

Metodología Para la Selección del Régimen de Flujo en Lagunas de Estabilización.

Luis Eduardo Cruz T.*, Walter E. Alayón Torres**, Carlos Emilio Monsegny S.**

INTRODUCCIÓN

Para modelar procesos biológicos, se necesita información sobre la estequiometría y cinética de las reacciones y sobre el régimen hidráulico del sistema. La estequiometría de una reacción se refiere a la cantidad de reactantes consumidos (tales como sustratos), y a la cantidad de productos formados (tales como microorganismos). El régimen hidráulico hace referencia a la configuración del flujo dentro y fuera del proceso y a la mezcla y distribución de los sólidos del fluido dentro del reactor.

El presente artículo se centrará en estudiar los diferentes regímenes de mezcla y sus modelos cinéticos de degradación de materia orgánica aplicados al caso específico de la laguna de estabilización de aguas residuales del municipio de Tocancipá. Además se discute la metodología para determinar el tipo de flujo que se presenta en una laguna de estabilización.

Los modelos cinéticos de degradación de materia orgánica en lagunas de estabilización, se clasifican de acuerdo con la presencia o ausencia de oxígeno en la laguna y con el régimen de mezcla que se presenta en ésta.

Los regímenes de flujo que se presentan en las lagunas de estabilización son el *de mezcla completa* y el *flujo de pistón*, uno totalmente opuesto al otro. Entre estos dos extremos se encuentra el régimen denominado *flujo disperso o arbitrario*.

La determinación del régimen de mezcla es de gran importancia, puesto que con ésta es posible tener una idea del comportamiento de las tasas de remoción de los nutrientes que llegan al sistema, del consumo de oxígeno y el modelo cinético de remoción de materia orgánica entre otras.

I. RÉGIMEN DE MEZCLA COMPLETA

El régimen de mezcla completa ideal está caracterizado porque la masa de agua que entra al sistema se dispersa instantáneamente, haciendo que las características del agua sean las mismas en cualquier punto, es decir que las tasas de reacción son constantes en el reactor y la demanda de oxígeno es idéntica en cualquier punto de muestreo, así mismo ocurre con la tasa de remoción; esto tiene grandes ventajas frente al régimen de flujo

de pistón como: el consumo de oxígeno por los microorganismos es uniforme, las cargas de choque son amortiguadas fácilmente sin que la población de organismos se vea gravemente afectada.

La mayoría de las lagunas de estabilización no alcanzan las condiciones de mezcla completa. Este modelo es una aproximación razonable del proceso de transporte hidráulico en lagunas, sólo para los casos donde el volumen de la zona activa es casi la mitad del volumen de la laguna.[3]

II. RÉGIMEN DE FLUJO DE PISTÓN

El régimen de flujo de pistón se caracteriza porque la masa de agua que entra al sistema y pasa a través del mismo, es descargada en el mismo orden en que ésta ingresó, es decir, la masa de agua en su desplazamiento a lo largo del flujo (laguna) se difunde en su misma capa, pero no lo hace con las capas inmediatamente anterior ni posterior. En teoría, cada elemento del líquido seguirá un patrón de agotamiento de nutrientes, con una tasa de remoción inicialmente rápida que se hace cada vez más lenta según el líquido se mueve a lo largo del estanque, ya que la alta concentración de nutrientes a la entrada hace que la demanda de oxígeno sea también alta.

Este régimen de flujo, presenta el inconveniente de que las poblaciones de microorganismos se pueden ver afectadas cuando las cargas orgánicas aplicadas varían a causa de algún vertimiento de choque.

III. RÉGIMEN DE FLUJO ARBITRARIO

El flujo arbitrario es un régimen de transición entre el flujo de pistón y el de mezcla completa, definido por las características geométricas de la laguna como longitud de recorrido, ancho de la laguna, ubicación de las estructuras de entrada y salida, existencia de baffles y profundidad. Otros factores que inciden son las condiciones ambientales propias del entorno donde se encuentra la laguna, como el viento y la temperatura, la existencia de cortos circuitos, zonas muertas o regiones de estancamiento, dispersión causada por turbulencia y mezcla local. Todos estos factores interactúan simultáneamente, proporcionando un coeficiente de dispersión (d) característico.

*Químico MSc. en Sanitaria, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia.

