

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNICAS DEL AGUA
Y DEL MEDIO AMBIENTE

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA EN MEDIO SOPORTE PERMEABLE

POR

EMILIO EGUIA LOPEZ

TOMO I

Director de Tesis:

JUAN IGNACIO TEJERO MONZON

SANTANDER, FEBRERO 1991

4.- M E T O D O L O G I A

4.-METODOLOGIA

El proceso objeto de estudio, se explica gráficamente por medio de la figura (4.1), en la cual se ha representado el sistema que contiene la biopelícula en un medio soporte permeable.

El sistema está influenciado por: (1) el oxígeno, (2) el medio soporte permeable, (3) el afluente y (4) el ambiente. Estos parámetros definen el efluente del sistema.

Para desarrollar la investigación de acuerdo con este esquema, es necesario cubrir una serie de necesidades tanto materiales como analíticas, que permitan la definición de las variables entrada-salida (I/O) en las situaciones diferentes que se quieren plantear, y que se exponen en el "Diseño experimental".

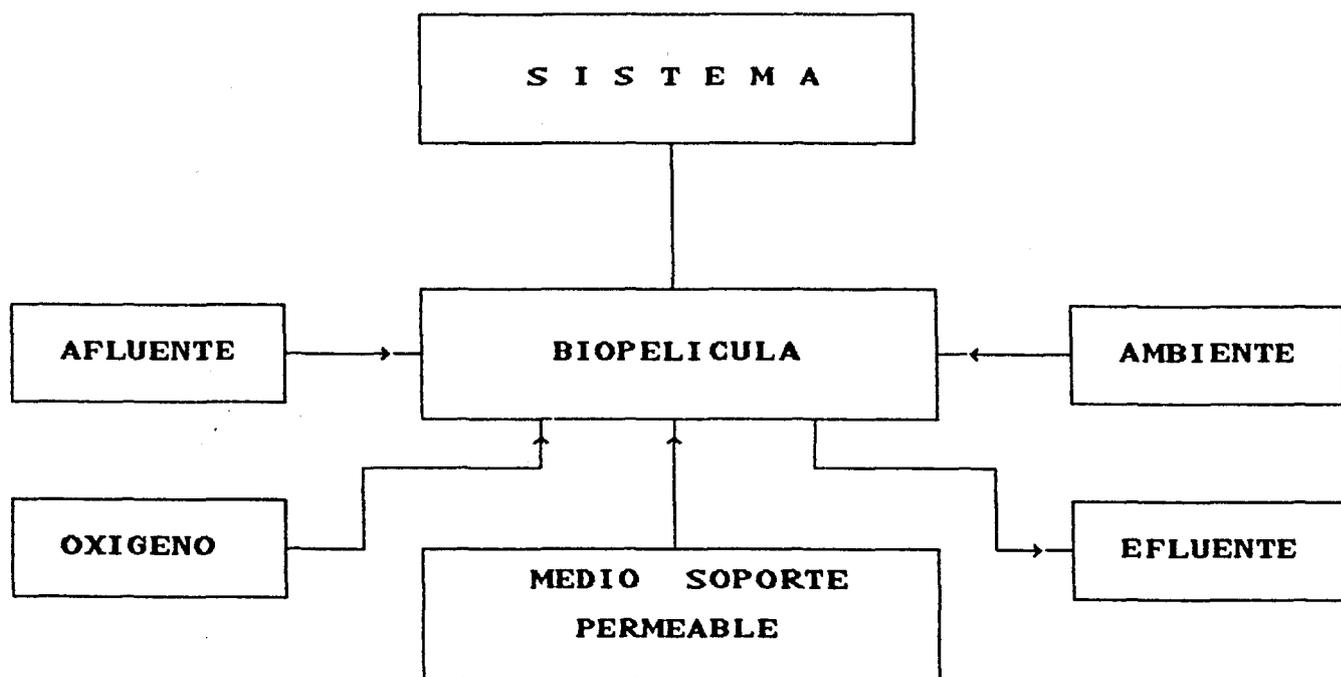


FIG. 4.1.

