

Dynamics variables phenomenon in the removal efficiency of heavy metals in facultative pond

Gerardo J. Aldana¹, Cateryna Aiello, Milmero Morán and Oswaldo Jérez

¹Centro de Investigación del Agua. E-mail: galdana@ica.luz.ve
Laboratorio de Química Analítica, Departamento de Química, Facultad de Ingeniería
Apartado 15.380, Delicias, Maracaibo, Venezuela

Abstract

The purpose of this paper is to determine the removal efficiency of heavy metals in Facultative Ponds. Several variables such as: wind currents, temperature, pH, flowrate and photosynthesis influenced the research. These variables were taken into account to evaluate removal efficiencies for Copper, Zinc, Chromium and Iron, at different depths in pond. The research was conducted in a series of Stabilization Ponds located in the main campus of the Universidad del Zulia (L.U.Z.). The results point out to the fact that pond's performance influencing removal efficiency was almost similar for the four cations under inquire at depth of 0,40 m. Concentrations appeared higher near the surface compared to those close to the bottom of 2.00 m. Diurnal variations in flowrate affected measured concentration for metals probably due to wind currents which tend to increase concentration values at top level. Removal percentages were: 100% for Copper; 90% for Zinc; 75% for Chromium and, 64% for iron. Concentrations for the four cations were obtained by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).

Key words: Heavy metal, removal efficiency, stabilization pond.

Mecanismos de las variables dinámicas en la remoción de metales pesados en una laguna facultativa

Resumen

El propósito del siguiente trabajo es determinar la eficiencia de remoción de metales pesados en lagunas facultativa. Varias variables tales como: corriente de la velocidad del viento, temperatura, pH, caudal y la fotosíntesis tienen influencia directa sobre la eficiencia de remoción de metales pesados. Diferentes muestras fueron tomadas en el interior de la laguna para evaluar la eficiencia del cobre, zinc, plomo y hierro a diferentes profundidades. El estudio fue conducido en una serie de la laguna de estabilización de la Universidad del Zulia (L.U.Z.) localizada en los terrenos de la Facultad de Humanidades. Los resultados indicaron que la eficiencia de remoción de los cuatro cationes analizados es casi similar a profundidades de 0.40 m. Las concentraciones son mayores cerca de la superficie comparado a los resultados obtenidos en el fondo (2.00 m). Las variaciones diurnas del flujo afectaron las medidas de concentración de los metales, probablemente debido a las corrientes de velocidad del viento las cuales tienden a incrementar los valores de concentración a nivel de la superficie. Los porcentajes de remoción fueron: 100% para el cobre; 90% para el zinc; 75% para el cromo y 64% para el hierro. Las concentraciones para los cuatro cationes fueron obtenidas por espectrofotometría de absorción atómica.

Palabras clave: Metales pesados, eficiencia de remoción, laguna de estabilización.

Introducción

La presencia de metales pesados en lagunas facultativas está condicionada a la acción directa de variables dinámicas interactuantes en el flujo, tales como: físicas, biológicas, químicas, bacteriológicas, hidráulicas y meteorológicas.

Estudios recientes han demostrado que parte de los metales están presente en el sobrenadante, otra se absorbe por el fitoplancton y el resto se precipita hacia los sedimentos [1]. Al cuantificar cada uno de estos valores, la mayor concentración de metales se encuentra en el sedimento del fondo, por la precipitación de los sólidos suspendidos solubles e insolubles presentes en el agua y por el efecto que se ejerce sobre la laguna como recipiente [2].

Debido a las variables dinámicas la concentración de algunos metales se reduce principalmente debido a los procesos de solubilización y precipitación generalmente relacionados con el pH, la alcalinidad total, las características hidráulicas del flujo y la precipitación pluviométrica [1].

Gran parte de las microalgas poseen una compleja estructura química constituida por polisacáridos y sales, estos elementos se hallan es-

tabilizados en la superficie de las algas, por lo que no favorecen el intercambio iónico con los metales. Las sales de sodio, calcio y magnesio fijadas a la biomasa no compiten con los metales pesados presentes en las algas; sin embargo, afectan la capacidad de remoción de los metales ocasionada por el desequilibrio de las diferentes soluciones [3].

El presente trabajo se propone comprobar como influyen las variables dinámicas en la remoción de metales pesados (Cu, Zn, Cr y Fe) a diferentes profundidades de una laguna facultativa. El estudio se realizó en el sistema de lagunas de la Universidad del Zulia constituido por tres series de lagunas cada una conformadas por facultativa - maduración - maduración, las dimensiones se indican en la Tabla 1. En el momento de realizar la investigación sólo se encontraba en funcionamiento la serie A.