**Ing. Civil Universidad Nacional de Colombia.

Wehner y Wilhelm derivaron la ecuación No. 12 para reactores químicos, la cual exhibe cinética de primer orden y condiciones de mezcla no ideales bajo cualquier tipo de condiciones de entrada o salida de flujo, expresión que posteriormente Thirumurthi desarrolló en un nomograma.

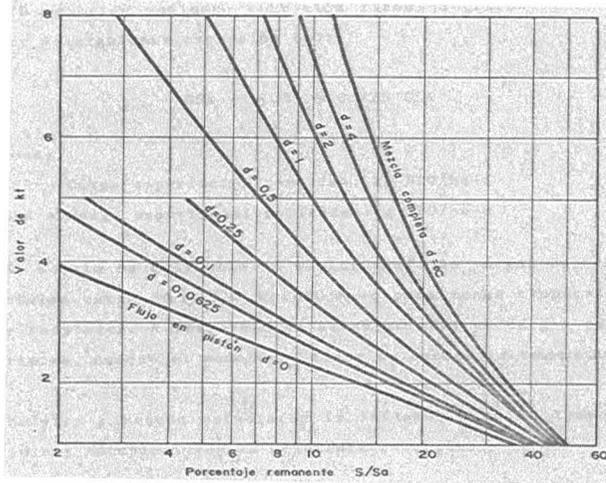


Figura 1. Nomograma de Thirumurthi (aplicada para la ecuación de Wehner y Wilhelm)

La ecuación de Wehner y Wilhelm es válida en lagunas en las cuales las reacciones ocurren uniformemente en toda la profundidad del estanque siguiendo la razón k (constante de degradación cinética) [6]

Para el valor de $d = 0$ indica que el flujo es de pistón y cuando el valor tiende a infinito el flujo es de mezcla completa, en lagunas de estabilización el valor de d oscila entre 0,1 y 4.

Debido a estas desviaciones del flujo ideal, el tiempo de retención real promedio es menor que el calculado para un reactor ideal, algunas partículas pueden fluir a través de la laguna rápidamente, otras pueden tomar tiempos de retención distintos y otras pueden llegar a las zonas de estancamiento ocasionando una reducción del volumen efectivo del estanque.

Para el diseño de lagunas facultativas varios autores han propuesto diferentes métodos que pueden clasificarse en tres grupos: *métodos empíricos*, *métodos racionales* y *modelos matemáticos*; su aplicación depende de diversas variables como la zona geográfica (latitud), clima, carga orgánica aplicada, temperatura del agua residual (A.R.) y régimen de flujo, entre otros. Para la selección y aplicación del método a emplear en el diseño o para la evaluación de una planta que está en operación, es fundamental determinar el régimen de flujo y para ello es de gran ayuda calcular el coeficiente de dispersión.

Cuadro 1. Clasificación de los modelos

MODELO	FLUJO DE PISTÓN	FLUJO DISPERSO	MEZCLA COMPLETA	MODELO DE CARGA SUPERFICIAL
1. Marais-Shaw			X	
2. Hermann y Gloyna				X
3. Thirumurthi	X	X	X	
4. McGarry y Pescod				X
5. Marais modificado			X	
6. Arceivala				X
7. Yañez				X
8. Duncan Mara				X
9. Cubillos				X
10. Mara y Silva				X
11. Fair	X	X	X	
12. Pistón	X			
13. CEPIS				X

IV. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO.

Para la determinación del régimen de flujo en lagunas de estabilización, se puede recurrir a metodologías como: (1) El uso de trazadores, (2) Aplicación del modelo empírico del CEPIS (basado en la geometría de la laguna y temperatura del A.R.) y (3) Aplicación de modelos cinéticos de primer orden para diferentes tipos de mezcla.

A.TRAZADORES [1]

Para que el cálculo del coeficiente de dispersión d , mediante el uso de trazadores conduzca a resultados confiables, es conveniente que el marcador utilizado cumpla con ciertas características: el trazador y el agua deben desplazarse a la misma velocidad; no debe experimentar reacciones químicas con el agua ni con materiales del medio; la cantidad del trazador no debe modificar de forma significativa la densidad, viscosidad o temperatura del agua; debe ser fácilmente soluble en el agua y permitir factores de dilución elevados; los fenómenos de dispersión y difusión del trazador deben ser iguales a los del agua; su presencia sea inocua para los seres vivos y no deben contaminar la laguna durante largos períodos.