4.1.- MATERIALES

Para alcanzar los objetivos planteados, se ha diseñado un reactor experimental en el que poder desarrollar una biopelícula sobre el medio soporte permeable elegido. Se han adoptado también sendos sistemas de alimentación de agua residual y aportación de oxígeno, con el fin de conseguir la suficiente flexibilidad para poder fijar diferentes valores de las variables del proceso. A continuación, se describen las características de estos diseños.

4.1.1.- Reactor Experimental.

Para lograr los objetivos propuestos, se construye un reactor de mezcla completa, con dos agitadores movidos por dos motores de c.c. de 0 a 24 v., regulada por una f.a. variable, que permite mantener la condicion establecida y el sentido de giro necesario para que, mientras un agitador aspira el otro impulse.

Estos agitadores estarán situados, respecto al medio soporte, de tal forma que los esfuerzos cortantes sobre la película sean mínimos.

La actividad del crecimiento suspendido será despreciable comparada con la actividad en el medio soporte. Dos de las paredes del sistema que contiene la membrana se desplazarán verticalmente por medio de unas guías adosadas al propio recipiente. De esta forma se asegura que el flujo total, producto de la agitación, siga el recorrido más favorable para el contacto alimento-microorganismos y minimice la posibilidad de crecimiento de biopelícula en dos de las cinco posibles caras del paralelepípedo. No obstante, el "efecto pared" será despreciable debido al mantenimiento

previsto de la planta.

La vasija del reactor es de metacrilato y tiene un volumen de $15,180 \text{ dm}^3$ ($23 \times 22 \times 30 \text{ cm.}$), y una superficie de soporte membranar de $628,32 \text{ cm}^2$ ($17 \times 18,48 \text{ cm}$ cada membrana). El sistema que sirve de marco a estas membranas ocupa un volumen de 4 dm^3 reales. Teniendo en cuenta que el volumen útil, sin sistema soporte, para el agua residual es de $14,7 \text{ dm}^3$, el volumen de líquido que puede contener el recipiente es de $10,7 \text{ dm}^3$. (Valor comprobado experimentalmente teniendo en cuenta el efecto "vela" de la membrana).

El volumen interior del sistema soporte, estará lleno de oxígeno que procede de un recipiente a presión con la correspondiente válvula reductora y válvula dosificadora del caudal necesario para cada conjunto de experimentos. Este gas encerrado suministra el empuje hacia arriba (Principio de Arquímedes) de todo el conjunto soporte, cuya altura se regula por medio de un dispositivo fijo a la estructura del recipiente, que a su vez lo mantiene fijo en una posición única para todos los experimentos*.

El reactor se ha diseñado, en función del sistema

(*):Excepto el experimento sin agitación.

de alimentación de agua residual disponible, que es capaz de dar un rango de caudales de 0 - 6,6 L/h, con el fin de poder obtener una amplia variación de los valores de los parámetros de funcionamiento del proceso. En concreto, los tiempos de retención hidráulico serán de 5,6 y 2,8 horas para unos caudales de 3,82 L/h y 1,91 L/h. Figura 4.2.

