

## UNA CINÉTICA DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

Por: Alvaro Orozco Jaramillo  
Ingeniero Civil

### INTRODUCCION

Dentro de la tecnología para combatir la contaminación del ambiente, un lugar muy importante es ocupado por los procesos biológicos de tratamiento de las aguas negras y las aguas residuales industriales. Dentro de éstos, el proceso de los lodos activados y el de lagunas aireadas, son de gran importancia pues obtienen grandes reducciones de DBO y sólidos.

El proceso de lodos activados es usado extensamente en EE. UU. y Europa, gracias a lo cual, ha sido posible la obtención de muchos parámetros de operación y diseño, especialmente en lo referente al tratamiento de las aguas negras domésticas. Sin embargo, en lo que respecta a los residuos líquidos industriales -RLI-, la generalización de parámetros no ha sido posible, puesto que la composición de tales desechos varía considerablemente entre las diferentes industrias. Y aún, entre dos RLI procedentes de dos factorías que procesen el mismo producto, cabe esperar composiciones distintas, o mejor, respuestas distintas al tratamiento biológico.

Por lo anterior, los especialistas han coincidido que para obtener las normas de diseño para el tratamiento de un específico RLI, es necesario efectuar una simulación de tratamiento a escala de laboratorio con el RLI dado y de ella se pueden obtener las normas deseadas. Aunque la respuesta al tratamiento generalmente no coincide entre diferentes RLI, sí se puede establecer una cinética de remoción, que defina el comportamiento de cualquier RLI en un tratamiento biológico. En este artículo nos referiremos siempre al proceso de lodos activados (aunque las conclusiones pueden extenderse a lagunas aireadas y al tratamiento anaerobio de los lodos), proponiendo una cinética de remoción y procedimiento de laboratorio que permita la identificación del proceso biológico.

Los resultados obtenidos son principalmente modificaciones a los modelos propuestos por Eckenfelder, Monod y otros, tal como aparece en los libros "Water Pollution Control" de Eckenfelder y Ford y en "Wastewater Engineering" de Metcalf & Eddy Inc, además de numerosas revistas. También se han tenido en cuenta algunas proposiciones del libro "Water and Wastewater Engineering" de Fair, Gayer y Okun. Sin embargo las ecuaciones finales encontradas no aparecen en ninguna bibliografía conocida por el autor, y responden en forma más cabal al proceso biológico, tal como se puede apreciar en la comprobación experimental que aparece al final.

# I. PRESENTACION DE LA TEORIA

## 1) Nomenclatura Utilizada:

A continuación enumeramos la nomenclatura utilizada, y las unidades de medida. Nomenclatura adicional aparecerá explicada cuando sea pertinente:

$S$  = Sustrato en el tanque de aireación para condiciones estables de trata-

Sustrato en el tanque de aireación para condiciones estables de trata-

Sustrato en el tanque de aireación para condiciones estables de trata-

$S$  = Sustrato en el tanque de aireación para condiciones estables de trata-

$S$  = Sustrato en el tanque de aireación para condiciones estables de tratamiento - CET - medido en Mg/l de  $DBO_5$ .

$S_o$  = Sustrato afluente al tanque en Mg/l de  $DBO_5$ .

$Q$  = Caudal del RLI en l/hora.

$V$  = Capacidad del tanque de aireación en l.

$T_d = \frac{V}{Q}$  = Tiempo de detención del tanque de aireación en horas.

$X_a$  = Concentración de lodos activados en el tanque de aireación medido en Mg/l de SSVLM.

$t$  = Tiempo, medido en horas a partir del instante en que se obtienen las CET.

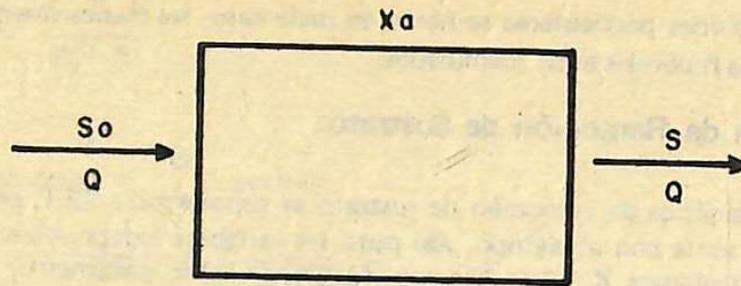
$R_r$  = Velocidad de utilización de oxígeno por los microorganismos en Mg/l-hora.

## 2) Hipótesis de Funcionamiento:

Todas las conclusiones obtenidas se basan en el cumplimiento de las siguientes hipótesis, las cuales por demás, pueden ser obtenidas con bastante aproximación en la práctica:

a. El RLI entra al tanque aireador de volumen  $V$ , a una rata constante  $Q$ , con una concentración de sustrato  $S_o$ . En el tanque aireador se afecta una **mezcla instantánea y completa** de tal suerte que el sustrato efluente tendrá la misma concentración  $S$  del tanque de aireación. (Ver Fig. 1):

b. El ambiente en el tanque de aireación debe ser propicio para la vida de los microorganismos aerobios. Así siempre habrá suficiente Oxígeno disuelto (OD) para



**FIGURA 1**

la respiración, y suficientes nutrientes (N, P, etc.). El pH será ajustado al valor adecuado entre 6,5 y 9,0 y los elementos tóxicos se suponen inexistentes.

También se supondrá controlado el crecimiento de flora y fauna microscópica que no sea recomendable en los lodos activados.

c. Las ecuaciones de la cinética se cumplen sólo cuando existan condiciones estables de tratamiento –CET–, esto es, cuando:

- c-1. El sustrato efluente ( y por consiguiente el del tanque de aireación), S, permanezca estable.
- c-2. La velocidad de utilización de Oxígeno, Rr, permanezca constante.
- c-3. El sustrato afluente, S<sub>o</sub>, sea estable.
- c-4. Los SSVLM, X<sub>a</sub>, permanezcan aproximadamente constantes.
- c-5. Los valores de S deben ser lo suficientemente pequeños, para signifi-

car una reducción de sustrato,  $\frac{S_o - S}{S_o} \times 100$ , del 70% o más.

d. Se supondrá además que el RLI no tiene valores considerables de SSV, ni tampoco el efluente. Esto implica que los análisis de DBO<sub>5</sub> deben ser hechos de muestra filtrada. Lo anterior no resta generalidad, pues sólo intervendrían en el balance de materiales como una suma o una resta. Esta hipótesis puede no ser necesaria.

e. Las ecuaciones de la cinética serán dirigidas a explicar:

- e-1. La velocidad de remoción de sustrato.
- e-2. Los requerimientos de Oxígeno.
- e-3. La producción de lodos.

Consideraciones particulares se harán en cada caso, las cuales sin embargo se desprenden de las hipótesis aquí formuladas.

### 3) Ecuación de Remoción de Sustrato:

Como la cinética de remoción de sustrato se supone para CET, entonces lógicamente,  $S$  no varía con el tiempo. Así pues, las variables independientes de  $S$  son  $t_d$  y  $X_a$ . Si controlamos  $X_a$ , y lo hacemos funcionar como parámetro, entonces, para cada  $X_a$  definido hay una función  $S = S(t_d)$ . Ahora,  $-\frac{ds}{dt_d}$ , significa la remoción de sustrato (por ello el signo menos) con el  $t_d$ , o mejor, la velocidad de remoción de sustrato. Si dividimos por el parámetro  $X_a$ , entonces tenemos:

$$-\frac{ds}{X_a dt_d} \quad (1)$$

Que puede ser entendida como la velocidad de remoción de sustrato, por unidad de  $X_a$ . Como en cierta medida,  $X_a$  es un indicador del número de "Obreros" biológicos que trabajan en la remoción del sustrato (medido como DBO), la ecuación (1) tiene un significado bastante claro.

La variación de (1) con  $S$  ha sido encontrada por Monod, como de la forma que tiene la figura 2, la cual corresponde a la ecuación diferencial siguiente:

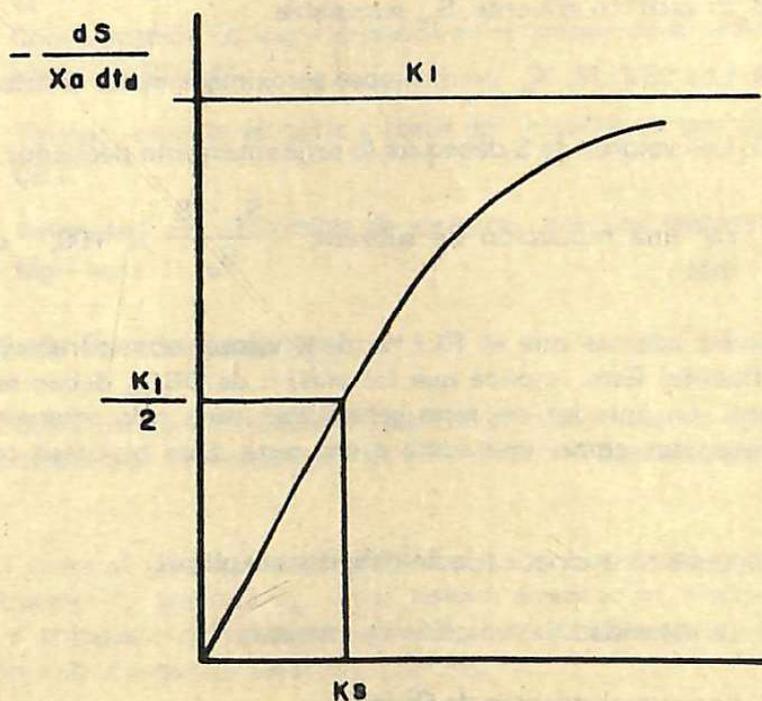


FIGURA 2

$$-\frac{ds}{dt_d} = \frac{K_1 X_a S}{K_s + S} \quad (2)$$

Donde:

$K_1$  : Máximo  $-\frac{ds}{dt_d}$  posible.