Parte Experimental

Las muestras fueron tomadas en catorce puntos de la laguna A1 facultativa, como se indica en la Figura 1. Las dos estaciones de muestreo se ubicaron: uno en la entrada en el interior de la canaleta Parshall y el otro, a la salida de la lagu-

Tabla 1
Dimensiones de las lagunas LUZ

Serie	Laguna Facultativa			Laguna Maduración		
	A	B	C	A	B	C
Número	1	1	1	2	2	2
Superficie (m ²)	2.250	2.460	2.700	1.771	1.771	1.771
Espejo de Agua	1.935	2.238	2.433	1.515	1.515	1.515
Pendiente Longitudinal (%)	5.33	4.9	4.5	6.0	6.0	6.0
Pendiente Transversal (H/V)	1:2	1:2	1:2	1:2	1:2	1:2
Superficie de Fondo (m ²)	1.368	1.646	1.760	1.200	1.200	1.200
Profundidad Promedio (m)	2.90	2.90	2.90	1.50	1.50	1.50
Volumen (m ³)	4.940	5.914	6.420	2.115	2.115	2.115
Volumen Efectivo (m ³)	4.776			2.032	2.032	2.032
Caudal (l/s)	5.0	5.0	5.0	3.0	3.0	3.0
Tiempo Hidráulico Teórico (días)	11.0	13.70	14.90	7.87	7.87	7.87

Nota: Los espacios en blanco indican información por determinar.

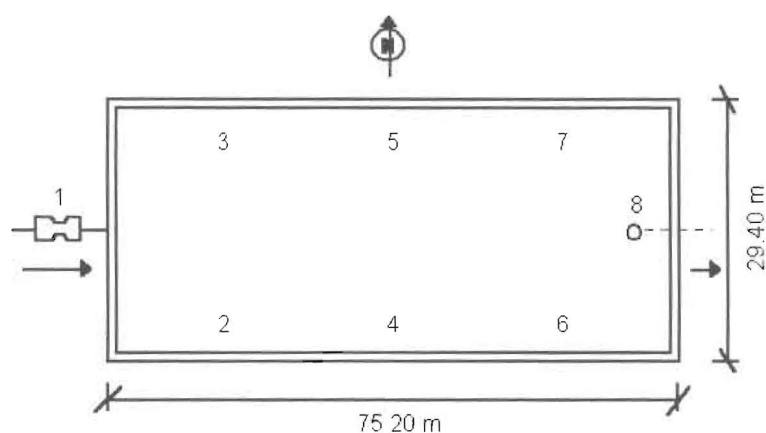


Figura 1. Puntos de muestreo laguna facultativa A1. LUZ.

Tabla 2
Campaña de Muestreo (1994)

Número	Fecha
1	21 - 09
2	29 - 09
3	07 - 10
4	15 - 10
5	23 - 10
6	31 - 10
7	08 - 11
8	08 - 12

na, en el vertedero circular. El resto de los puntos fueron tomados distantes uno del otro y de igual forma de los bordes en los taludes; seis de los puntos fueron tomados en la superficie (0.40m debajo del nivel de agua) y otra cantidad igual a 2 m de profundidad.

Antes de seleccionar un programa de muestras definitivo se efectuaron muestreos preliminares cada dos horas para determinar los aspectos siguientes:

- las variaciones de las concentraciones base en los metales,
- observar el cambio en la concentración de un punto a otro y,
- el horario adecuado para la captación de muestras. El muestreo preliminar se ejecutó en veinte puntos de la laguna, observándose que los puntos ubicados en el centro de la laguna no reportaron ningún cambio

en la concentración en relación con los puntos ubicados en los extremos a nivel superficial y profundo.

Los horarios seleccionados para la captación definitiva de muestras fueron; 7:00 am y 7:00 pm, debido a que para éstas se observó la mayor variación en la concentración de los cationes metálicos.

La etapa de muestreo se realizó bajo condiciones de caudal constante y se practicaron muestreos puntuales. Las muestras fueron tomadas cada 8 días durante 7 semanas. La octava semana se tomó un mes después debido a los cambios involuntarios ocurridos en el normal funcionamiento de las lagunas. Las fechas de las campañas de muestreo son indicadas en la Tabla 2.

Las muestras tomadas en la entrada y salida de la laguna (Nos. 1 y 8) se realizaron con muestreador manual, el cual consiste de una vara de madera de aproximadamente 2m de largo, con un recipiente plástico en uno de sus extremos fijo por medio de remaches y recubierto con silicona para evitar la posible contaminación del metal.

Las muestras tomadas en el interior de la laguna a una profundidad de 0.40 m. (Nos: 2, 3, 4, 5, 6 y 7) y a 2.00m de profundidad (Nos: 2', 3', 4', 5', 6' y 7'), fueron recolectadas con un muestreador del tipo Van Dorn con la ayuda de un pequeño bote para poder acceder los puntos de muestreo.