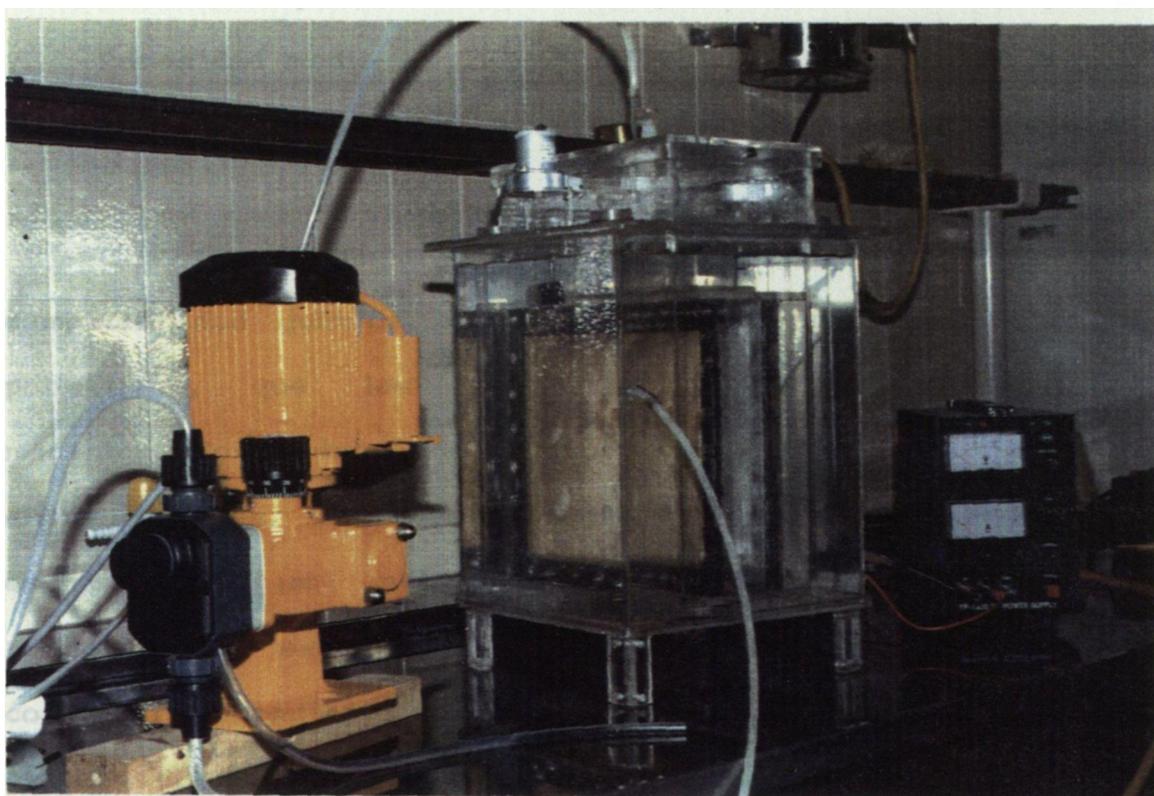


FIG.4.2. Reactor RSP

4.1.2.- Medio Soporte.

Los soportes para la biopelícula son unas membranas de Politetrafluoroetileno de las siguientes características (Millipore) :

Tipo de membrana	PTFE - FHL P	PTFE - FGL P
Tamaño de poro	0,5 μm	0,2 μm
Porosidad media	85 %	70 %
Punto de burbuja	0,49 bar	0,91 bar

Son membranas biológicamente inertes y de amplia compatibilidad química, están unidas a una trama soporte de polietileno, que les proporciona una mayor resistencia mecánica. Son hidrófobos y, por tanto, adecuados para poder difundir gases. El espesor medio de una membrana Fluoropore es de 175 μm que, junto con la porosidad descrita, proporciona excelentes relaciones Presión/Caudal. Esta condición permitió conocer inicialmente los caudales de oxígeno difundidos a través de las membranas en función de la presión y que posteriormente serían comprobados con la válvula de regulación de caudal empleada.

El montaje de las membranas en sus marcos

respectivos, requirió un especial cuidado ya que hubo que adoptar un sistema que permitiera la estanqueidad total y a la vez un tensado suave de la membrana para evitar al máximo el efecto "vela". Se construyeron dos soportes diferentes en cuanto al sistema de fijación de la membrana, ambos manteniendo las condiciones anteriores pero diferenciándose en la facilidad para el montaje y desmontaje de las mismas. Se mantuvo la misma superficie específica en ambos sistemas. Figura 4.3.



FIG.4.3. Sistema soporte de la Biopelícula

4.1.3.- Sistema de aportación de oxígeno

El oxígeno puede ser el sustrato limitante en un proceso aerobio, ya que una célula aerobia será capaz de utilizar los nutrientes que la rodean sólo si la concentración de oxígeno a su alrededor, es decir, disuelto en el líquido, es suficientemente elevada. Aunque Huang, (1984), observó que dicha concentración en un reactor de película fija, tiene un efecto menor en la producción de nuevas células microbianas.