$K_s$  : Concentración de S cuando  $-\frac{ds}{dt_d} = \frac{K_1}{2}$

Sin embargo, tal ecuación implica dos constantes desconocidas, las cuales sólo se pueden hallar con valores de  $-\frac{ds}{dt_d}$ , muy aproximados, (únicos posibles en el laboratorio para tal hipótesis(2)), lo cual introduce errores adicionales.

Por otra parte, para valores de remoción del 70% o más, que son los que interesan a un tratamiento biológico, la variación de  $-\frac{ds}{X_a dt_d}$  con S es una recta, tal como lo comprueban los resultados de laboratorios. Así, con esta condición adicional, la ecuación diferencial de la remoción es:

$$-\frac{ds}{dt_d} = K X_a S \quad (3)$$

Donde K es la pendiente de la recta :

$$-\frac{ds}{X_a dt_d} = K S \quad (4)$$

Tal como se ve en la figura No. 3.

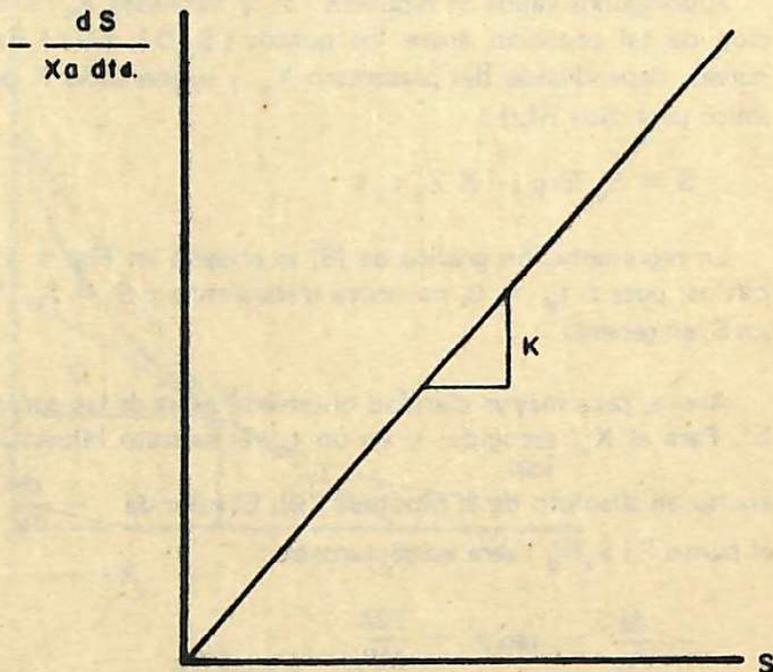


FIGURA 3

El valor de K es característico de cada RLI, y si graficamos, para valores obtenidos experimentalmente,  $-\frac{ds}{X_a dt_d}$  Vs S, obtendremos una recta cuya pendiente nos dará el valor de K. Como S y  $X_a$  son propiedades fácilmente medibles en el laboratorio, bastaría encontrar una forma de medir  $-\frac{ds}{dt_d}$  para resolver el problema. Varios han apelado a la aproximación finita siguiente:

$$-\frac{ds}{dt_d} = \frac{S_o - S}{t_d} = \frac{S_o - S}{V/Q} \quad (5)$$

Con (5), y usando la hipótesis (2), obtendríamos:

$$\frac{S_o - S}{X_a t_d} = \frac{K_1 S}{KS + S} \quad (6)$$

Con (5), y usando la hipótesis (3), obtendríamos:

$$\frac{S_o - S}{X_a t_d} = K S \quad (7)$$

Las fórmulas (6) y (7) son ampliamente usadas. Sin embargo, la aproximación (5) trae un error inherente que puede ser muy grande como vamos a ver a continuación:

Supongamos válida la hipótesis (3), y tomemos  $X_a$  como parámetro. La integración de tal ecuación entre los puntos  $(S_o, 0)$ ,  $(S, t)$  da la siguiente familia de curvas, dependiendo del parámetro  $X_a$ , y suponiendo K definido (pues su valor es único para cada RLI).:

$$S = S_o \text{ Exp}(-K X_a t_d) \quad (8)$$

La representación gráfica de (8) se observa en Fig. 4. Los límites escogidos son obvios, pues si  $t_d = 0$ , no habrá tratamiento y  $S = S_o$ . Y a cada  $t_d$  corresponde un S, en general.

Ahora, para mayor claridad observemos una de las curvas (8), arbitraria (ver Fig. 5). Para el  $X_{ai}$  escogido, y en un  $t_d$ , el sustrato efluente será  $S_1$  (pues (8) no se aparta en absoluto de la hipótesis (3)). El valor de  $-\frac{ds}{dt_d}$ , (el signo es obvio) en el punto P  $(S_1, t_d)$  será evidentemente:

$$-\frac{ds}{dt_d} = \tan \theta = \frac{NM}{MP} \quad (a)$$

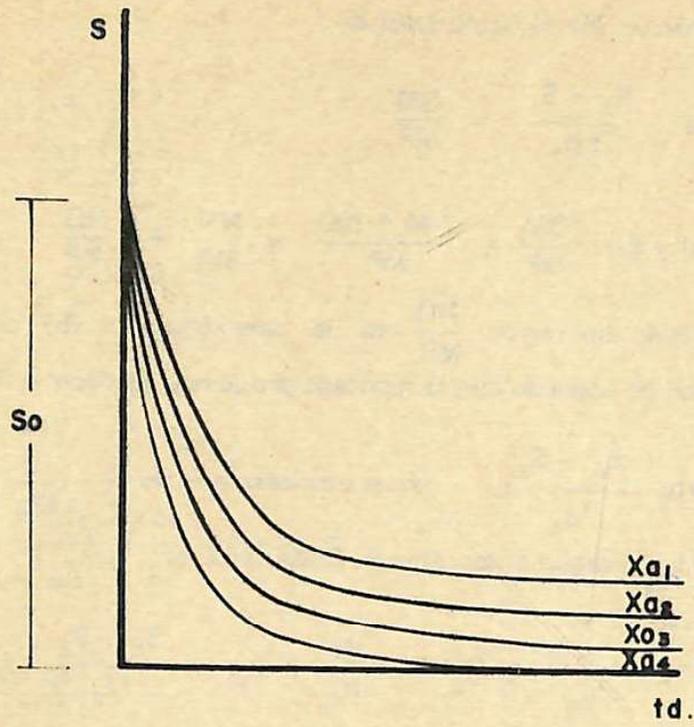


FIGURA 4

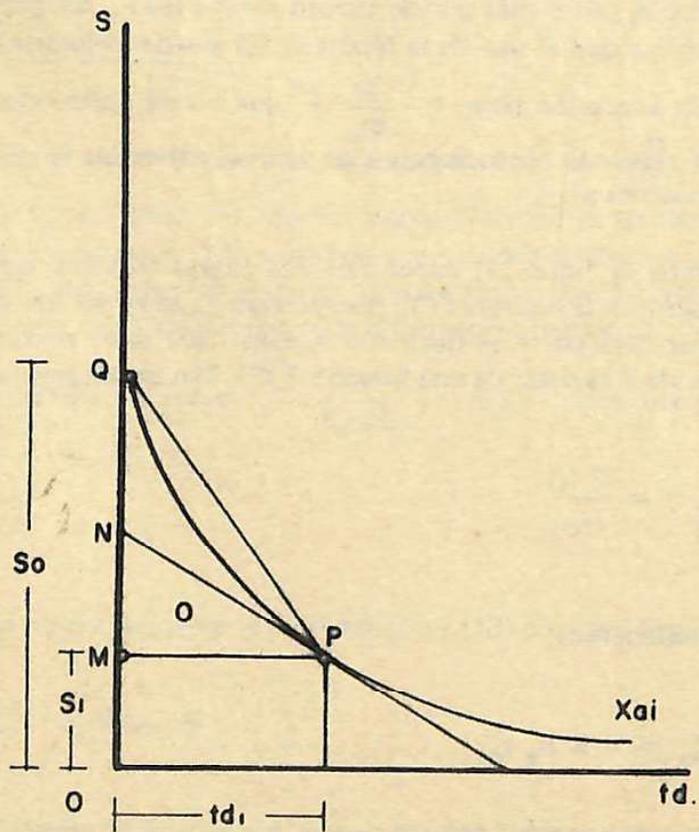


FIGURA 5

Pero la aproximación (5) dá como valor de :

$$-\frac{ds}{dt} \text{ a } \frac{S_0 - S_1}{t_{d_1}} = \frac{QM}{MP} \quad (b)$$

Comparando (a) y (b)  $\frac{QM}{MP} = \frac{NM + NQ}{MP} = \frac{NM}{MP} + \frac{NQ}{MP}$

Así pues, hay un error  $\frac{NQ}{MP}$  en la aproximación (5) con respecto al  $(-\frac{ds}{dt})$  real de acuerdo con la hipótesis propuesta, es decir la hipótesis (3).

Por otra parte  $\frac{S_0 - S_1}{t_{d_1}}$ , no es otra cosa que las  $(-\frac{ds}{dt_d})$  promedio, en el intervalo  $(0, t_{d_1})$  según el teorema de Rolle, es decir:

$$\overline{\left(-\frac{ds}{dt_d}\right)} = \frac{1}{t_{d_1} - 0} \int_{s_0}^{s_1} \left(-\frac{ds}{dt_d}\right) dt_d = \frac{S_0 - S_1}{t_{d_1}}$$

En definitiva podemos concluir entonces que la aproximación (5) puede generar un error apreciable, tanto más grande cuanto mayor sea  $t_d$ , dentro de cierto rango. Lo anterior implica que el uso de la hipótesis (3) puede mejorarse notablemente si encontramos un expresión para  $(-\frac{ds}{dt_d})$  que no sea aproximación, y que además pueda ser tabulada cómodamente de valores obtenidos en el laboratorio. Tal cosa nos proponemos aquí.

