

## Applying bod removal models in stabilization ponds

**Nibis Bracho, César García, Gerardo Aldana y Tomás Perruolo**

*Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería  
Apartado 13.580, Delicias, Maracaibo, Venezuela*

### Abstract

Waste stabilization lagoons are the most economical and easily maintained and operated biological treatment systems for liquid effluents, especially when climate and sunlight conditions are favorable. Universidad del Zulia has an experimental system of nine lagoons (facultative and maturation) covering an area of approximately 1.8 hectares. The aim of this study was to verify whether the BOD removal models set up in tropical climates fit the operating conditions of these lagoons. To that end, random sampling was performed, obtaining a total of 93 load data from the facultative lagoons. Of these, 66 values were introduced into the existing models with a view to predicting the removed load. The predicted results from each of the models were plotted against the real data, it being observed that there is no source of pure error. It was therefore concluded that none of the models fits the real data. As a result, a new model was proposed:  $Crs = -37.7483 + 0.9829 Csa$ , where  $Crs$  is the BOD removal load and  $Csa$  is the applied BOD load. This model was obtained with a standard error of  $\pm 20$  Kg/Ha-d and a level of significance of 0.0001 for a removal efficiency of between 80-90%.

**Key words:** Facultative lagoons, removal models, BOD.

## Ajuste de modelos de remoción de DBO en lagunas

### Resumen

Las Lagunas de Estabilización constituyen el sistema de tratamiento biológico de efluentes líquidos más económico y de fácil mantenimiento y operación, sobre todo cuando existen condiciones favorables de clima e iluminación. La Universidad del Zulia posee un sistema experimental de nueve lagunas (Facultativas y de Maduración) que ocupan un área aproximada de 1.8 has. En el presente trabajo se trata de verificar si los modelos de remoción de DBO obtenidos en clima tropical, se adaptan a las condiciones de estas lagunas. Para ello, se efectuó un muestreo aleatorio y se obtuvieron 93 datos de carga de las Lagunas Facultativas, de los cuales 66 fueron introducidos en los modelos existentes a fin de predecir la carga removida. Los datos predecibles de cada uno de los modelos se graficaron contra los datos reales, observándose que no existe una fuente de error puro, concluyéndose que ninguno de los modelos se ajusta a los datos reales de las Lagunas. En virtud de ello se determinó un nuevo modelo  $Crs = -37.7483 + 0.9829 (Csa)$ , donde  $Csr$  y  $Csa$  se definen como cargas orgánicas superficiales removida y aplicada respectivamente en Kg DBO/Ha-d. Este modelo se obtuvo con una error standard de  $\pm 20$  Kg/Ha-d y un grado de significancia de 0.0001, para una eficiencia de remoción entre 80 y 90%.

**Palabras claves:** Lagunas facultativas, modelos de remoción, DBO.

## Introducción

Las Lagunas de Estabilización constituyen un sistema económico de tratamiento biológico por los bajos requerimientos energéticos, y costos de mantenimiento, unidos a la simple operación [1]. Estudios experimentales realizados en Perú demostraron que las lagunas de estabilización son una forma económica de tratar las aguas de desecho a fin de que alcancen niveles de pureza adecuados para utilizarlas para el riego de hortalizas, árboles frutales y para la cría de peces. [2]

Investigadores como Gomes de Sousa [1], Méndez y colaboradores [3] y Llavador [4] han realizado estudios sobre los criterios de dimensionamiento y las eficiencias de remoción tanto físicas como químicas y bacteriológicas de este tipo de tratamiento.