Para determinar el coeficiente de dispersión es necesario hallar *la curva de distribución de edad del trazador*. Esta curva se obtiene experimentalmente, inyectando el trazador a la entrada de la laguna, en forma de impulso bien sea continuo o instantáneo y midiendo su concentración a la salida en función del tiempo.

Uno de los estadísticos utilizados para caracterizar la curva es el tiempo promedio $\bar{\lambda}$, que se obtiene a partir del primer momento de la curva de distribución de edad, es decir, es el centroide de la curva y que se calcula con la siguiente expresión:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i C_i}{\sum C_i} \tag{1}$$

Otro estadístico importante es la varianza, definida así:

$$\sigma^2 = \frac{\sum \lambda_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{\lambda}^2 \tag{2}$$

σ^2 : Varianza de la curva C en función de t (min²)

C: Concentración del trazador

λ : tiempo (min.)

$\bar{\lambda}$: tiempo promedio (min.)

A partir del tiempo promedio y de la varianza se define:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma^2}{\lambda^2} \quad (3)$$

que es la varianza de forma adimensional. El cálculo del coeficiente de dispersión d se desarrolla iterando sucesivamente, hasta hallar el valor d que cumpla la siguiente ecuación:

$$\sigma_i^2 - 2d + 2d^2 [1 - \exp(-1/d)] = 0 \quad (4)$$

B. APLICACIÓN DEL MODELO EMPÍRICO DEL CEPIS. [4]

Como la determinación del coeficiente de dispersión con el uso de trazadores es costosa, el CEPIS desarrolló una ecuación empírica basada en la geometría de la laguna y en la temperatura de la misma:

$$d = \frac{1,158 \cdot [t \cdot (W + 2Z)]^{0,489} \cdot W^{1,511}}{(T + 42,5)^{0,734} \cdot (L \cdot Z)^{1,489}} \quad (5)$$

donde:

d : Coeficiente de dispersión (adimensional)

t : Tiempo de retención hidráulico, TRH (días)

T : Temperatura del A.R. (°C)

Z : Profundidad (m.)

L : Longitud de recorrido del A.R. (m.)

W : Ancho de la laguna (m.)

que es una adaptación de la expresión de Polprasert, en la cual la viscosidad cinemática se expresa en función de la temperatura del A.R.

Para la aplicación de la ecuación 5 se debe tener en cuenta que la presencia de baffles en las lagunas incrementa la longitud de recorrido del A.R., y que el valor W corresponde al ancho total de la laguna.

C. APLICACIÓN DE MODELOS CINÉTICOS. [2]

Para la aplicación de los modelos cinéticos en la selección del régimen de mezcla se recurre a la información de la DBO y DQO obtenida durante el período de caracterización. Esta información se depura estadísticamente utilizando el criterio establecido por Veltz quien concluyó que el coeficiente de variación de DBO en A.R.D. para comunidades pequeñas se encuentra entre el 30 y 40 %; para comunidades medias varía entre el 20 y 30%, y el comportamiento de los datos diarios de DBO se ajustan a una distribución de probabilidad normal.

En los cuadros 2 y 3 se muestran los datos necesarios para la aplicación de estos modelos y que serán utilizados en la fase experimental que sigue a continuación.

V. FASE EXPERIMENTAL

Para la aplicación de la metodología propuesta se usarán los datos del estudio de caracterización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tocancipá, ubicada al norte de la Sabana de Bogotá. El sistema de tratamiento está conformado por la estructura de llegada y aforo, tratamiento preliminar y tratamiento secundario además de una laguna para el secado de lodos y una estructura de salida.

Los parámetros de caracterización se presentan en los cuadros 2 y 3; en el cuadro 2 los datos de DQO y DBO han sido ordenados y se han depurado de acuerdo con lo discutido anteriormente.

Cuadro. 2 Características geométricas lagunas de estabilización de Tocancipá.