Una vez recolectadas todas las muestras se llevaron inmediatamente al laboratorio y se de-

terminó el pH. De los resultados obtenidos para los valores de pH en los diferentes muestreos se observó que existe poca fluctuación y en general oscila entre pH suavemente ácido hasta ligeramente básico (6,5-8,5); adicionalmente se encontraron valores de pH neutro. Las muestras fueron analizadas por duplicado, preconcentradas y comparadas con un patrón, su preparación se realizó de acuerdo con la técnica descrita en los métodos normales [4]. El equipo utilizado para determinar las concentraciones de los metales fue un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Varian Spectrt 10/20. Los límites de detección fueron 0.003 µg/ml y 0.002 µg/ml, 0.004 µg/ml y 0.005 µg/ml para el Cu, Zn, Cr y Fe, respectivamente. El rango de trabajo y la longitud de onda utilizada fueron: 2.0 - 8.0, 328.8 nm; 0.4 - 1.6; 213.9 nm; 2.0 - 8.0, 357.9 nm y 2.5 - 10, 248.31 nm, para el Cu, Zn, Cr y Fe respectivamente.

Las condiciones meteorológicas no se midieron directamente en el sitio, sino que se tomaron de lecturas promedio de la estación Maracaibo-LUZ ubicada en el modelo hidráulico cerca del sistema. [5] La velocidad media del viento para los meses de Septiembre - Diciembre fue de 11,00 Km/h, medidos a una altura de 1,50 m sobre el

nivel del terreno con una dirección prevaleciente noreste en las mañanas y noroeste por las tardes.

La temperatura del agua se midió con un equipo portátil, el cual estuvo constituido por un cordón de 3m de longitud a fin de alcanzar la profundidad máxima de la laguna. Las mediciones fueron realizadas a intervalos de 10 cm, en horas de la mañana y en el medio de la laguna en la noche. En la Figura 2 se observa el perfil de temperatura.

De la misma forma, fue medido e oxígeno disuelto en el agua, durante la mañana y en la noche, pero considerando las medidas en el margen izquierdo y derecho de la laguna. En la Figura 3 se observa el perfil de oxígeno disuelto en el interior de la laguna.

Discusión de Resultados

Los valores de temperatura en la laguna no mostraron variaciones, permaneciendo constante el gradiente desde la superficie hasta el fondo (2,90 m) a 28 grados centígrados, esto pone en evidencia las condiciones favorables que se logran en la laguna como un reactor isotérmico para la ejecución de procesos químicos y biológicos.

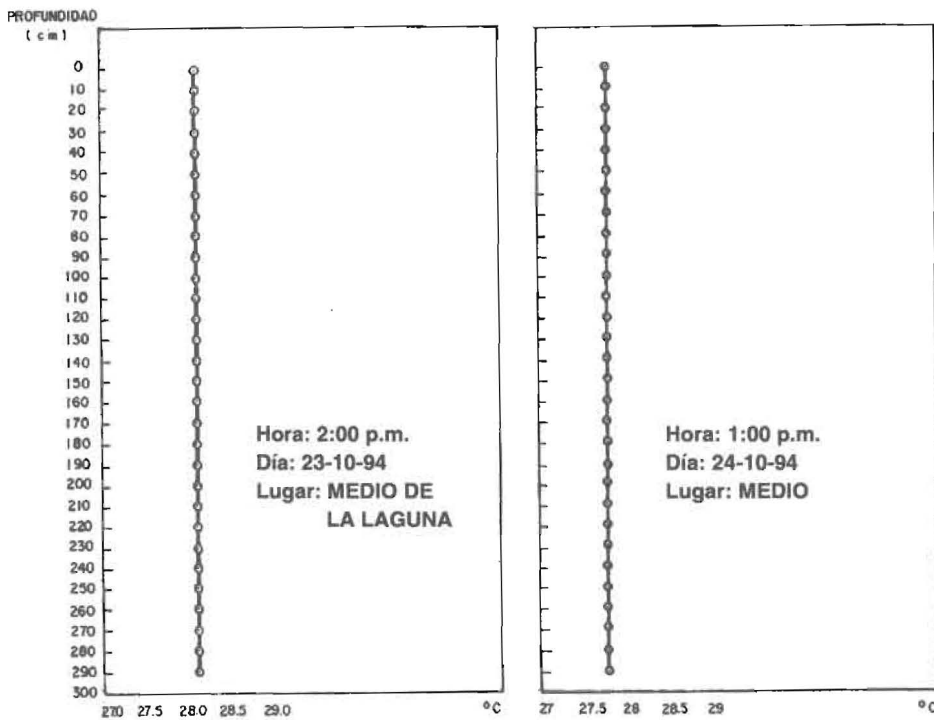


Figura 2. Perfil de temperatura Lag. A1.