Si observamos la figura 5, encontraremos lógico suponer que una expresión exacta (de acuerdo a la hipótesis (3), huelga repetir), debe ser inversamente proporcional a  $t_d$ . Por otra parte es necesario suponer que debe depender también, de alguna manera, de S es decir de una función F (S). Matemáticamente sería:

$$\left(-\frac{ds}{dt_d}\right) = \frac{F(s)}{t_d} \quad (9)$$

Ahora, de (8) obtenemos:

$$\text{Ln } S/S_0 = -K X_a t_d$$

$$t_d = \frac{\text{Ln } S_0/S}{K X_a} \quad (10)$$

(10) en (9) :

$$\left( - \frac{ds}{dt_d} \right) = \frac{F(S)}{\frac{\text{Ln } S_o/S}{K X_a}}$$

$$\left( - \frac{ds}{dt_d} \right) = \frac{K X_a F(S)}{\text{Ln } S_o/S} \quad (11)$$

Igualando (3) y (11) :

$$- \frac{ds}{dt_d} = \frac{K X_a F(S)}{\text{Ln } S_o/S} = K X_a S$$

$$F(S) = S \text{ Ln } S_o/S \quad (12)$$

Y (12) en (9) :

$$\left( - \frac{ds}{dt_d} \right) = \frac{S \text{ Ln } S_o/S}{t_d} \quad (13)$$

Tal expresión es matemáticamente exacta y define  $\left( - \frac{ds}{dt_d} \right)$  teniendo los valores  $S$ ,  $S_o$ , y  $t_d$ , es decir, los mismos necesarios para la aproximación (5). La conveniencia de la expresión (13) es debido a que su deducción hace uso únicamente de la hipótesis propuesta, sin efectuar ninguna aproximación, además de que es fácilmente obtenible en el laboratorio toda información requerida.

Luego para graficar la recta  $-\frac{ds}{X_a dt_d} = K S$ , debe usarse la siguiente ecuación:

$$\frac{S \text{ Ln } S_o/S}{X_a t_d} = K S \quad (14)$$

Sin embargo, una forma más general de la ecuación (13) es: (Ver Fig. 6).

$$\frac{S \text{ Ln } S_o/S}{X_a t_d} = K S - Y \quad (15)$$

El valor de  $Y$  resulta de la práctica, en que muchas veces se encuentra un sustrato remanente,  $S_r$ , el cual es imposible remover, Esto hace que la recta no pase por el origen, sino que corte el eje de la  $S$  por  $S = S_r$ , siendo  $Y$  el valor donde la recta

corta el eje de las ordenadas.

Resumiendo, la ecuación (15) define la cinética de remoción de sustrato en una planta de lodos activados, que se puede extender al proceso de lagunas aireadas y descomposición anaerobia, siempre que se cumpla la hipótesis expuesta en el numeral 3o.).

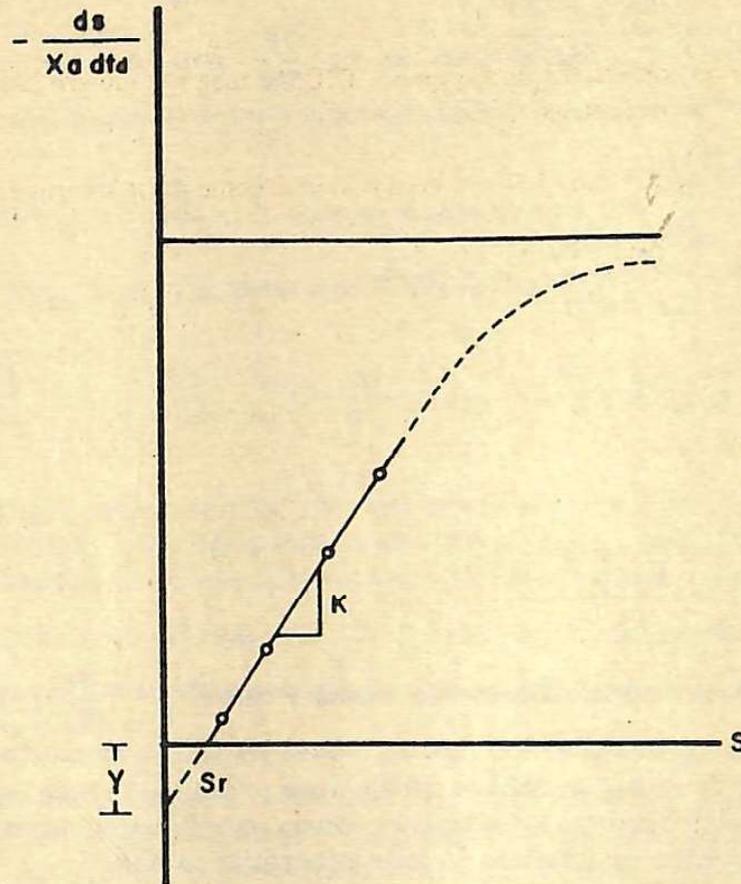


FIGURA 6

#### 4) Utilización de Oxígeno:

Una vez encontrada la ecuación que define la cinética de remoción de sustrato, es importante encontrar la ecuación que defina los requerimientos de Oxígeno de la población microbiana. Para ello supondremos que el OD presente siempre será suficiente para suministrar el requerido, y ello se logra manteniendo el nivel de OD entre 1,0 y 2,0 Mg/lto. en el tanque aireador.

Recordemos que cuando existen CET la velocidad de utilización de Oxígeno,  $R_r$  (Mg/l/hora) debe permanecer constante. Por otra parte, es sabido que los factores que intervienen en la utilización de Oxígeno son tres, a saber:

- a. El oxígeno utilizado por la población biológica en la remoción de sustrato, el cual debe ser lógicamente, proporcional a la velocidad de remoción de sustrato, es decir a  $\left( -\frac{ds}{dt_d} \right)$
- b. El Oxígeno utilizado en la respiración endógena de los microorganismos, que es proporcional a  $X_a$ .
- c. La demanda inmediata de Oxígeno, DIO, la cual, en nuestro caso, será considerada no-significativa.

Estos factores ocasionan el  $R_r$ , lo cual matemáticamente se expresa así:

$$R_r = a \left( -\frac{ds}{dt_d} \right) + b X_a \quad (16)$$

Siendo:

- a: Factor que relaciona la velocidad de remoción de sustrato a la velocidad de utilización de Oxígeno por tal concepto, adimensional.
- b: Factor que relaciona los  $X_a$  con la velocidad de utilización de Oxígeno por concepto de respiración endógena, en dimensiones de horas<sup>-1</sup>.

Reemplazando (13) en (16) y dividiendo por  $X_a$ , queda:

$$\frac{R_r}{X_a} = a \frac{S_e \text{ Ln } S_o/S_e}{X_a t_d} + b \quad (17)$$

En la ecuación (17), que define la cinética de utilización de Oxígeno,  $\frac{R_r}{X_a}$  se puede asimilar como la velocidad de utilización de Oxígeno por unidad de SSVLM, que es el indicador —ya lo dijimos— del número de "Obreros" biológicos. El significado del resto de la ecuación es claro recordando el anterior numeral. La  $R_r$  (llamado "Oxygen Uptake" en países de habla inglesa) puede ser obtenido fácilmente en el laboratorio. Así, para obtener el valor de las constantes a y b basta graficar

$$\frac{R_r}{X_a} \text{ Vs } \frac{S_e \text{ Ln } S_o/S_e}{X_a t_d}$$

que debe dar una recta. (ver fig. 7).

En lo referente al análisis del  $R_r$ , es muy importante la confiabilidad de los resultados.

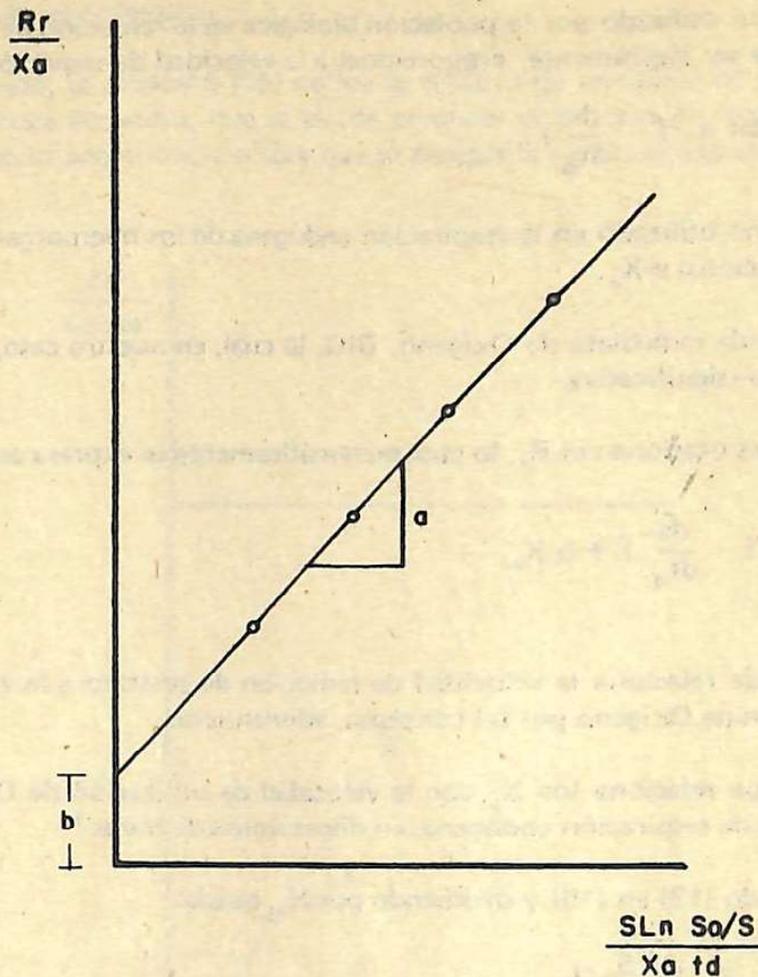


FIGURA 7

### 5) Producción de Lodos:

Otro factor importante de estudiar en el diseño del tratamiento biológico, es el volumen de lodos producidos diariamente, con el fin de escoger en forma adecuada el equipo de manejo y procesamiento de ellos. En este numeral tendremos en consideración la hipótesis propuesta, de que los SSV en el agua de entrada y salida son no-significativos.

De todos modos, en la producción total representarían el término  $(X_e - X_s) Q$ .