	Ancho W (m)	Long. Recorrido (m)	Profund. Z (m)	TRH t (días)	Temp. A.R. (°C)
Lag. Prim	137	480	2	42	17,8
Lag. Sec.	92	320	2	17	17,8

Cuadro 3. Información depurada de DBO y DQO

Muestra No.	DQO (mg/L)			DBO (mg/L)		
	AFLUENTE	E de PASO	EFLUENTE	AFLUENTE	E de PASO	EFLUENTE
1	276	102	9	426	62	78
2	280	127	21	409	60	77
3	284	131	25	369	59	65
4	284	131	34	352	58	64
5	314	140	38	342	57	57
6	322	157	38	329	55	56
7	331	165	47	311	55	54
8	339	170	55	301	52	52
9	348	170	55	295	49	52
10	373	174	59	295	48	51
11	382	182	59	294	47	48
12	390	191	59	273	44	48
13	407	191	68	266	39	35
14	415	195	72	234	38	29
15	462	208	72	208	25	27
16	470	212	76	155	22	26
17	475	216		120	22	23
18	483	220				
19	500	229				

Promedio	375,53	174,26	49,19	292,88	46,59	49,53
Desv. Est.	75,52	35,93	19,92	81,13	13,23	16,86
Coef. Var.	20,1%	20,6%	40,5%	27,7%	28,4%	34,0%
Máximo	500	229	76	426	62	78
Mínimo	276	102	9	120	22	23

Con la información depurada, se procede a aplicar algunos de los modelos cinéticos para determinar el régimen que se presenta en una laguna.

El estudio experimental no contempló el uso de trazadores para determinar el régimen de flujo, éste se determinó mediante el modelo propuesto por el CEPIS y la aplicación de los modelos cinéticos

VI. APLICACIÓN DEL MODELO DEL CEPIS.

Al reemplazar los datos geométricos de las lagunas (cuadro 2) en la ecuación 5 se obtienen los siguientes valores del coeficiente de dispersión d :

Cuadro 4. Coeficientes de dispersión

Laguna	Coefficiente de dispersión, <i>d</i>
• Primaria	0,24529
• Secundaria	0,13088

Los resultados obtenidos muestran (en este caso) una tendencia hacia el régimen de flujo de pistón, ya que *d* se acerca a 0; esta afirmación se debe corroborar con la aplicación de algunos de los modelos cinéticos para diferentes tipos de flujo.

A. ANÁLISIS DE LOS MODELOS CINÉTICOS. [2]

Para la aplicación de los modelos cinéticos, sólo se tendrán en consideración aquéllos definidos para régimen de flujo de pistón y mezcla completa de acuerdo con lo establecido en el cuadro 1.

1.MODELO DE FAIR.

Este modelo está definido para condiciones de mezcla aproximada al flujo de pistón, cinética de decrecimiento de primer orden, y no tiene en cuenta la influencia de lodos en cuanto al aporte de éstos a la DBO.

La ecuación que define el modelo es:

$$Se = \frac{Sa}{(1 + n kt)^{1/n}} \tag{6}$$

Se: Concentración DBO₅ efluente (mg/L). *k*: Constante cinética (días⁻¹).

Sa: Concentración DBO₅ afluente (mg/L). *t*: Tiempo de retención hidráulico (días).

n: Factor de respuesta al tratamiento (adimensional).

" El coeficiente *n*, es un factor de medida de la eficiencia del sistema, que involucra tanto el tipo de régimen de flujo, así como el posible retardo en la estabilización ocasionada por la coexistencia en el agua de materiales con diferentes velocidades de reacción." [5]

La ecuación 6, es una expresión general, pues al variar *n* entre 0 y 1 se obtienen las condiciones para los regímenes de flujo de pistón y mezcla completa (modelo de Marais – Shaw) respectivamente. Esta ecuación se transforma de tal manera que *k* sea la pendiente de la línea de tendencia, quedando así:

$$\frac{(Sa^n - Se^n)}{nt} = k Se^n \tag{7}$$

Para determinar qué valor de *n* se ajusta mejor, se itera variando los valores de *n* entre el intervalo señalado, escogiéndose el *n* para el cual se tiene mayor correlación y el intercepto se acerque más al origen. Además el signo de la pendiente debe ser positivo, lo cual indica que se presenta degradación de la materia orgánica.

2.MODELO DE MARAIS-SHAW.