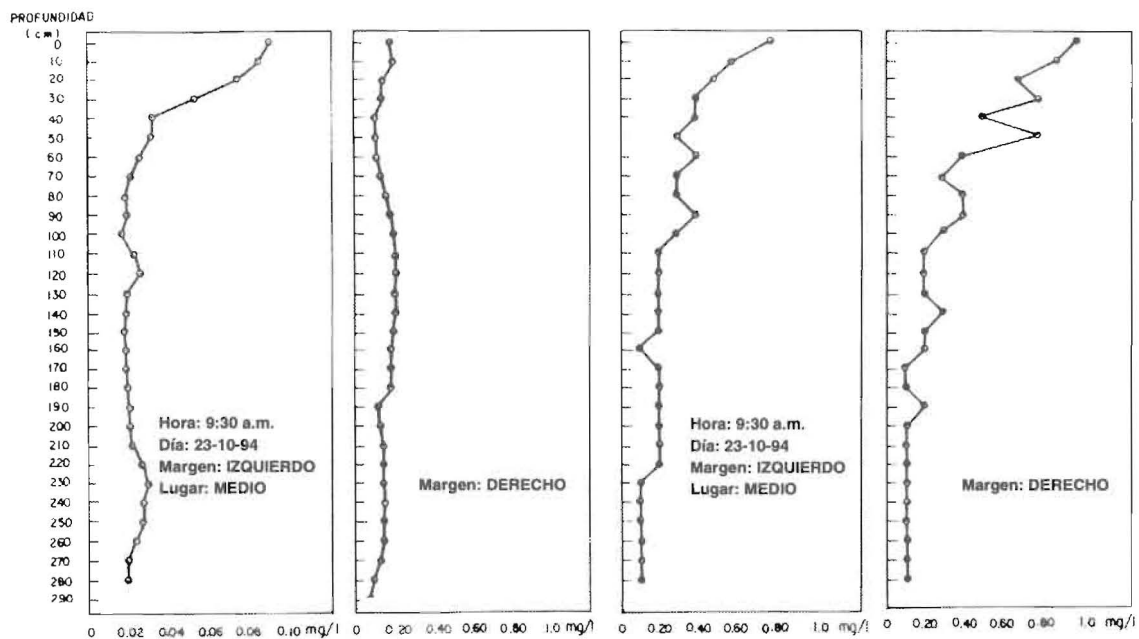


Figura 3. Perfil de oxígeno disuelto. Lag. A1 facultativa.

Los valores de oxígeno disuelto fueron medidos y posteriormente graficados (Figura 3), para observar la relación existente entre el oxígeno con factores de profundidad, tipo de mezcla y la dirección del viento.

Las concentraciones de oxígeno disuelto están muy influenciadas por la temperatura y la acción del viento. Los valores de oxígeno en el centro de la laguna permanecen constantes, presentando un comportamiento semejante al de la temperatura en la sección media de la laguna [1]. La dirección noreste del viento predominante en las mañanas, genera una mezcla en la margen izquierda de la laguna (Figura 3), variando la concentración de oxígeno desde 0,80 mg/l hasta 0,20 mg/l en los primeros 130 cm de profundidad, a diferencia de la margen derecha en donde permanece casi constante el gradiente de oxígeno.

En el caso de las tardes y noches la dirección del viento predominante es noroeste a una velocidad promedio de 11 Km/h creando una variación en la concentración de oxígeno desde 0,10 mg/l hasta 0,02 mg/l para la margen derecha con una profundidad de 2,00 m y en la margen izquierda permanece constante con valores anóxicos menores de 0,040 mg/l.

La condición del flujo según el tipo de mezcla favorecida por el viento genera en la concentra-

ción de oxígeno un patrón, el cual hace decrecer el valor del oxígeno desde la superficie hacia el fondo y de la margen izquierda a la derecha de la laguna. Este patrón simula una mezcla en sentido levogiro de la masa de agua durante el día y en sentido dextrogiro durante la noche. Por efecto de rotación de la masa de agua desde la superficie hasta el fondo se pierde todo el oxígeno presente [6].

Los valores de pH encontrados en la laguna oscilaron en el rango de 6,76-8,5, manteniéndose dentro de los límites aceptados a efecto de condiciones aptas para los procesos biológicos; sin embargo, las variaciones observadas fueron muy altas, y probablemente se deben a las diversas descargas que recibe la laguna que incluye aguas residuales domésticas, así como industriales.

En las Figuras 4 y 5 se pueden observar los valores de la concentración promedio a las 7:00 am así como a las 7:00 pm para los metales Cu y Zn, en el interior de la laguna. Se puede observar también que tanto para el Cu y el Zn, las concentraciones en todos los puntos de muestreo son mayores a las 7:00 am en comparación con los obtenidos a las 7:00 pm.