Teniendo en cuenta esta aproximación, recordamos que la producción de lodos, una vez tenidas las CET, varía con el tiempo, es decir, si no eliminamos parte de los SSV, la concentración de los  $X_a$  aumentará con el tiempo. Los factores que intervienen en ello son los siguientes:

- a. El aumento de lodos por síntesis celular, el cual, lógicamente, debe ser proporcional a  $(-\frac{ds}{dt_d})$ .

b. La disminución de lodos debido a la oxidación celular, lo cual será proporcional a  $X_a$

Luego,  $\frac{dX_a}{dt}$  (Mg/l/hora), será el aumento de SSV por litro y por hora, lo que matemáticamente se expresa así:

$$\frac{dX_a}{dt} = a_1 \left( - \frac{ds}{dt_d} \right) - b_1 X_a \quad (18)$$

Con:

$a_1$ : Factor que relaciona la velocidad de remoción de sustrato, con la velocidad de producción de lodos, adimensional.

$b_1$ : Factor que relaciona la velocidad de eliminación de lodos por oxidación, con los  $X_a$  en  $\text{horas}^{-1}$ .

Dividiendo por  $X_a$  y reemplazando:

$$\frac{dX_a}{X_a dt} = a_1 \frac{S \text{ Ln } S_o/S}{X_a t_d} - b_1 \quad (19)$$

Es importante hacer hincapié en la forma como se obtenga el  $\frac{dX_a}{dt}$ . Se conoce que  $X_a$  debe permanecer constante. Pero es indudable que  $X_a$  se puede controlar, a nivel de laboratorio, sólo con purgas periódicas, que pueden ser diarias. En este intervalo a veces pueden encontrarse aumentos de los  $X_a$  en un 50% y más. En tal caso, el ciclo de purgas debe acortarse. Sin embargo si los aumentos de  $X_a$  por día no exceden del 30%, sí se puede considerar como valor constante el  $X_a$ .

Para tal caso, el valor de  $\frac{dX_a}{dt}$  puede hacerse con la aproximación finita  $\frac{\Delta X}{\Delta t}$ , pues de (19), y para condiciones estables, tenemos que  $\frac{dX_a}{dt}$  es constante:

$$\frac{dX_a}{dt} = H$$

$$\int_{X_a}^{X_a + \Delta X} dX_a = H \int_0^{\Delta t} dt$$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{dX_a}{dt} \quad (20)$$

Repetimos la importancia de que  $\frac{\Delta X}{X_a}$  no exceda 0,30 y en el caso de que

esto suceda en un día, entonces debe buscarse un delta t menor que un día, tal que se cumpla lo anterior. Esto es obvio, pues el error introducido es grande, ya que, en

realidad,  $\frac{dX_a}{dt}$  es aproximadamente proporcional a  $X_a$ .

En efecto, reemplazando en (18):

$$\frac{dX_a}{dt} = a_1 K S X_a - b X_a$$

$$\frac{dX_a}{dt} = (a_1 K S - b) X_a$$

Pero si asumimos que S no sufre grandes variaciones con respecto a las de  $X_a$ , entonces,

$$a_1 K S - b = R = \text{constante}$$

$$\text{y } \frac{dX_a}{dt} = R X_a \quad (21)$$

Integrando (21) :

$$\int_{X_a}^{X_a + \Delta X} \frac{dX_a}{X_a} = R \int_0^{\Delta t} dt$$

$$\text{Ln } \frac{X_a + \Delta X}{X_a} = R \Delta t$$

$$R = \frac{\text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t} \quad (22)$$

(22) en (21) :

$$\frac{dX_a}{dt} = \frac{X_a \text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t} \quad (23)$$

Ahora reemplazando (23) en (19), queda

$$\frac{\ln \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t} = a_1 \frac{S \ln S_0/S}{X_a t_d} - b_1 \quad (24)$$

La ecuación (24) debe ser usada en lugar de la (19), cuando la aproximación finita de  $\frac{dX_a}{dt} = \frac{\Delta X_a}{\Delta t}$  no es suficientemente exacta, es decir, cuando  $\frac{\Delta X}{X_a}$  excede a 0,30. Si no lo excede usamos entonces a:

$$\left( \frac{\Delta X}{X_a \Delta t} = a_1 \frac{S \ln S_0/S}{X_a t_d} - b_1 \right) \quad (25)$$

Para obtener  $a_1$  y  $b_1$  basta graficar para CET, a  $\frac{dX_a}{X_a dt}$  vs  $\frac{S \ln S_0/S}{X_a t_d}$  tomado como  $\frac{dX_a}{dt}$  a  $\frac{\Delta X}{\Delta t}$  ó  $\frac{\ln \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t}$ , según sea más conveniente. (ver Fig. 8).

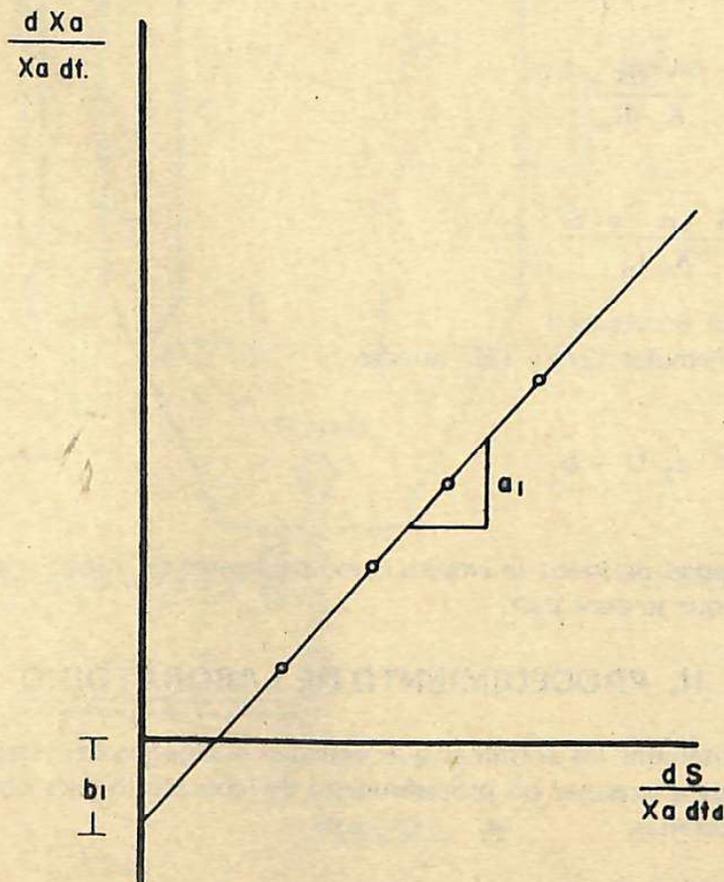


FIGURA 8

Vale la pena recordar que un parámetro bastante utilizado en procesos biológicos por lodos activados, es la edad de los lodos. Si nosotros evacuamos cada  $dt$  los lodos producidos  $dX_a$ , entonces la edad promedio de los lodos  $T_1$ , será:

$$T_1 = \frac{X_a dt}{dX_a} \quad (26)$$

Utilizando las anteriores fórmulas, entonces (26) queda:

$$T_1 = \frac{X_a \Delta t}{\Delta X} \quad (27)$$

$$\text{ó } T_1 = \frac{\Delta t}{\text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)} \quad (28)$$

Si nosotros llamamos  $U$  la velocidad de remoción de sustrato por unidad de  $X_a$ , es decir,

$$U = - \frac{ds}{X_a dt_d}$$

$$U = \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{X_a t_d} \quad (29)$$

Entonces las fórmulas (24) y (25) quedan :

$$\left( \frac{1}{T_1} = a_1 U - b_1 \right) \quad (30)$$

A veces la edad de lodos se emplea como parámetro de diseño y la fórmula (30) es entonces la que se debe usar.

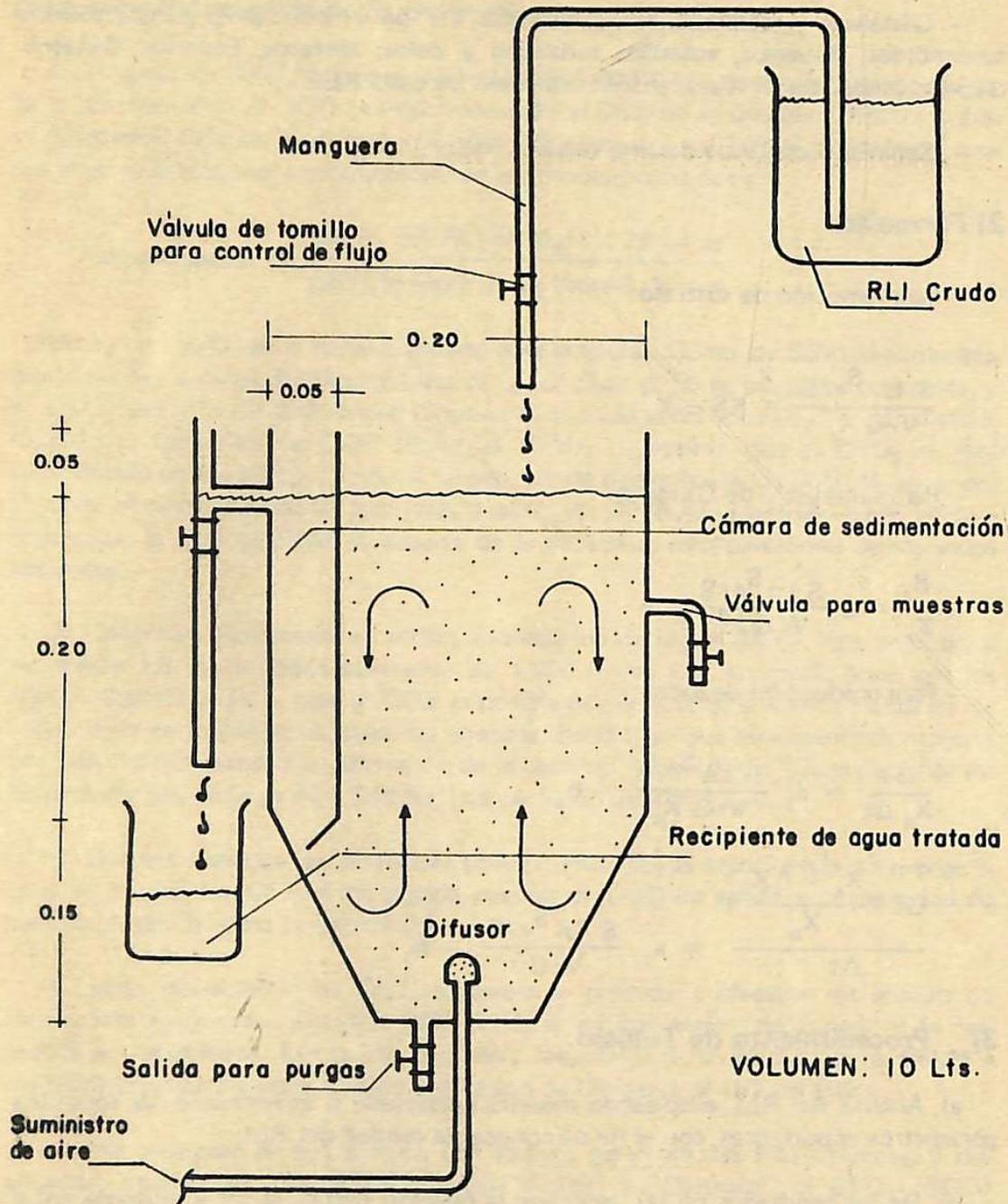
## II. PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