En el sistema diseñado, la situación que se plantea de transferencia de materia gas-líquido, donde el oxígeno se transfiere, se resuelve desde el interior de una cámara separada del agua residual por las membranas descritas anteriormente en las cuales se desarrollará la biopelícula. El oxígeno, por lo tanto, debe disolverse en el medio a la velocidad suficiente para satisfacer la demanda biológica.

Este oxígeno procede de un recipiente a presión, 200 bar, en la salida del cual se monta una válvula reductora que permite utilizar el gas a las presiones relativas

comprendidas entre 0 y 7 bar. Figura 4.4. En la fase experimental se emplean presiones comprendidas entre 70 y 350 milibares que, por supuesto, están por debajo del punto de burbuja de cada membrana empleada.

Montada directamente en el reductor de presión se instala una válvula de regulación, que permite conocer el caudal descargado, a partir del conocimiento de la presión y de la apertura de la válvula, por medio del nomograma correspondiente. Como el valor leído está deducido para el gas nitrógeno, se aplica el coeficiente de corrección para el gas oxígeno. La membrana permite un caudal de filtración determinado para un incremento de presión de 0,7 bar. En el caso que nos ocupa el incremento de presiones es de 0,34 y de 0,05 bar, por lo que realizando el cálculo correspondiente teniendo en cuenta los valores mencionados, resulta:

Pres. en la cara interna de las memb.: 0,35 y 0,25 bar (rel).

Presión media sobre la membrana en el interior del
recipiente: : 0,015 bar (rel).

Incrementos de Presión (ΔP): 0,335 y 0,235 bar

Fracción de la primera vuelta de la reguladora de caudal:
7/16, 5/12, 5/8 y 21/40

Valores leídos directamente del nomograma (VL):

16,18; 14,16; 20,18; 17,3 ($\text{cm}^3/\text{min.}$)

Factor de corrección por la naturaleza del gas empleado (α):

0,93

Densidad del oxígeno a 20°C (ρ): 1,35 Kg/m³

El cálculo se hará aplicando la fórmula siguiente:

$$VL \cdot \Delta P \cdot \alpha \cdot \rho \cdot 10^{-3} \cdot 60.24 / 0,7 = QO_2 \text{ (g.d}^{-1}\text{)}$$

Los resultados son: 14; 12,25; 12,25 y 10,5 (g.d⁻¹)
de Oxígeno difundido.