La ecuación del modelo cinético propuesta por Marais-Shaw está determinada para un régimen de mezcla completa con cinética de primer orden bajo la siguiente ecuación (*n* = 1 en la ecuación 6):

$$Se = \frac{Sa}{1 + kt} \tag{8}$$

Al linealizar la ecuación 8, de tal forma que la constante de degradación *k* sea la pendiente de la recta se tiene:

$$\frac{Sa - Se}{t} = \frac{Sr}{t} = kSe \tag{9}$$

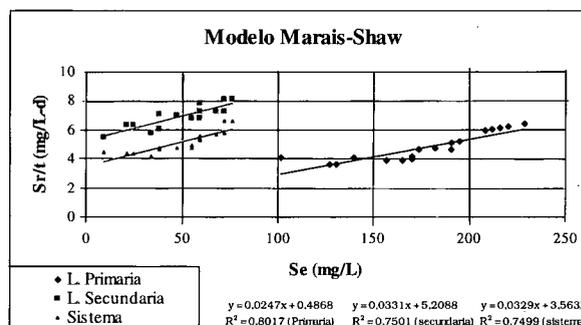


Figura 2. Resultados obtenidos a partir de la información de DQO depurado el cuadro 3

3. MODELO DE FLUJO DE PISTÓN.

Parte de la ecuación propuesta por Fair cuando *n* tiende a 0 obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Se = Sa \exp(-kt) \tag{10}$$

Al graficarse esta ecuación la pendiente *m* de la recta es $\exp(-kt)$, de donde conocido el tiempo de retención, el valor de *k* es:

$$k = \frac{-\ln m}{t} \tag{11}$$

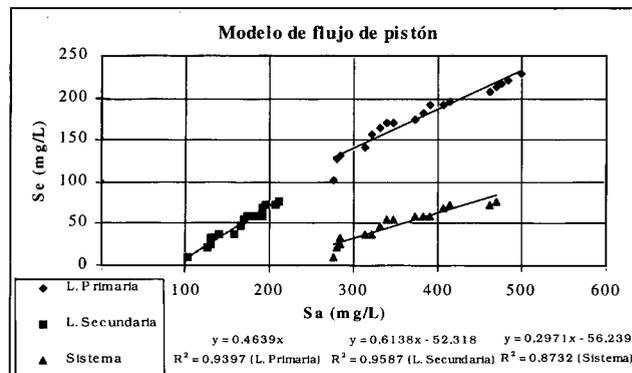


Figura 3. Modelo de Flujo de Pistón

Los valores obtenidos son:

Cuadro 5. Determinación de la constante cinética para el modelo de flujo de pistón.

Laguna	exp(-kt)	Tiempo de Retención (días)	k (días ⁻¹)	R ²
Primaria	0,4639	42	0,018	0,939
Secundaria	0,6138	17	0,029	0,958
Sistema	0,2971	59	0,021	0,873

Al comparar los valores de los coeficientes de determinación (R²) de las constantes cinéticas de degradación de materia orgánica, se encuentra que, aunque ambas presentan buenos resultados, existe una mejor correlación para el modelo de flujo pistón (ver figuras 2 y 3).

4. MODELO DE THIRUMURTHI.

Este modelo esta diseñado para ser aplicado a un régimen de flujo intermedio o disperso, y parte de la ecuación propuesta por Wehner y Wilhelm, de la cual Thirumurthi desarrolló un nomograma.

$$\frac{Se}{Sa} = \frac{4 \cdot a \cdot \exp\left(\frac{1}{2d}\right)}{\left[(1+a)^2 \exp\left(\frac{a}{2d}\right)\right] - \left[(1-a)^2 \exp\left(\frac{-a}{2d}\right)\right]} \quad (12)$$

Donde: $a = \sqrt{1 + (4 \cdot k \cdot t \cdot d)}$

En la mayoría de lagunas de estabilización con coeficientes de dispersión menores de 2 es común utilizar la ecuación 12 simplificada de la siguiente forma:

$$\frac{Se}{Sa} = \frac{4a \exp[(1-a)/(2d)]}{(1+a)^2} \quad (13)$$

La ecuación 13 puede utilizarse sin cometer errores significativos, si el valor de d es menor a 2.