Una vez obtenidas las fórmulas que explican la cinética del tratamiento biológico, pasaremos a exponer un procedimiento de laboratorio para obtención de las constantes necesarias.

### 1) Equipo de Laboratorio:

Es necesario el siguiente equipo:

– Reactor, de capacidad conocida, con adecuados servicios para drenaje, toma de muestra, control de nivel, suministro de aire, etc. Un esquema de un reactor (tanque de aireación) es mostrado en la figura 9.



**FIGURA 9**

– Equipos de medición tales como: rotámetro para medir suministro de aire (opcional); cronómetro y cilindro graduado para medir tasa de flujo.

- Celda analizadora de Oxígeno.
- pH-metro.
- Cristalería y reactivos, bomba de vacío, etc, para medir: DBO y DQO; sólidos suspendidos, disueltos, volátiles; turbiedad y color; Nitratos, Fosfatos; Oxígeno disuelto (método Win Kler); análisis especiales de cada RLI.
- Siministro continuo de aire, vacío y, RLI.

## 2) Fórmulas:

- Para remoción de sustrato:

$$\frac{S \text{ Ln } S_0/S}{V/Q X_a} = KS - Y$$

- Para suministro de Oxígeno:

$$\frac{R_r}{X_a} = a \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{V/Q X_a} + b$$

- Para producción de lodos:

$$\frac{\Delta X}{X_a \Delta t} = a_1 \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{V/Q X_a} - b_1$$

$$\text{ó } \frac{\text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t} = a_1 \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{V/Q} - b_1$$

## 3) Procedimiento de Trabajo:

- a) Análisis del RLI, empleando muestra ponderada si es necesario, de todos los parámetros importantes, con el fin de conocer la calidad del RLI.
- b) De los resultados de (a), averiguar la relación DBO : N : P y ajustarla entre 150 : 5 : 1 y 90 : 5 : 1 con el fin de garantizar suministro de nutrientes; puede hacerse con un nitrato y un fosfato.
- c) Ajustar el pH con NaOH ó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a un valor entre 7,0 y 8,0.
- d) Efectuar la aclimatación de lodos. Puede hacerse con lodo semilla, ó simplemente por aireación continuada, manteniendo un flujo constante. Esta aclimatación

se puede obtener entre 2 y 3 semanas.

e) En el período de aclimatación, chequear en el LM el DQO (y  $DBO_5$ ), los SSLM y SSVLM, y la velocidad de utilización de Oxígeno diariamente. Además chequear el Oxígeno disuelto, y mantenerlo entre 1,0 y 3,0 Mg/l.

f) Una vez los SSVLM lleguen a un nivel de 1,000 Mg/l, chequear cuidadosamente la disminución del DQO (en este momento el DBO no es útil pues demora 5 días el resultado). Cuando la disminución del DQO llegue a un 70%, mantener entonces la carga que se esté suministrando en ese momento, es decir:

$$\text{Carga orgánica} = \frac{DBO_5 \text{ del RLI en Mg/l} \times 24 \text{ horas}}{SSVLM \text{ Mg/l} \times t_d \text{ (horas)} \times \text{día}}$$

Un  $t_d = V/Q$  de 6 horas es bueno para empezar. Como los SSVLM aumentan diariamente, la carga disminuirá pues el  $t_d$  (es decir el Q) se mantiene constante, y el  $DBO_5$  del RLI no debe tener variaciones considerables (pues  $S_o = \text{constante}$ ). Cuando la remoción de DQO llegue al 70%, es posible que el  $DBO_5$  se esté removiendo en un 90% o más. Si se permite un aumento de los SSVLM, entonces se corre el riesgo de que las bacterias queden sin alimento, entrando luego en fase endógena, lo cual ocasiona la muerte de la población microbiológica de los lodos activados.

g) Controlar diariamente el índice volumétrico de lodos (IVL). Este se obtiene de dividir los ml de lodos asentados de 1.000 ml de LM en media hora, por los SSLM. Cuando el IVL, pasa de 300, es posible que comience el abultamiento de los lodos, fenómeno peligroso, pues los aniquila. Parece ser que este abultamiento está asociado con la excesiva proliferación de la bacteria "Spherotilus", la cual puede ser controlada con dosis de 40 a 200 Mg/l de peróxido de hidrógeno.

h) Una vez llenados los anteriores puntos, entonces se mantiene la carga orgánica y se buscan las CET. Esto sucede cuando el DQO de salida y la velocidad de suministro de Oxígeno se estabilizan.

i) Luego de obtener las CET, entonces se procede a efectuar los análisis de laboratorio requeridos. Estos pueden dividirse en dos clases: de control y de respuesta al tratamiento. Los de control son : los ml/1000 ml asentados; los SSLM y los SSVLM; el pH; la velocidad de utilización de Oxígeno; el IVL; el OD.

Los de respuesta al tratamiento son análisis paralelos del RLI afluente, y del efluente; pueden ser: los SS, ST y SD "Antes" y "Después"; el  $DBO_5$  (DQO) "antes" y "después"; el pH, idem; el color y la turbiedad, etc.

j) Una vez efectuados los anteriores análisis por tres, cuatro ó cinco días consecutivos, se estudian para observar si las CET se mantuvieron. Si esto sucede, todos los análisis efectuados deben mantenerse más o menos constantes. El valor tomado como representativo será el promedio de todos los análisis de cada parámetro, tomados durante las CET.

k) Si el resultado obtenido es confiable, entonces se procede a variar la carga, para obtener puntos nuevos. Esto se hace variando los SSLM o el  $t_d$ , o ambos. Se repiten los anteriores pasos hasta obtener nuevamente CET. La carga debe ser aumentada si la remoción de  $DBO_5$  es menor del 90% y disminuída en caso contrario. De todos modos deben obtenerse por lo menos tres (3) puntos en CET, para las ecuaciones dadas en b).

#### 4) Análisis de los Resultados:

Una vez obtenidos los valores promedios de los análisis de tres o cuatro CET, se pasa a efectuar el análisis de resultados, con el fin de obtener los K, Y, a, b,  $a_1$  y  $b_1$  característicos del RLI.

Inicialmente se efectúan las siguientes identidades:

$S_o$  :  $DBO_5$  promedio del RLI crudo, en Mg/l.

S :  $DBO_5$  filtrado promedio, del licor efluente para cada una de las condiciones estables de tratamiento, en Mg/l.

V : Capacidad del reactor en litros.

Q : Caudal de entrada en l/hora.

$t_d$  : Tiempo de detención en horas.

$\Delta t$  : Tiempo entre dos muestras de SSLM en horas.

$R_r$  : Velocidad de utilización de Oxígeno en Mg/l/hora.

$X_a$  : SSVLM en Mg/l.

$\Delta X$  : Diferencia de SSVLM en  $\Delta t$ , sin purgar lodos en el intervalo.

Luego de obtener los valores para las anteriores identidades, se tabulan así:

TABLA No. 1

Prueba No.	Carga Organic. lbs $DBO_5$ / día <hr/> Lbs. SSVLM	$S_o$	$X_a$	$t_d$	$S_e$	$\frac{S \text{ Ln } S_o/S}{t_d X_a}$	IVL	$\frac{S_o - S}{S} \times 100 \%$
1								
2								
3								
4								

TABLA No. 2

Prueba No.	Carga Organica	R <sub>r</sub>	X	R <sub>r</sub> /X <sub>a</sub>	$\frac{\text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t}$
1					
2					
3					
4					

De las dos tablas anteriores se procede a graficar, los siguientes valores:

$$\frac{S \text{ Ln } S_0/S}{X_a t_d} \quad \text{Vs.} \quad S \quad (1_d)$$

$$\frac{R_r}{X_a} \quad \text{Vs.} \quad \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{X_a t_d} \quad (2_d)$$

$$\frac{\text{Ln} \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)}{\Delta t} \quad \text{Vs.} \quad \frac{S \text{ Ln } S_0/S}{X_a t_d} \quad (3_d)$$

$$\text{IVL} \quad \text{Vs.} \quad \frac{\text{lbs DBO}_5/\text{día}}{\text{lbs SSVLM}} \quad (4_d)$$

La graficación de tales puntos, da las siguientes curvas, de las cuales se obtienen: K, Y, a, b, a<sub>1</sub>, y b<sub>1</sub>. ( Ver Figs. 10, 10a, 10b y 10c ).

### III. APLICACION DE LA CINETICA

Para obtener la comprobación de las fórmulas propuestas, es necesario tener resultados de ensayos de laboratorio de plantas pilotos para lodos activados y lagunas aireadas.