La Universidad del Zulia (Venezuela) con la finalidad de estudiar las bondades de este sistema de tratamiento, para obtener los parámetros dimensionales y con el objeto de reutilizar el agua tratada con fines de riego, construyó dentro de la Ciudad Universitaria un sistema experimental de nueve lagunas de estabilización tres Facultativas y seis de Maduración, con una superficie aproximada de 1.8 has., donde se tratan las aguas servidas de algunos sectores del Norte de la Ciudad de Maracaibo. El objetivo de este sistema experimental es obtener parámetros de diseño bajo condiciones climáticas y meteorológicas naturales del trópico, que sirvan de soporte para elaborar sistemas similares. En este trabajo se investigó sobre el ajuste de los modelos de remoción de DBO por carga, para lo cual se analizaron 93 muestras, para obtener datos de DBO<sub>5-20</sub> y DQO (total y soluble), que permiten comparar la carga removida real con la predicha. Estas muestras fueron tomadas en el período desde Junio 1992 hasta octubre 1993, en cuatro monitoreos o campañas de los cuales uno de ellos fue preliminar. Por otra parte se midieron "in situ" parámetros como oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura.

Entre los modelos que se utilizaron están el de McGarry y Pescod, el del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y CIAT [5].

## Metodología

Las Lagunas de Estabilización de L.U.Z operan como tres series. Cada serie está constituida por una Laguna Facultativa y dos de Maduración, siendo diferente la longitud de las Lagunas Facultativas (Figura 1) La diferencia existente en el área de las Lagunas Primarias permite analizar tres cargas orgánicas al mismo tiempo, disminuyendo de esta forma el período o lapso de monitoreo. Para efectuar el ajuste de los modelos existente de remoción de DBO por carga se captaron 93 muestras en las lagunas facultativas y 180 muestras en las lagunas de maduración.

Para establecer el programa de muestreo, fue necesario realizar en primera instancia una campaña de muestreo preliminar que permitiese conocer las fluctuaciones diarias de los parámetros a analizar, y que a la vez serviría como fundamento para determinar las diluciones adecuadas que deberían utilizarse tanto para la DBO<sub>5-20</sub>, como para la DQO (si fuese necesario), puesto que no se contaba con antecedentes previos sobre los parámetros físicos-químicos de cada una de las lagunas, tan solo se tenía información de las características del agua residual proveniente del colector.

Este monitoreo preliminar se ejecutó en el período del 10 al 17 de junio de 1992. Los restantes monitoreos se realizaron en distintos períodos del año, tal como se describen a continuación:

a.- Dos campañas de 11 días consecutivos, una realizada del 10 al 21 de Diciembre de 1992 con un caudal entre 6 y 7 L/s y otro efectuado del 25 de Febrero al 07 de Marzo de 1993, con un caudal de 5 L/s.

b.- Posteriormente, se realizó una campaña con días no consecutivos, es decir que se captó la muestra, una, dos o tres veces por semana, durante los meses de Abril Mayo, Junio y Octubre 1993, con un caudal de 4.5, 2,6 y 3,7 L/s.

c.- Por último se efectuó un monitoreo en Marzo y Abril de 1994 con un caudal de 5 L/s con la finalidad de calibrar el modelo de remoción de DBO obtenido. Esta campaña se realizó captando muestra en la Laguna A1.