Cuadro 6. Resultados Iteración para el coeficiente de dispersión d

	Se/Sa *	d	a	k (días ⁻¹)	TRH (días)	Se/Sa**
Lag. Primaria	0,4639	0,001	1,0015	0,0183	42	0,4639
Lag. Secundaria	0,6138	0,0007	1,0039	0,0287	17	0,6140
Sistema	0,2971	0,001	1,0024	0,0206	59	0,2971

* Los resultados hallados experimentalmente corresponden a las pendientes de las líneas de tendencia que se muestran en la figura 3.

** Valores obtenidos de las iteraciones a partir del coeficiente d .

CONCLUSIONES

Dada la importancia que tiene el régimen de mezcla en la degradación de materia orgánica es necesario conocer con precisión el fenómeno hidráulico que se presenta en cada laguna de estabilización.

Los elementos de juicio dados anteriormente, como el uso de trazadores, el modelo del CEPIS y la aplicación de algunos de los modelos cinéticos, pueden ser un buen soporte para la determinación del régimen de acuerdo con las condiciones económicas de cada estudio.

En el caso de las lagunas de estabilización de Tocancipá, en donde se aplicó esta metodología, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Al aplicar la ecuación empírica del CEPIS el coeficiente de dispersión d (cuadro 4), muestra una clara tendencia hacia el régimen de flujo de pistón, mostrando en la laguna primaria un valor de 0,245 y en la secundaria 0,131 que de acuerdo con el modelo de Thirumurthi se confirma este régimen de flujo.
- Con la aplicación de los modelos cinéticos, en primer lugar el modelo de Marais-Shaw, utilizado para regímenes de flujo de mezcla completa, se encontró que los coeficientes de determinación (R²) son 0,80, 0,75 y 0,75 para las lagunas primaria, secundaria y el sistema respectivamente. En segundo lugar, el modelo de flujo de pistón describió mejor el comportamiento de las lagunas, obteniendo coeficientes de determinación de 0,94, 0,96 y 0,87 mejores que el modelo anterior. Finalmente, en el modelo de Thirumurthi, al iterar el valor del coeficiente de dispersión se notó una tendencia mucha más fuerte hacia el régimen de flujo de pistón en donde se obtuvieron unos valores de 0,001 en la laguna primaria, 0,0007 en la laguna secundaria y 0,001 en el sistema. Pero estos valores se encuentran condicionados al valor de la constante cinética k a la cual se encuentra operando la laguna (valores obtenidos en la figura 3).

Nomenclatura:

σ_c^2 : Varianza de la curva C en forma adimensional (adim.).

σ_t^2 : Varianza de la curva C en función de t (min²).

C: Concentración del trazador.

λ : Tiempo (min.).

$\bar{\lambda}$: Tiempo promedio (min.).

d : Coeficiente de dispersión (adim.).

t : Tiempo de retención hidráulico, TRH (días).

T: Temperatura del A.R. (°C).

Z: Profundidad (m.).

L: Longitud de recorrido del A.R. (m.).

W: Ancho de la laguna (m.).

Se: Concentración DBO₅ efluente (mg/L).

k: Constante cinética (días⁻¹).

Sa: Concentración DBO₅ afluente (mg/L).

t:Tiempo de retención hidráulico (días).

n:Factor de respuesta al tratamiento (adimensional).

m: Pendiente de la recta (adim.)

BIBLIOGRAFÍA

- 1.ALAYÓN,E., *"Determinación del número de dispersión en el sistema de lagunas de estabilización de Chía"*, Tesis de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá D.C. 1996
- 2.ALAYÓN,W.E., Y MONSEGNY,C.E., *"Cinética de degradación de materia orgánica en lagunas"*, Tesis de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá D.C., 1999
- 3.FERRARA,R.A. Y HARLEMAN,D.R., Hydraulic modeling for waste stabilization ponds. *Journal of the Environmental Engineering Division. ASCE*, Vol. 107 No EE4, pag.817-830, 1981.
- 4.ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. *"Avances en el tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización"*, Cepis, Lima, Perú.
- 5.ORTIZ, M., *"Consideraciones sobre el diseño de lagunas facultativas"*, Trabajo presentado a la Universidad Nacional de Colombia para la promoción a Profesor Asistente.
- 6.POLPRASERT, CH. Y BHATATTARAI, K., "Modelo de dispersión para estanques de estabilización de aguas residuales," *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. III No.1, pág. 45-59 Febrero 1985