#### 1) Planta de Lodos Activados:

Los residuos líquidos de una industria textil tienen una composición más o menos variable, aunque esto puede ser agravado por el hecho de que una muestra

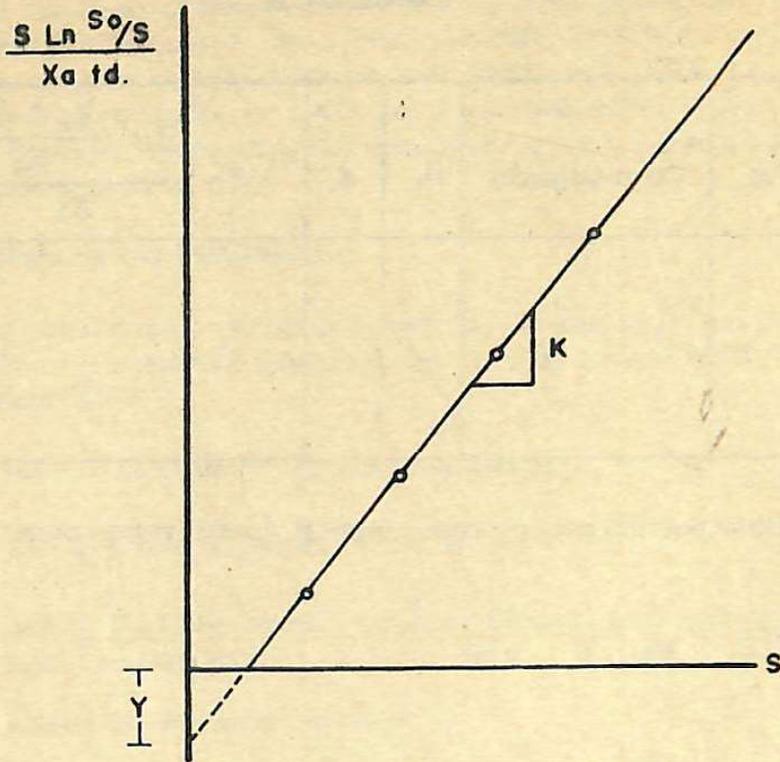


FIGURA 10

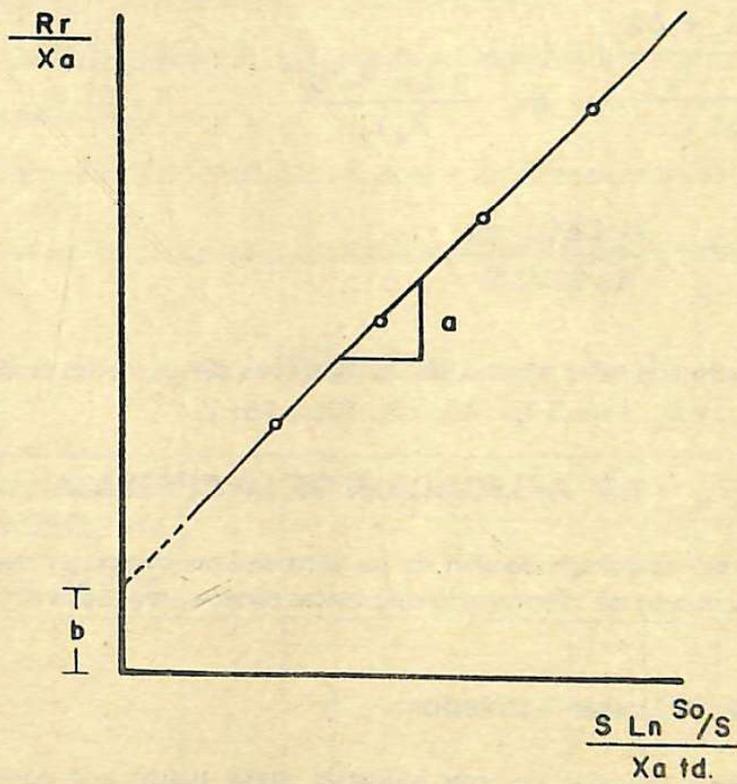


FIGURA 10-A

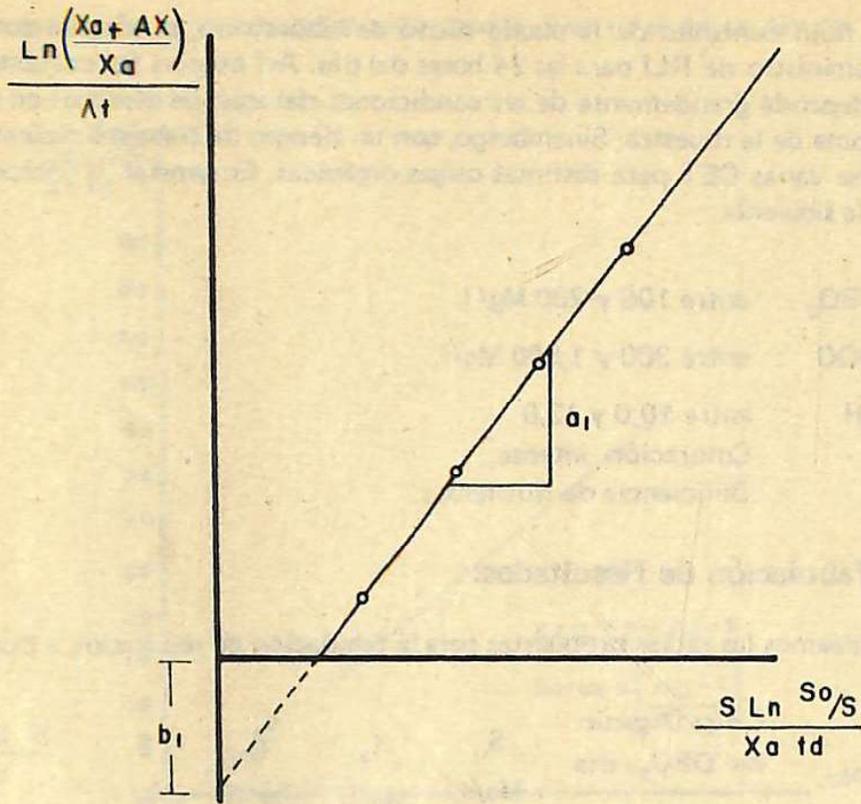


FIGURA 10-B

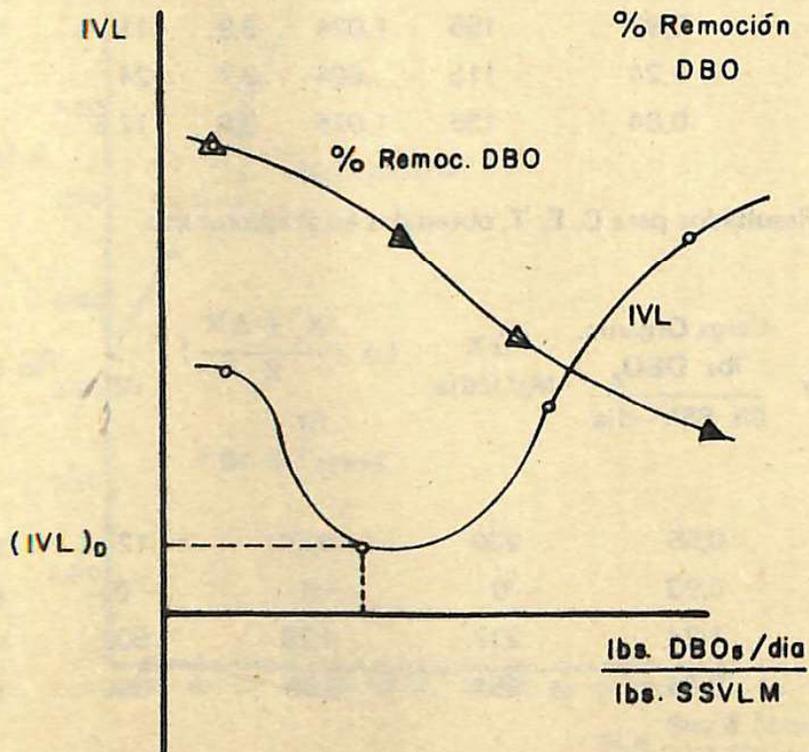


FIGURA 10-C

para el flujo continuo de la planta piloto de laboratorio, es tomada con el fin de tener suministro de RLI para las 24 horas del día. Así pues, el funcionamiento de la planta depende grandemente de las condiciones del agua de desechos en el momento de toma de la muestra. Sin embargo, con un tiempo de trabajo suficiente, pueden obtenerse varias CET para distintas cargas orgánicas. En general, la composición del RLI es la siguiente:

DBO<sub>5</sub> : entre 100 y 200 Mg/l.

DQO : entre 300 y 1,500 Mg/l.

pH : entre 10,0 y 13,0

Coloración intensa.

Deficiencia de Nutrientes.

## 2) Tabulación de Resultados:

Empleamos las tablas propuestas para la tabulación de resultados, a continuación:

Prueba No.	Carga Organic. lbs DBO <sub>5</sub> /día lbs SSVLM	S <sub>o</sub> Mg/l.	X <sub>a</sub> Mg/l.	t <sub>d</sub> horas	S Mg/l.	$\frac{S}{t_d} \ln \frac{S_o}{S}$ h <sup>-1</sup> × 10 <sup>-3</sup>
1	0,55	130	1.076	5,3	7	3,6
2	0,93	155	1.024	3,9	11	7,25
3	1,24	115	604	3,7	24	16,8
4	0,84	135	1.075	3,6	12,5	7,7

Tabla I : Resultados para C. E. T. obtenidos en el laboratorio.

Prueba No.	Carga Organic. lbs DBO <sub>5</sub> lbs SSV-día	ΔX Mg/l/día	$\ln \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)$ Δt horas <sup>-1</sup> × 10 <sup>-2</sup>	IVL	% Remoción DBO <sub>5</sub>
1	0,55	230	0,80	127	95 %
2	0,93	- 0 -	- 0 -	- 0 -	93 %
3	1,24	217	1,28	500	87 %
4	0,84	259	0,90	366	91 %

Tabla II : Resultados para C. E. T. obtenidos en el laboratorio.