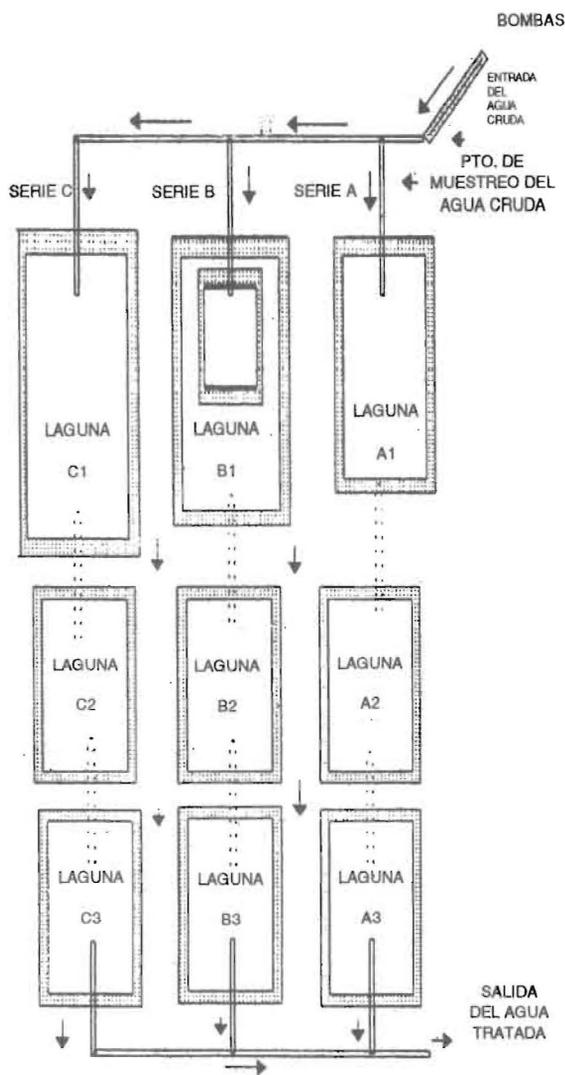


Figura 1. Esquema general de las lagunas experimentales L.U.Z.

En todas las campañas o monitoreos, excepto en la preliminar, se determinó DBO<sub>5-20</sub> y DQO (total y soluble), Sólidos suspendidos totales (SST), y Sólidos suspendidos volátiles (SSV), siguiendo la metodología descrita en [6].

Al momento de captar la muestra se midieron "in situ" los siguientes parámetros físico-químicos: pH, temperatura y oxígeno disuelto.

Se calculó la carga orgánica aplicada y removida en Kg DBO/ha-día, tanto para las Lagunas Facultativas como para las Lagunas de Maduración, los valores de carga orgánica aplicada se introdujeron en los modelos de remoción de DBO de Mc Garry y Pescod, Centro Panamericano de Ingeniería, Sanitarias, Cubillos y Mara

y Silva, y se estimó con cada uno de ellos, la carga orgánica removida, la cual se comparó con la carga orgánica medida, a fin de verificar si alguno de estos modelos se ajustan a los valores determinados experimentalmente.

Para la determinación del modelo de remoción de DBO, se analizó la dependencia del pH, la temperatura y el oxígeno disuelto, sobre la remoción de DBO. Estas variables resultaron ser independientes, siendo las únicas variables dependientes la carga orgánica aplicada y la carga orgánica removida. Con estos parámetros se aplicó el análisis de correlación de Person y se generó un modelo de regresión lineal.

Para efectuar el análisis estadístico de los resultados, se utilizó el paquete estadístico SAS, el cual fue corrido en la Computadora HP-9000, del Instituto de Cálculo Aplicado de la Facultad de Ingeniería LUZ. Para el análisis e interpretación de los resultados se aplicó la metodología de Canavos [7]

## Resultados

La carga orgánica aplicada osciló entre 92 y 570 Kg DBO/ha-día. Los valores de pH se mantuvieron entre 7 y 8 para el agua cruda y entre 7 y 11 para las lagunas de estabilización; la máxima concentración de oxígeno disuelto se registró a las 3:00 pm y la mínima, después de las 3:00 a.m. (Figuras 2,3,4). La mínima concentración de oxígeno de 0 mg/l se detectó en Diciembre 1992 cuando las lagunas operaban con un caudal de 7 L/s.

La eficiencia de las Lagunas Facultativas osciló entre 80 y 90% y por serie fue entre 81 y 93%.

La concentración promedio de DBO y DQO en el agua cruda por cada campaña fue de 92,178 y 135 mg/l y 189, 344 y 300 mg/l (Tablas 1 y 2) siendo el promedio total de DBO 135 mg/l y de DQO 278 mg/l y la concentración de sólidos suspendidos totales y volátiles fue de 114 y 86 mg/l (Tabla 3), siendo la temperatura más bajo de 26°C en horas de la madrugada y la más alta de 37°C.