Las concentraciones de Cu, en la superficie (0,4 m de profundidad) son mayores que las observadas para las muestras tomadas a 2 m de

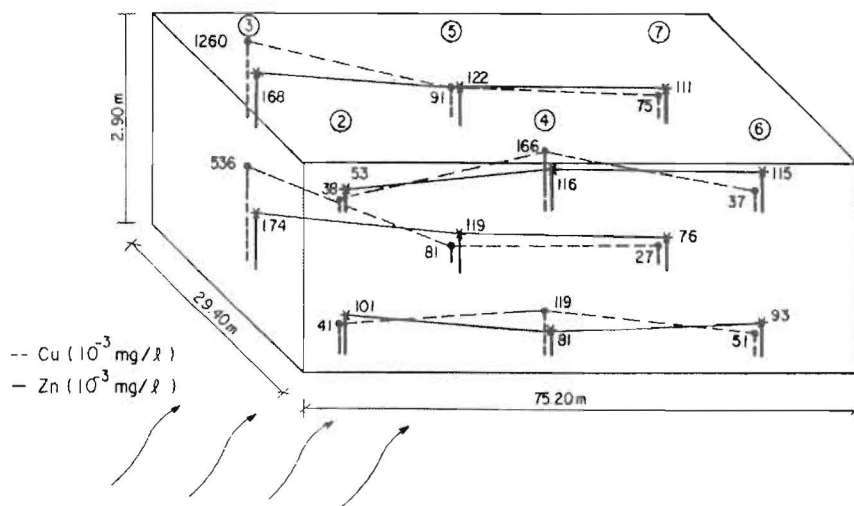


Figura 4. Variación de los valores promedio de la concentración. Muestreo 7:00 am.

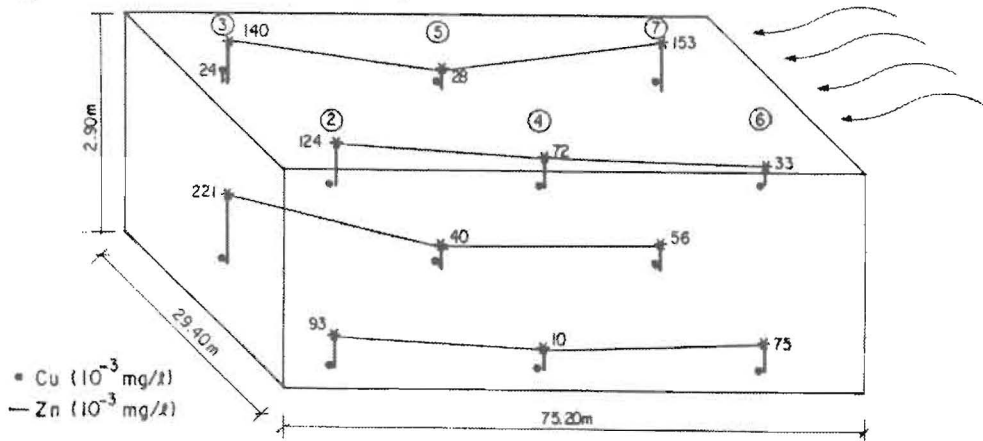


Figura 5. Variación de los valores promedio de la concentración. Muestreo 7:00 pm.

profundidad, este efecto se observa tanto en el muestreo realizado a 7:00 am como en el de las 7:00 pm y puede atribuirse al tipo de flujo existente en la laguna facultativa que obedece al comportamiento de un flujo pistón; en el cual, un 20% del volumen son espacios muertos y cortocircuitos [6]. Investigaciones realizadas en las lagunas indican que la mayor concentración de cobre, está presente en las algas (0,616 mg/g) en análisis de muestras secas en las diferentes lagunas [7]. En dichos estudios se comprobó que el cobre está presente notablemente en el sobrenadante filtrado y no filtrado, no ocurriendo así en los sedimentos de fondo donde la concentración es despreciable [8]. De la misma forma se han realizado análisis a la biomasa flotante, siendo el valor máximo encontrado para cobre de 0,184

mg/Kg en muestra de sedimento seco y para el cromo 0,209 mg/Kg.

En el caso del Zinc, en la mayoría de los puntos a la 7:00 am, las concentraciones tomadas en la superficie del agua son más elevadas que las correspondientes a muestras tomadas a 2m de profundidad, mientras que para el muestreo de las 7:00 pm sucede lo contrario. Esta variación puede atribuirse a la velocidad del viento, pero además contribuye el tipo de entrada y la salida de alimentación del caudal existente en la laguna [9], la cual es unidimensional, superficial y resulta favorable para el descenso de las sales en forma de precipitados. En las Figuras 6 y 7 se grafican los valores de la concentración promedio a las 7:00 am y 7:00 pm, para los metales Cr y Fe en el interior de la laguna. Se observa que los

valores de la superficie son ligeramente superiores que a los encontrados en el fondo para las dos muestras.

Se observa además, en el perfil de las 7:00 am que existe un comportamiento similar al obtenido e la distribución para el Cu y el Zn (Figuras 4 y 5), con la excepción de los puntos (3, 5 y 7), ubicados en el margen izquierdo a favor del flujo donde se aprecia que los valores para Cr y Fe se incrementan, observándose este efecto a nivel de la superficie y el fondo.

En el caso de las 7:00 pm, el perfil obtenido es de tendencia similar para todos los metales en estudio a excepción del cobre.