La graficación de las curvas propuestas puede observarse en las figuras 11, 12, 13a y 13b.

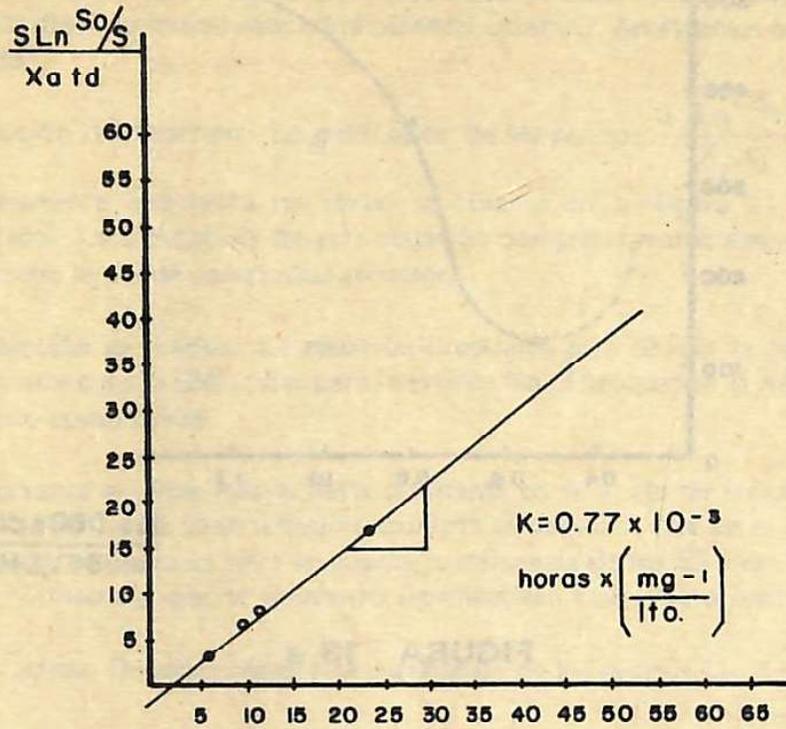


FIGURA 11

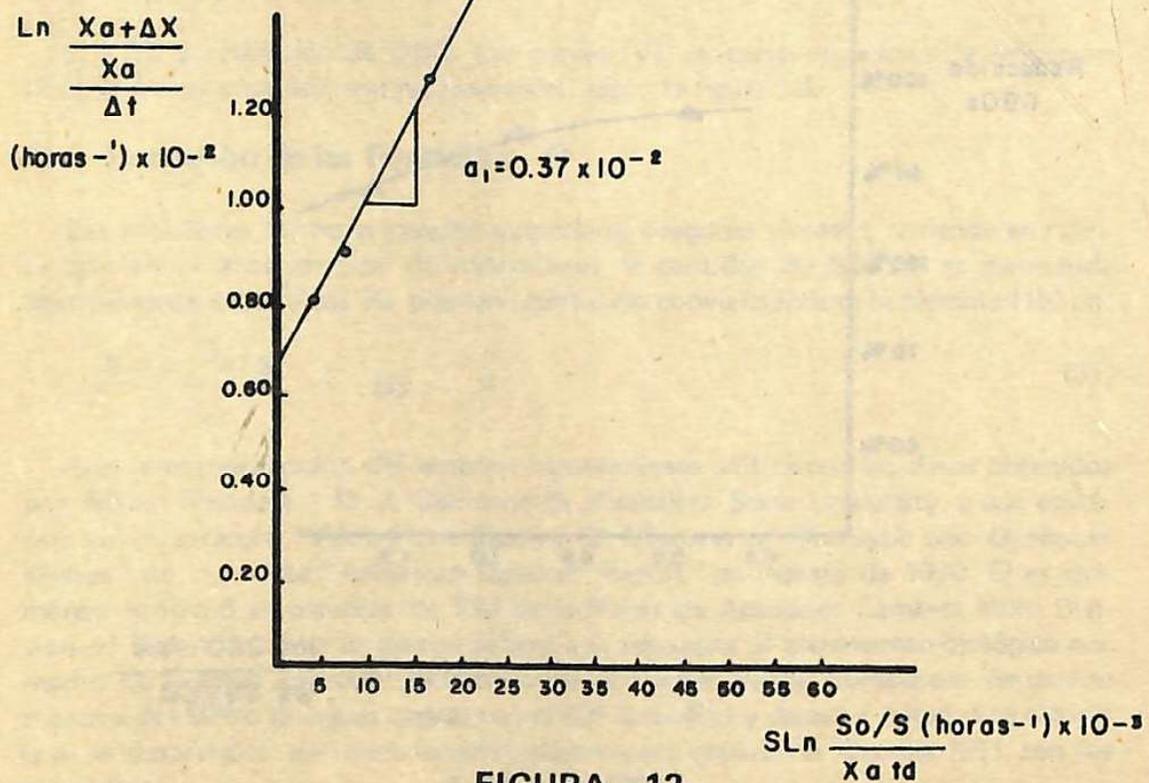


FIGURA 12

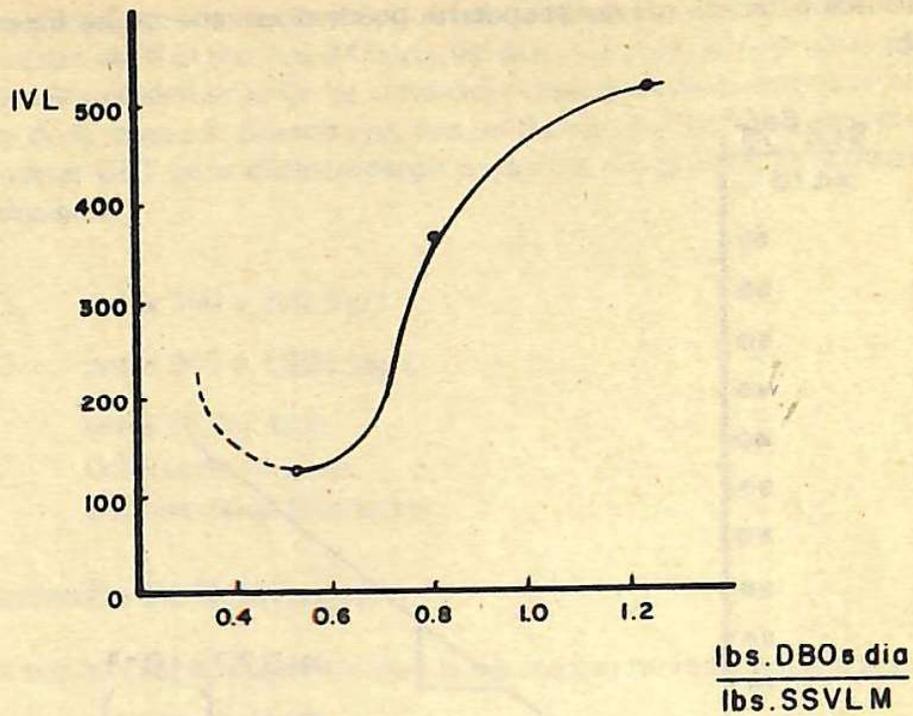


FIGURA 13 a

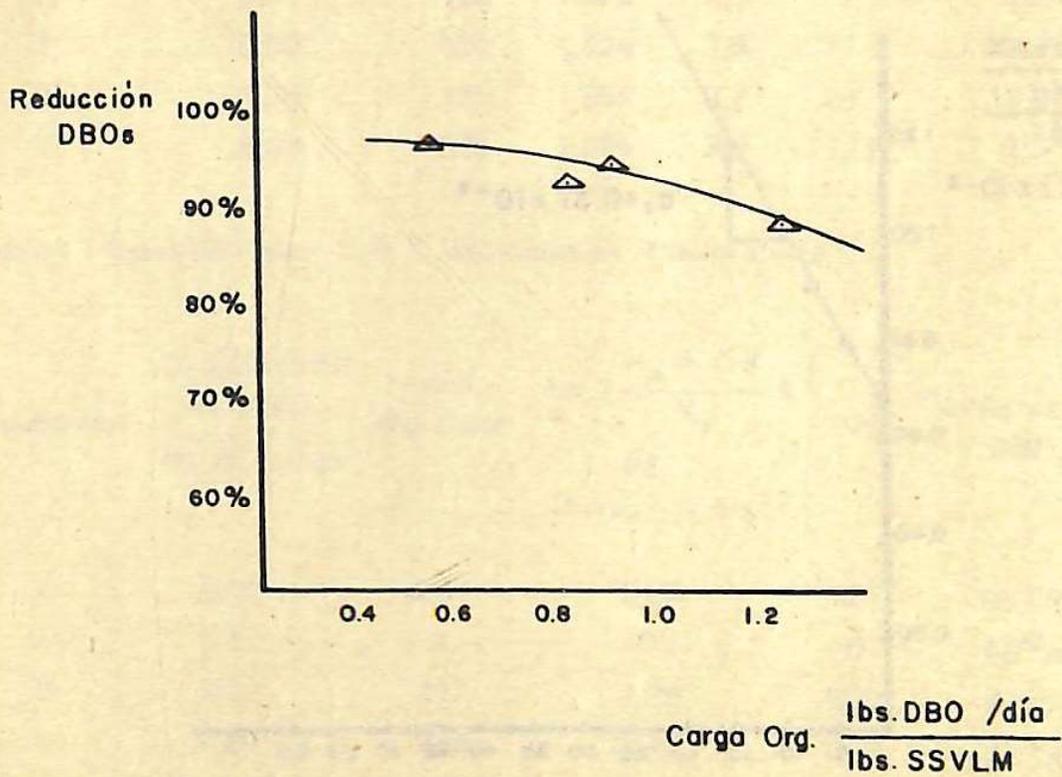


FIGURA 13 b

### 3) Análisis de los Resultados:

La comprobación de las ecuaciones propuestas se desprende de las gráficas obtenidas con los datos suministrados en el numeral anterior.. Analicemos cada ecuación por separado.

a) Remoción del Sustrato: La graficación de los puntos  $\frac{S}{X_a} \frac{\ln S_0/S}{t_d}$  Vs. S delinea claramente una recta tal como se observa en la figura 11, y como se había pensado. La utilización de esta ecuación compite favorablemente con otras fórmulas, como lo puede comprobar el lector.

b) Producción de Lodos: La ecuación propuesta para definir la producción de lodos es en este caso la (24), pues para la prueba No. 3 la relación  $\Delta X/X_a$  excede el 0,3 propuesto como límite.