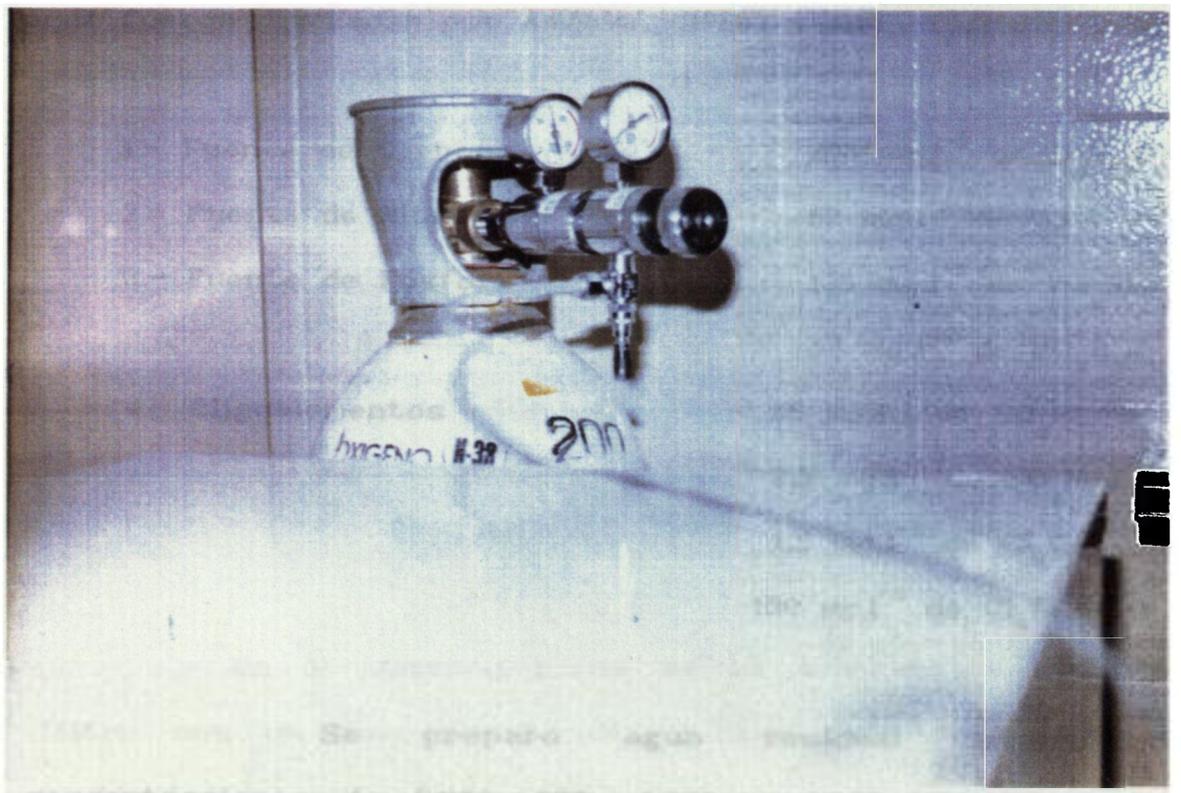


FIG.4.4. Reductora de presión y regulador de caudal.

4.1.4.- Agua Residual Afluyente.

Se utilizará un agua residual artificial o sintética que evite todos los problemas inherentes a un agua residual real, sobretodo el desconocimiento de las características del afluyente al proceso, teniendo el inconveniente del diseño y de la realización de la misma con una determinada periodicidad. Las características de esta agua fueron diseñadas por Amieva, (1988) y son:

1.- Fuente de Carbono	200 mg.l ⁻¹ de C ₆ H ₁₂ O ₆
2.- Fuente de Nitrógeno	63 mg.l ⁻¹ de CINH ₄
3.- Fuente de Fósforo	139 mg.l ⁻¹ de PO ₄ HNa ₂ 67 mg.l ⁻¹ de PO ₄ H ₂ K
4.- Oligoelementos	25 mg.l ⁻¹ de SO ₄ Mg.7H ₂ O 2,5 mg.l ⁻¹ de SO ₄ Mn.H ₂ O 1,5 mg.l ⁻¹ de Cl ₂ Ca 150 µg.l ⁻¹ de Cl ₃ Fe.6H ₂ O

Se preparó agua residual "madre" con concentraciones de 2.000,4.000, 6.000 y 8.000 ppm de Glucosa (C₆H₁₂O₆), variando los demás componentes proporcionalmente a la composición descrita. El agua se almacenó en un recipiente

plástico blanco de 25 litros de capacidad. Como la concentración en el afluente del reactor fué de 200 o 400 ppm de Glucosa, en función del TRH y de las bombas de que se dispuso, se precisó hacer agua cada dos días como máximo.

A la temperatura de 4°C., se bombeó el agua residual al reactor, previo paso por un dispositivo en forma de "Y" donde confluía el agua de dilución que provenía de otro recipiente de 50 litros de capacidad mantenido a temperatura ambiente. Este recipiente recibía el agua corriente previamente decolorada en un filtro dispuesto a tal efecto. La relación de caudales osciló entre 1 a 5 y 1 a 40. Las bombas, una peristáltica de caudal máximo de alimentación igual a 0,06 l.h⁻¹ y otra de membranas de 6 l.h⁻¹ máximo, permitían una capacidad de dilución teórica de 1 a 100. Con ello, se pueden obtener valores de carga orgánica, tiempo de retención, y concentración de sustrato en la alimentación, dentro de los rangos deseados para la experimentación. Figura 4.5.

