, M. y Jeréz, O. "Mecanismos de las variables dinámicas en la remoción de metales pesados en una laguna facultativa". Revista Técnica de Ingeniería. Universidad del Zulia. Vol. 21, N° 1 (1998), 10-19.
2. Moreno, M. "A trace study of the hydraulics of facultative stabilization ponds". Water Research, Vol. 24, N° 8 (1990), 1025-1030.
3. Polprasert, Ch.; Bhattarai, K. "Dispersion model for waste stabilization ponds". Journal of Environmental Engineering, Vol. 111, N° 1 (1985), 45-59.
4. Thoman, R.V. and Mueller, J. "Principles of surface water quality modeling and control". Harper Collins Publishers Inc. (1987), 101-103.
5. Crowley, W.P. "A global numerical ocean model". Part. 1, J. Comp. Phys. 3 (1968), 111-147.
6. Bracho, N. "Influencia de la hidrodinámica del fluido en la eficiencia de lagunas de estabilización". Trabajo de Ascenso. Centro de Investigación del Agua, LUZ (1997), 45-60.
7. Marsh Mc Birney Inc. "Calculation flow water measurement manual". Sections I and II. Metropolitan Court, Maryland (1993), 1-4, 1-5.
8. United States Department of Interior. Water Measurement Manual". Bureau of Reclamation. A Water resources Technical Publication. Second Edition (1984), 165-167.
9. Shames, Y. "Mecánica de los fluidos". Edic. Mc Graw Hill (1995), 1045.
10. Torres, J.J.; Soler, A.; Sáez, J.; and Ortuño, F. "Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond". Water Resource. Vol. 31, N° 4 (1997) 679-688.
11. Harleman, D.F. "Gratified flow in hand book of fluid mechanics". V Streeter of New York. Edic. Mc Graw Hill. (1961).

Recibido el 27 de Julio de 1998

En forma revisada el 25 de Febrero de 1999