Es importante explicar que la recta resultante corta el eje de las ordenadas por encima del origen. Esta contradicción aparente es debida a que en el análisis de la producción de lodos no se tuvo en cuenta la influencia de los SS en el RLI afluente o efluente, influencia que se demostró significativa. Este efecto hace desplazar la

recta hacia arriba. De todos modos, la correlación de los puntos  $\ln \left( \frac{X_a + \Delta X}{X_a} \right)$  Vs.  $\frac{S}{X_a} \frac{\ln S_0/S}{t_d}$  se muestra satisfactoria.

c) IVL y reducción de DBO: Las curvas IVL vs. carga orgánica, % reducción DBO vs. carga orgánica, son las esperables, según la figura 13.

### 4) Extensión de las Fórmulas:

Las anteriores fórmulas pueden extenderse a lagunas aireadas, teniendo en cuenta que en el anterior tipo de tratamiento, la cantidad de SSVLM es mantenida normalmente baja, y los  $X_a$  pierden significado convirtiéndose la fórmula (15) en:

$$\frac{S}{t_d} \frac{\ln S_0/S}{t_d} = KS - Y \quad (31)$$

Para la comprobación del anterior razonamiento utilizamos los datos obtenidos por Adnan Shindala y M. J. Cullinane de Mississippi State University, y que aparecen en el artículo "Pilot Plant Studies Of Mixtures of Domestic and Dyehouse Wastes" de la revista "American Dyestuff Report" en Agosto de 1970. El experimento consistió en estudiar las RLI de la Planta de Acabados Lambert Mills, Division of Garan, Inc., en lo que se refiere a la respuesta al tratamiento biológico por medio de lagunas aireadas, y combinadas con aguas negras domésticas. Se usaron mezclas del 10% de aguas negras con el 90% de RLI y mitad y mitad. Los valores que se desprenden del mencionado artículo para graficar la fórmula (31), son los siguientes:

50 % A.N. + 50 % RLI				10 % A.N. + 90 % RLI			
No.	$\frac{S \text{ Ln } S_0/S}{t_d}$ Mg/l/día.	S Mg/l	$t_d$ días	No.	$\frac{S \text{ Ln } S_0/S}{t_d}$ Mg/l/día.	S Mg/l.	$t_d$ días
1	16,60	25,3	3	1	35,00	53,6	3
2	5,10	9,15	5	2	15,85	25,1	4
3	3,35	7,3	7	3	10,20	18,5	5
				4	7,75	16,8	6
				5	4,70	13,4	8

a)

b)

Tabla III : Resultados del Experimento de Shindela y Cullinane.

La graficación de los puntos para ambos casos se observa en las figuras 14 y 15, donde se observa la perfecta correlación de los puntos  $\frac{S \text{ Ln } S_0/S}{t_d}$  Vs. S.

Vale anotar (ver Fig. 15) que en el segundo caso existe un punto que se sale ostentiblemente de la recta que forman los restantes. Esto indica que la velocidad

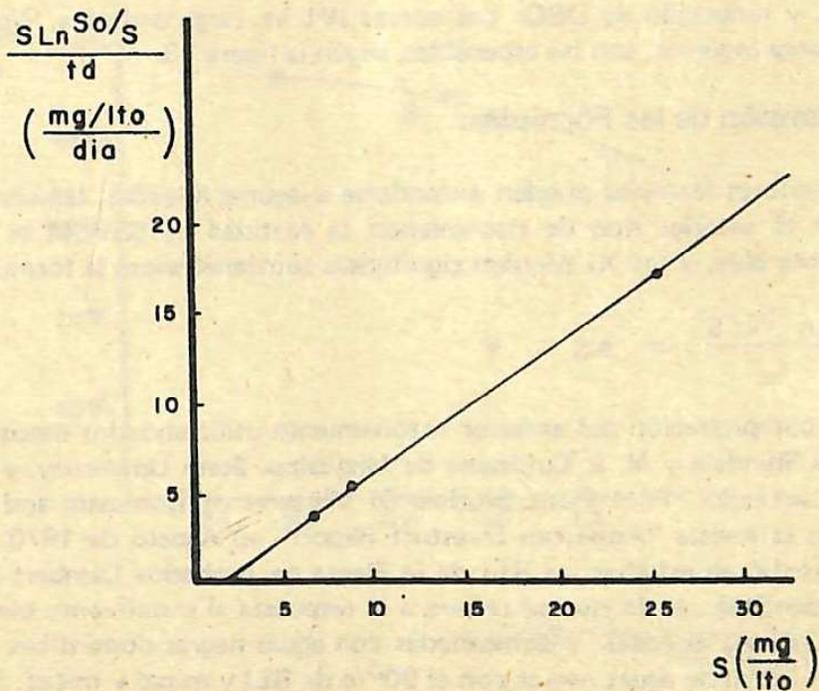


FIGURA 14

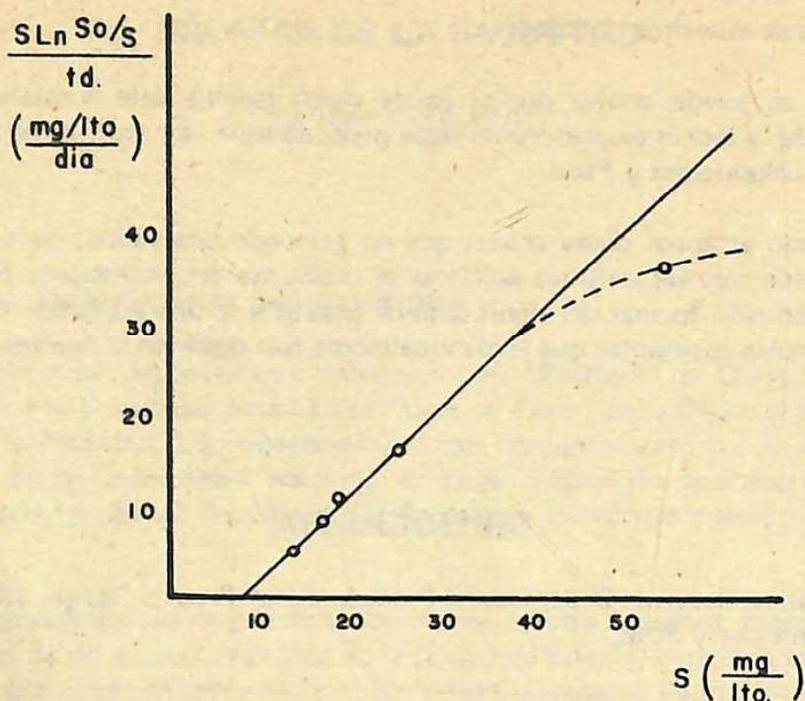


FIGURA 15

de remoción de sustrato está llegando al máximo, y el punto 5 se sale del rango de cumplimiento de la fórmula. Es importante señalar que en este caso, el porcentaje de remoción del  $\text{DBO}_5$  es del 85<sup>o</sup>%, lo que, al parecer, indica que se debería cumplir la fórmula, pues esta se supone válida hasta el 70<sup>o</sup>% de tratamiento. Sin embargo la suposición de lo anterior se hizo para el método de lodos activados, y probablemente, en lagunas aireadas el rango sea más estrecho. De todos modos no cabe duda de la correlación de los otros puntos.

### CONCLUSIONES:

Los resultados anteriores indican que la cinética propuesta cumple satisfactoriamente las condiciones requeridas y aún compite favorablemente con otras fórmulas, por lo menos en los casos aquí analizados, como el lector puede comprobar fácilmente. Tiene adicionalmente el hecho favorable de que su comprobación (parcial) es efectuada con análisis de diferentes laboratorios.

De todos modos, la ecuación que define la remoción de sustrato parece coincidir plenamente con todos los resultados de laboratorio, y con una aproximación no lograda con otras fórmulas. Sin embargo la comprobación plena sólo puede ser efectuada con la aplicación reiterada de la fórmula en investigaciones pilotos similares, y con distintas clases de residuos líquidos.

Respecto a la fórmula de producción de lodos, la única aplicación efectuada fue la mencionada, y con sólo tres puntos. Cabe aquí esperar una mayor comprobación. Lo que sí se podría afirmar con más seguridad, es que las fórmulas de tipo logarítmico definen mejor los fenómenos de las poblaciones biológicas, en lo referente al

tratamiento de desechos líquidos.

Además se puede anotar que si existe algún mérito, éste consiste en que el desarrollo de la teoría es puramente deductivo, aunque, eso sí, tomando de base el modelo de Eckenfelder y Ford.

Por último el autor desea aclarar que no pretende una validez completa de las fórmulas, sino sólo un enfoque adicional al problema del tratamiento biológico, y que la explicación formal del significado de ellas es sólo una aplicación de significados de fórmulas semejantes que tradicionalmente han definido el fenómeno.

## BIBLIOGRAFIA

Water Pollution Control. Experimental Procedures for Process Design. 1970.  
Eckenfelder y Ford.

Wastewater Engineering. 1972.  
Metcalf & Eddy Inc.

Water and Wastewater Engineering. 1966.  
Fair, Geyer y Okun.

Sewerage and Sewage Treatment. 1957.  
Harold E. Babbitt.

Industrial Pollution Control Handbook. 1971.  
Herber F. Lund.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 13a. Edition.  
1971.  
Apha, Awwa, Wpcf.

Chemical Engineering.   Jun.   21/71.  
                                  Mayo   8/72.  
                                  Dic.   11/72.  
                                  Jun.   18/73.

American Dyestuff Reporter. Ago/73.