Adicionalmente las reducciones del cromo en el fondo se deben principalmente a tres gran-

des factores: incorporación de microorganismos muertos que contienen cromo y lo aportan al sedimento, incorporación del cromo soluble a través de las acciones físicas, químicas y bioquímicas por la precipitación química de ion cromo en forma de hidróxido ($\text{Cr}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$) y el fitoplancton, el cual es un medio importante de transporte de cromo, variando según la estación del año donde hay un aumento o decrecimiento de las especies. [1]

En cuanto a la remoción de los metales, en este estudio se obtuvo lo siguiente: el cobre se remueve por completo en la laguna facultativa. En los ocho muestreos realizados se observa que el cobre se remueve casi en su totalidad. La concentración promedio a la salida de la serie A fue me-

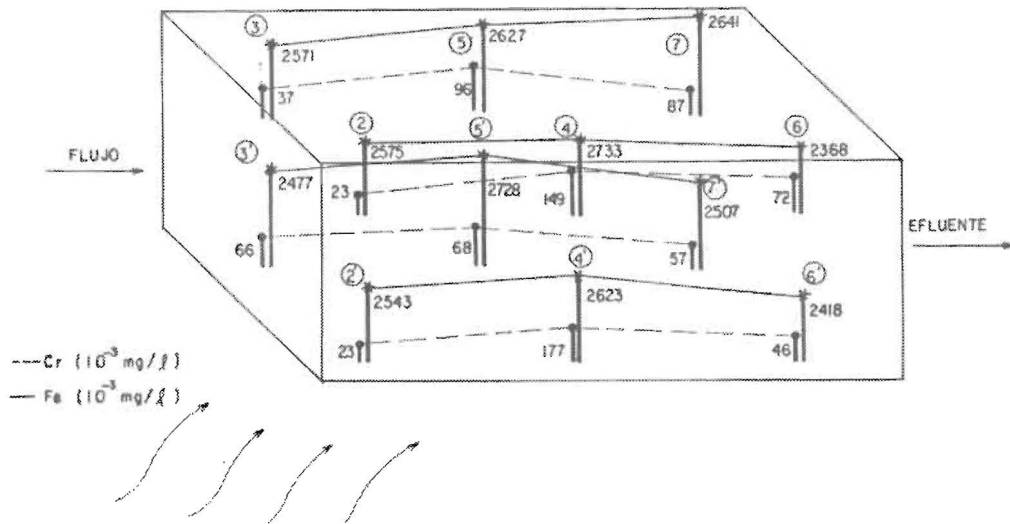


Figura 6. Variación de los valores promedio de la concentración. Muestreo 7:00 am.

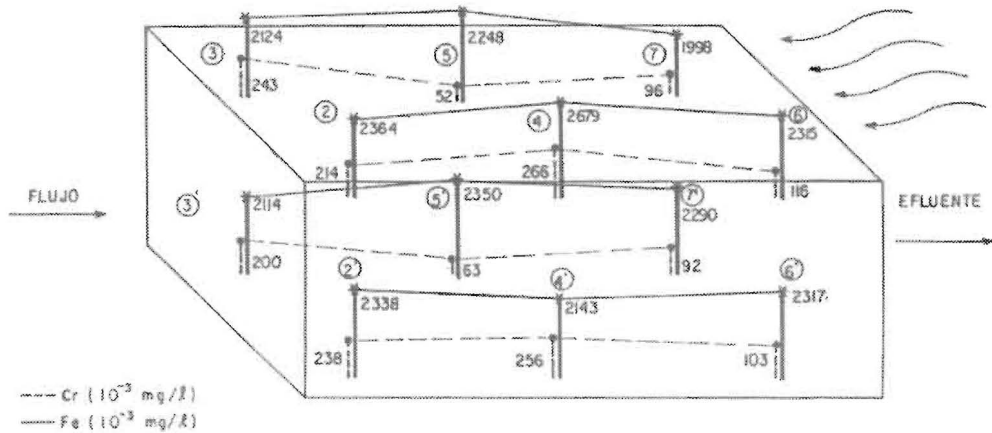


Figura 7. Variación de los valores promedio de la concentración. Muestreo 7:00 pm.

Tabla 3
Eficiencia de Remoción
(Cu, mg/l)

Nº	Punto 1	Punto 8	(%) Efic.
1	0.244	0.007	97.3
2	ND	ND	—
3	ND	ND	—
4	0.063	ND	100
5	ND	ND	—
6	0.021	ND	100
7	SD	SD	—
8	0.051	ND	100

Tabla 4
Eficiencia de Remoción
(Zn, mg/l)

Nº	Punto 1	Punto 8	(%) Efic.
1	0.0634	0.020	68.8
2	0.142	0.005	96.5
3	0.0234	ND	—
4	0.0589	ND	—
5	0.031	0.006	98.1
6	0.079	0.017	97.9
7	SD	0.014	—
8	0.076	0.008	89.2

Nº= Número de muestreo. ND = No detectable. SD = sin determinar. Punto 1 = Entrada de la laguna A1. Punto 8 = Salida de la laguna A1.