En las lagunas, la temperatura varió entre 28 y 34°C, (Figura 5), siendo la variabilidad entre lagunas facultativas y de maduración de 1°C.

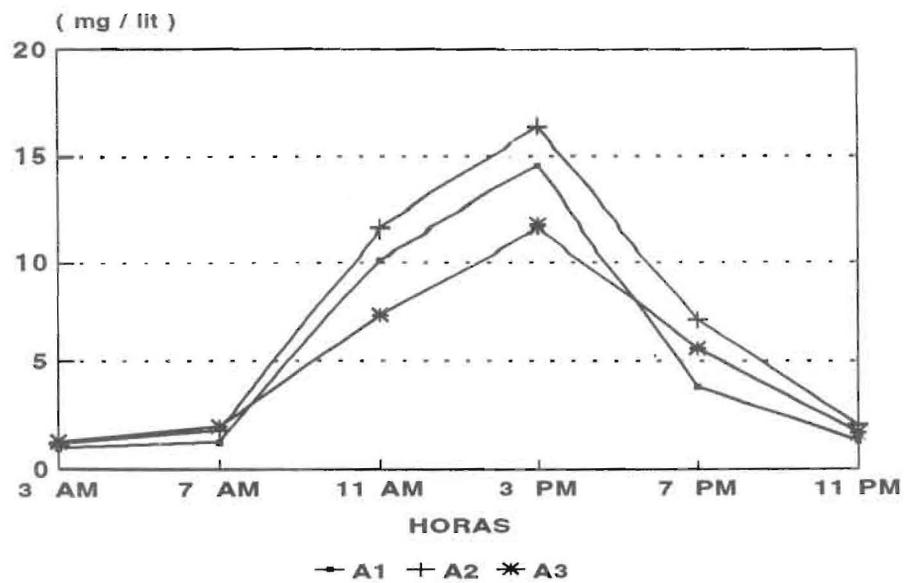


Figura 2. Valores promedio de oxígeno disuelto, mg/l, Serie A.

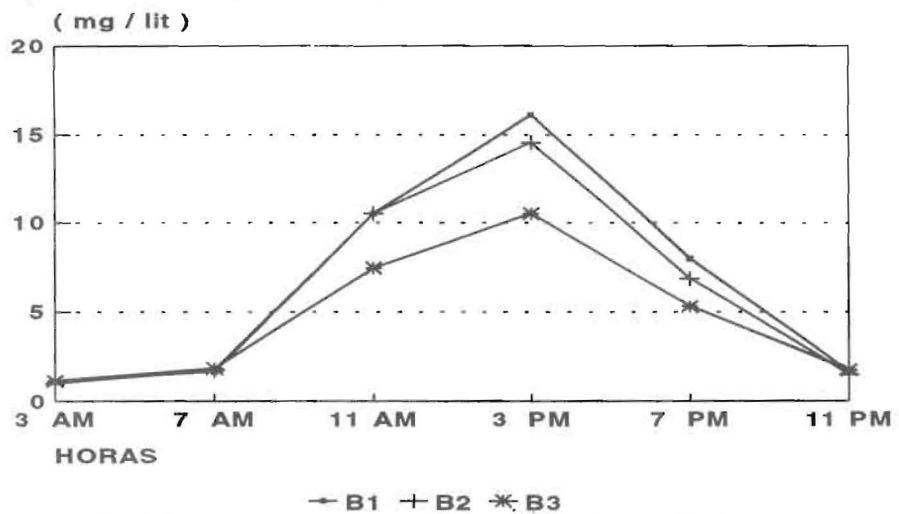


Figura 3. Valores promedio de oxígeno disuelto, mg/l, Serie B.