En la aspiración de ambas bombas se instaló un filtro con un paso de 5 µm, lo que permitió eliminar las partículas del afluente.

También se dispuso de un tanque intermedio con un

termostato para, si fuera necesario, mantener la temperatura del afluente en, aproximadamente, 20°C.. Al estar las temperaturas próximas a este valor, no se utilizó dicho sistema. En la figura 4.6 se representa un esquema general del sistema RSP.

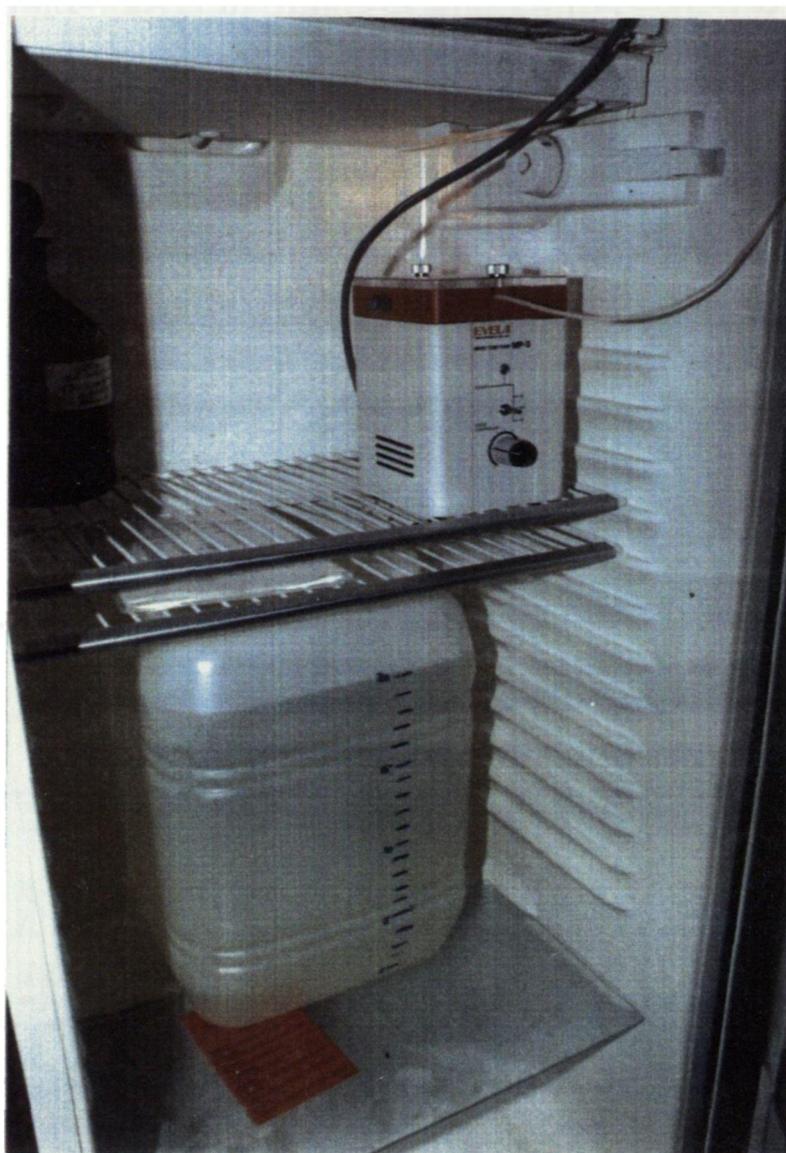


FIG.4.5. Alimentación del agua residual afluente.