Tabla 5
Eficiencia de Remoción
(Cr, mg/l)

Nº	Punto 1	Punto 8	(%) Efic.
1	0.016	0.007	56.3
2	ND	ND	—
3	0.058	0.006	89.7
4	ND	0.012	—
5	0.013	ND	—
6	0.025	ND	—
7	SD	ND	—
8	0.015	ND	—

Tabla 6
Eficiencia de Remoción
(Fe, mg/l)

Nº	Punto 1	Punto 8	(%) Efic.
1	0.451	0.185	59.0
2	1.703	0.242	85.8
3	0.493	0.222	55.0
4	0.503	0.175	65.2
5	0.486	0.247	49.2
6	0.622	0.232	62.7
7	SD	0.213	—
8	0.479	0.150	68.7

Nº= Número de muestreo. ND = No detectable. SD = sin determinar. Punto 1 = Entrada de la laguna A1. Punto 8 = Salida de la laguna A1.

nor al límite de detección del equipo espectrofotómetro (0,003 µg/l).

El límite máximo permisible de cobre para agua tratada que se va a usar en cualquier suelo es 0.20 mg/l [10] (Tabla 3).

El Zinc se remueve en un 90% de su valor inicial en la entrada de la laguna facultativa. Las concentraciones a la salida del sistema de la serie A, son bajas y están por debajo del límite permisible. La concentración máxima de Zinc permitida para agua tratada y utilizada para riego continuo es de 2.0 mg/l [10] (Tabla 4).

El cromo se remueve en un 73%, no siendo detectable en la mayoría de los muestreos realizados en la salida (punto 8) y en algunos puntos de la entrada (punto 1), el porcentaje de remoción, de este parámetro sólo pudo ser calculado, en dos análisis. La concentración máxima permisible para riego es de 0.05 mg/l [10] (Tabla 5).

El hierro se remueve en un 64% de su valor inicial, es el metal con mayor concentración presente en la laguna, sin embargo su concentración a la salida está por debajo de los límites permisibles. La concentración máxima de hierro permitida para agua tratada y riego es de 1.0 mg/l [10] (Tabla 6).

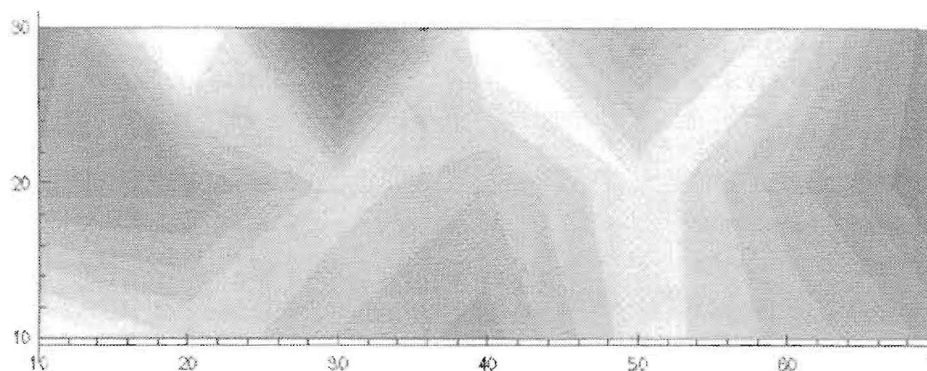


Figura 8. Variación de la concentración en la superficie Lag. facultativa utilizando un trazador.

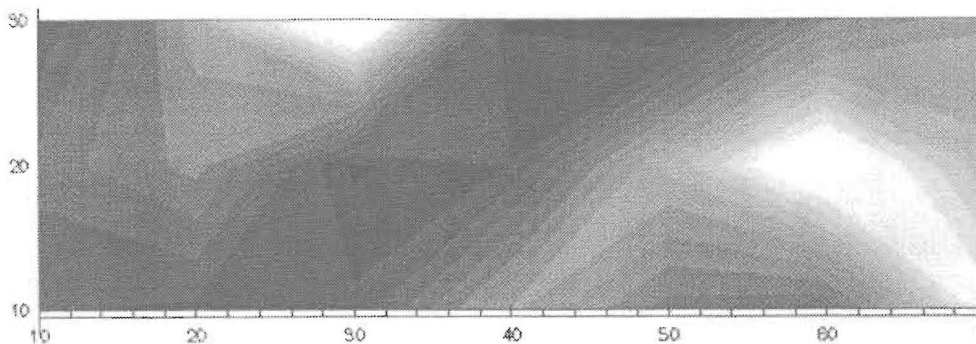


Figura 9. Variación de la concentración en el fondo Lag. facultativa utilizando un trazador.