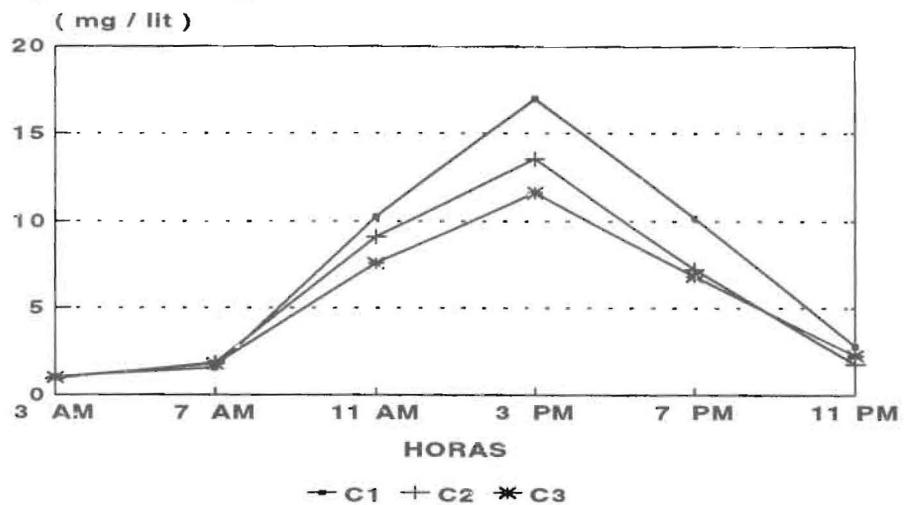


Figura 4. Valores promedio de oxígeno disuelto, mg/l, Serie C.

Tabla 1  
Valores promedios de DBO<sub>5-20</sub> soluble (mg/l)

	Serie "A"			Serie "B"			Serie "C"		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
AN*	92	179	135	92	179	135	92	179	135
F	21	20	27	20	17	22	17	17	25
M	16	20	21	15	16	25	20	16	24
M	13	13	19	16	16	20	16	16	17
E(%)	86	93	81	83	91	85	83	91	87

Tabla 2  
Valores promedios de DQO soluble (mg/l)

	Serie "A"			Serie "B"			Serie "C"		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
AN*	189	344	300	189	344	300	189	344	300
F	61	66	61	75	71	117	62	72	103
M	54	59	89	74	76	121	83	70	124
M	76	56	56	83	97	105	98	104	120
E(%)	60	84	81	83	72	65	40	70	60

Tabla 3  
Promedio de sólidos suspendidos totales y volátiles

Sólidos	AN	Serie "A"			Serie "B"			Serie "C"			C
		F	M	M	F	M	M	F	M	M	
SST	84	81	71	45	79	63	50	79	51	45	1
SSV	68	74	70	43	73	60	43	73	49	40	1
SST	158	174	111	106	184	14	11	171	146	114	2
SSV	133	156	100	88	172	11	10	159	135	105	2
SST	101	160	134	113	141	127	148	157	128	87	3
SSV	57	75	68	37	72	57	34	83	64	38	3

C: Campaña, SST: Sólidos Suspendidos Totales, SSV: Sólidos

### Análisis de Resultados

Los valores de carga orgánica aplicada en este estudio (Figura 7), coinciden con los utilizados por los autores de los modelos por cargas citadas en la metodología. Al utilizar esos modelos para estimar la carga orgánica removida se

observa que no se ajustan a los valores medidos experimentalmente (Figura 6), ya que la diferencias entre los valores observados y los predichos no corresponden a una fuente de error puro, como debe ocurrir cuando el modelo se ajusta. Por otra parte se observa el sesgo de estos modelos al predecir la carga orgánica removida,

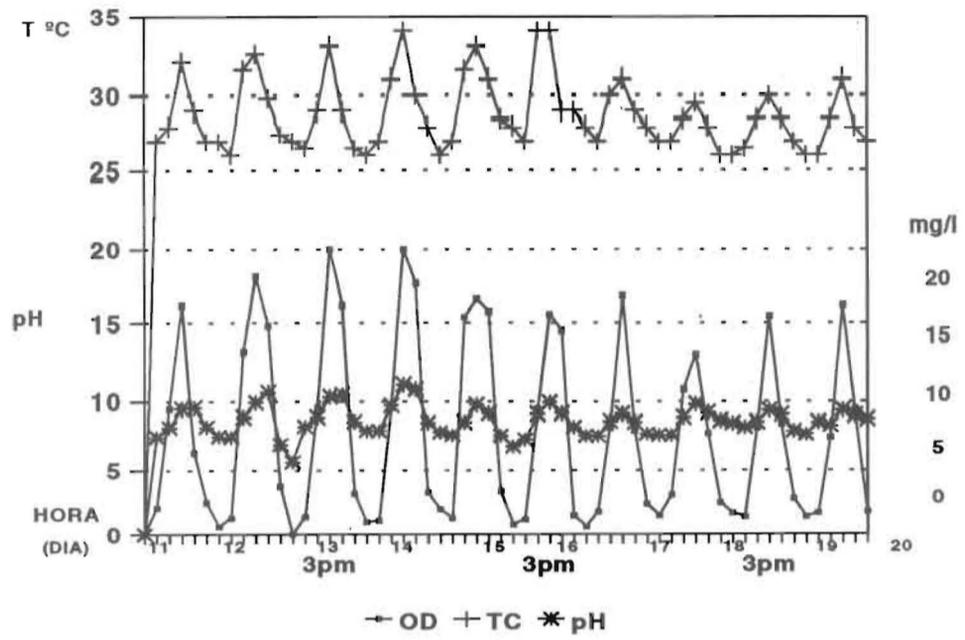


Figura 5. Valores de pH, T °C, y OD, Laguna "C1".

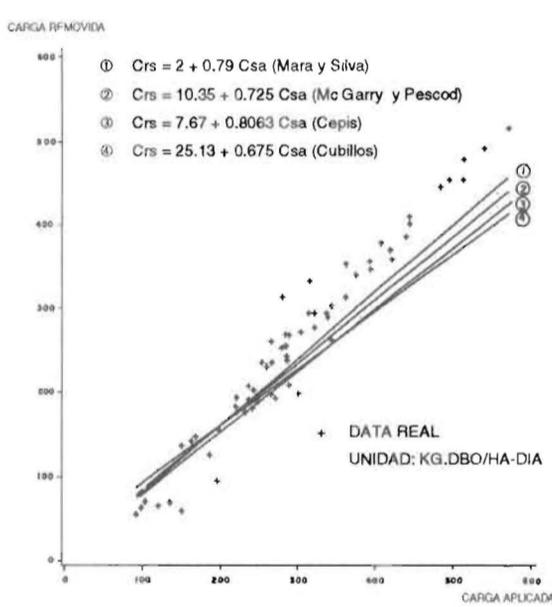


Figura 6. Modelos existentes Vs. Data real.

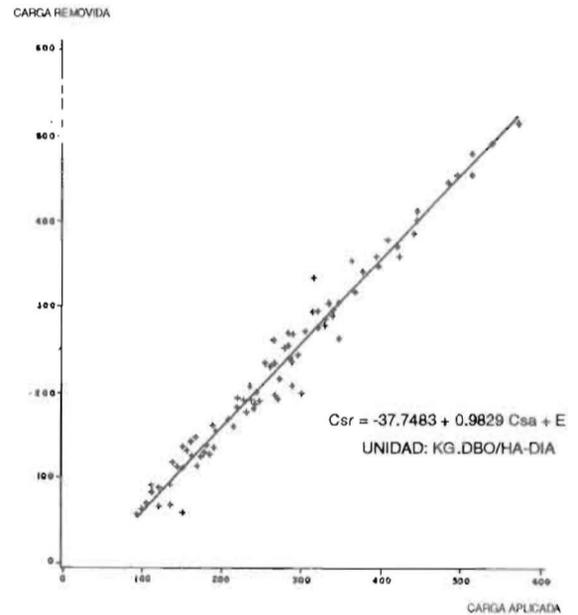


Figura 7. Modelo de remoción de DBO.