Los mecanismos de acción por la cual se remueven los metales, se pueden atribuir básicamente a los cuatro siguientes: hidráulica del flujo, precipitación por gravedad, efecto cortante del viento en la superficie del agua lo cual incentiva la mezcla y, acción química-biológica entre las algas y los microorganismos.

La velocidad del viento de 11 Km/h es mayor en las tardes en comparación con las mañanas. Esta disminución de la velocidad durante las mañanas ocasiona un efecto de baja dispersión en la hidráulica del fluido, aumentando la concentración de los metales, y a la vez genera un flujo tipo pistón que favorece el mecanismo de precipitación produciendo un decrecimiento gradual en las concentraciones de los metales longitudinalmente. En la Figura 8 se aprecia un esquema de como varía hidráulicamente las concentraciones del 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) ubicado aproximadamente

en el centro de la laguna, produciendo variaciones en las concentraciones de los metales, incremento ó disminución en las márgenes derecha e izquierda, según se aprecia en las Figuras 4-7.

El otro mecanismo de acción que queda por analizar es el de la acción química-biológica entre las algas y los microorganismos.

El intercambio iónico como producto del desequilibrio que existe entre las sales solubles presentes en el sobrenadante y las algas, se observa en la reducción de los valores del Cu y Zn para las muestras captadas durante la noche (Figura 5). En el caso del hierro la concentración permanece constante tanto en la superficie como en el fondo (Figura 6 y 7), en la mañana y la noche, comprobando que las algas presentes en el agua no requieren de este metal para su metabolismo; siendo su única remoción factible mediante la precipitación y la acumulación en los microorganismos flotantes.

Conclusiones

La acción del viento influye directamente sobre las variables dinámicas de la laguna, tanto

en la hidráulica como en el intercambio iónico entre la biomasa y las algas condicionando patrones de flujos bien diferenciados tal como pistón o mezcla completa de acuerdo al incremento o disminución de la velocidad del viento.

En este estudio se demuestra la influencia de un patrón de flujo pistón, por las mañanas, el cual pudiera ser mejorado variando el número de entradas y salidas a la laguna, con la finalidad de incrementar la dispersión actualmente presente [9].

En el sentido transversal de la laguna se genera un patrón de mezcla completa, manteniendo la oxigenación de la masa de agua durante el día influenciada por la dirección del viento.

La eficiencia de remoción de los metales no esta solamente condicionada por la precipitación; sino también, por la hidráulica, la velocidad del viento y la influencia de las algas y bacterias órgano - reductoras presentes durante el proceso biológico que utilizan los metales como micronutrientes y cofactores de las reacciones enzimáticas.

Agradecimiento

La ejecución de esta investigación fue posible gracias al aporte financiero de la Fundación Polar y al Laboratorio de Química Analítica, Departamento de Química, Facultad de Ingeniería, L.U.Z.

Referencias Bibliográficas

1. Dos Santos Barreto A., Povinelli J. y Do Carmo C.: Assimilação de Cromo trivalente pelo plancton e sua Quantificação no sedimento e sobrenadante; experimento em microscopio. XXV Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Ciudad de México (1996). Tomo I, 168-175.
2. Dasmaceno S. y Campos R.: Remocao de metais pesados en una estacão de tratamiento de esgoto sanitarios por proceso de lodos activados. XXV Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Ciudad de México (1996). Tomo I, 212-217.
3. Da Costa A. C., Mesquita de L.M. and Tornovsky: Batch and Continuous heavy metals biosorption by a brown seaweed. Serie Tecnología Ambiental No.12 (1996) 1-28.
4. Standard, Methods. American Water Association AWWA, 17th Edition. (1989).
5. MARNR, Estación Meteorológica MaracaiboluZ Zona 5, Edo. Zulia. Div. de Inf. E Inv. del Ambiente Dpto. Hidrología (1986)
6. Aldana G.J., Herrera L. and Bracho N.: A Hydraulic Tracer Study of a Three - Pond Series in Venezuela. 3rd IAWQ. Procceding. International Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds. Technology and Applications. Session 11 (1995). João Pesooa, Brasil.
7. Cubillán, N.; Colina, M.; Ledo, H.; Herrera, L. "Remoción de Zn, Cu, Fe y Pb mediante tratamiento biológico con lagunas de estabilización. Congreso Venezolano de Química. Universidad Simón Bolívar, (1996).
8. Araujo K. Trabajo Espacial de Grado. Universidad del Zulia, Fac. Exp. de Cs. (1995).
9. Aldana G. J., Herrera L. y Bracho N.: "Selección de un Trazador para la Determinación de Regímenes Hidráulicos en Reactores." Revista Técnica Ingeniería L.U.Z. Vol. 18. Nº 1 (1995) 113-122.
10. Gaceta Oficial de la República de Venezuela. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o Efluentes Líquidos No. 5021 Extraordinario (1995).

Recibido el 14 de Mayo de 1996

En forma revisada el 16 de Enero de 1998