subestimando los valores medidos. Por tal razón fue necesario encontrar un nuevo modelo, que se ajuste a nuestros resultados con una eficiencia de remoción entre 80 y 90% y con cargas aplicadas entre 92 y 570 Kg DBO/Ha-d (carga promedio de 268,8 Kg/Ha-d, con una desviación

estándar de 109 Kg/Ha-d). La variabilidad de estas cargas se debe a la correspondiente a la DBO de entrada, la cual varió entre 40 y 265 mg/l, y las oscilaciones del caudal, que estuvo entre 4.5 y 7 L/s. Se analizó igualmente la dependencia del pH, la temperatura, el oxígeno

Tabla 4  
Cargas aplicadas Vs Cargas removidas en la Laguna A-1

Fecha	Csa (kg/Ha.d)	Csr (real) (kg/Ha.d)	Csr (estimada) (kg/Ha.d)	Error del modelo (Kg/Ha-d)
13-10-93	251.46	189	174	20
21-03-94	193.43	154.74	152.37	
22-03-94	408.50	359.75	363.77	
23-03-94	268.75	227.90	226.41	

Tabla 5  
Cargas aplicadas Vs Cargas removidas, Lagunas facultativas

Csa (Kg/Ha.d)	Csr (real) (Kg/Ha.d)	Csr (estimada) (Kg/Ha.d)	Error del modelo (Kg/Ha.d)	Error Promedio entre lo real y lo estimado (Kg/Ha.d)
498	425	452	20	24
1118	1029	1061		
1154	1083	1096		

no disuelto y la carga aplicada sobre la carga removida, existiendo dependencia sólo entre la carga aplicada y la removida. El coeficiente de correlación de Person entre estas dos variables fue de 0.98 con un grado de significancia de 0.0001.

La ecuación obtenida con el análisis de regresión lineal sigue al comportamiento de una línea recta  $Csr = A + B Csa$  y la expresión es:

$$Csr = - 37.7483 + 0.9829 (CSA). \pm E \quad (1)$$

Donde:

Csr y Csa: Cargas superficiales removidas y aplicadas respectivamente (Kg DBO/Ha-d). Esta última basada en DBO total y la primera basada en DBO soluble del efluente.

E: Error del modelo Kg/Ha-d.

El grado de significancia del modelo, el intercepto y el término dependiente fue de 0.0001, el error estándar del modelo fue  $\pm 20,47$  Kg/Ha-d y el "R-cuadrado" fue de 0.965. El modelo tiene un grado de confiabilidad muy alto, por lo que puede predecir los resultados con un error muy pequeño.

Este modelo fue verificado con cargas aplicadas a la Laguna A-1 obtenidas en los meses de octubre de 1993 y Marzo 1994 y se comparó con las cargas removidas (Tabla 4).

Mc Garry y Pescod [5], desarrollaron una correlación en función de la temperatura en grado centígrado para la carga máxima superficial  $CSm = 60.29 \times 1.0993T$  sobre la cual la laguna falla, eliminando su estrato aerobio y convirtiéndose en Anaerobio (Yanes, [8]). Usando esta ecuación para las lagunas en estudio la carga máxima sería 1032 Kg/Ha-d, sin embargo, en la realidad ésta no fue mayor a 570 Kg/Ha-d, manteniendo su condición facultativa para periodos de retención de 10 días o más. Cuando disminuyó el tiempo de retención, la condición facultativa varió a anaerobia entre las 3:00 a.m. y las 7:00 a.m. Es bueno mencionar que la profundidad de estas lagunas es aproximadamente 2.8 metros superior a la establecida para Lagunas Facultativas. Para ampliar la utilidad de la ecuación obtenida (EC.(1)), se utilizan datos de las Lagunas de estabilización de la planta experimental de tratamiento de aguas de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (Regardiz [9]), obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 5.

Puede observarse que la ecuación (1) pronostica las cargas orgánicas removidas con un error promedio de 24 Kg/Ha-d, muy aproximado al error estándar del modelo, ec (1) (20 Kg/Ha-d).

### Conclusiones

1.- Los modelos existentes de remoción de DBO por cargas no se ajustan a los valores encontrados en las lagunas piloto de L.U.Z, aun cuando estos modelos fueron obtenidos para condiciones tropicales. Sin embargo es bueno citar que el Modelo que más se acerca es el de Mara y Silva.

2.- La eficiencia de las Lagunas Facultativas es muy alta (entre un 80 y 90%), Esto se atribuye especialmente a las condiciones favorables de viento, insolación y temperatura.

3.- El oxígeno disuelto durante el día es alto, alcanzándose valores hasta de 20 mg/l, en la campaña No. 1, donde el caudal es de 7 L/s. Se detectó 0 mg/l de oxígeno disuelto en horas de la madrugada, razón por la cual se bajó el caudal a un máximo de 5 L/s, que permitiese mayor tiempo de retención, e impidiendo de esta forma los malos olores. La máxima concentración de oxígeno se detectó a las 3:00 pm.

4.- El modelo obtenido [ $C_{sr} = -37.7483 + 0.98 C_{sa}$ ] tiene una correlación de 0.98, un error estándar de  $\pm 20$  Kg/Ha-d, un grado de significancia de 0.0001 y un R-cuadrado de 0.965, para condiciones de carga entre 92 y 570 Kg/Ha-d, y temperatura entre 26 y 37°C.

5.- El modelo se probó con valores de cargas aplicadas y removidas, detectándose un comportamiento dentro del rango del error estándar del modelo ( $\pm 20$  Kg/Ha-d).

6.- Para las lagunas de maduración no se determinó ningún modelo de remoción de DBO, puesto que dos lagunas de maduración en serie remueven sólo de un 2 a un 3% de DBO, lo cual se considera insignificante frente a la remoción de una Laguna Facultativa. Claro está que estas lagunas se diseñan principalmente para remover organismos patógenos y no DBO.

7.- La eficiencia promedio entre las Lagunas Facultativas difiere muy poco, por lo cual no se justifica construir lagunas facultativas con

aéreas superficiales más grandes, si la carga aplicada no lo amerita.

### Agradecimiento

Al CONDES y la Fundación POLAR por su financiamiento.

### Referencias Bibliográficas

1. Gomes de Sousa, J.M. Wastewater Stabilization Lagoon Design Criteria for Portugal. *Water Science Technology*. Vol.19, # 12, 1987. pp 7-16.
2. Robson, E. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Se aprovecha el potencial de las aguas de desechos en el Perú. 1989.
3. Mendes, B. y colaboradores. 2nd IAWQ International Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds and the Reuse of Pond Effluent. Efficiency of Removal in Stabilization Ponds I. Influence of Climate. 30th 1993.
4. Llavador Colomer, F.; D Prats, R. Mechanistic Model Facultative Stabilization Ponds. *Water Environment Research*. Vol 65, 1993, pp 679-685.
5. Cubillos, A. Criterios para el Diseño de Lagunas de Estabilización. CIDIAT, Mérida, 1982.
6. A.W.W.A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16th Edition. Washington 1985.
7. Canavos, G. Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos. Editado por Mc Graw-Hill/Interamericano de México, S.A. de C.V. 1992.
8. Yanez, F. Lagunas Facultativas y de Alta Producción de Biomasa. CEPIS, 1980.
9. Regardiz, F. y colaboradores. XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. La Habana, Cuba. Comportamiento Hidráulico en las Lagunas de Estabilización de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Ref.: 3:2:09, 1992, pág. 534.

Recibido el 11 de Octubre de 1994  
En forma revisada el 6 de Marzo de 1995