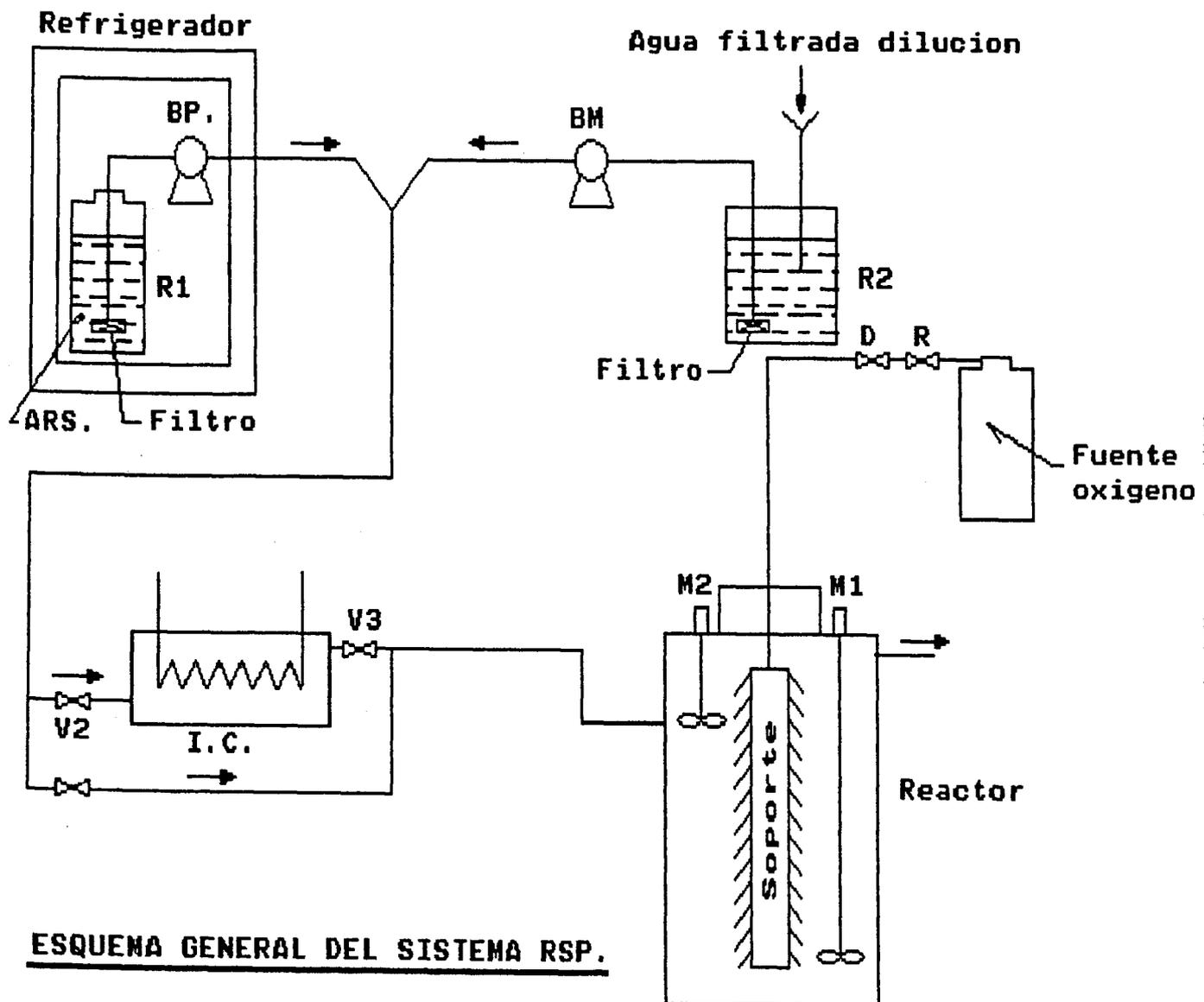


FIG.4.6.

4.2.- PLAN EXPERIMENTAL

4.2.1.- Desarrollo de la investigación.

El objeto fundamental de esta parte de la investigación era el estudio del desarrollo de la biopelícula. La línea seguida para desarrollar dicho estudio fué la siguiente:

- 1.- Obtención de las características hidráulicas del reactor.
- 2.- Siembra inicial.
- 3.- Período de adaptación y estabilización.
- 4.- Puesta a punto del reactor para el Plan Experimental.
- 5.- Registro de los datos de control del piloto durante todo el período de estudio.
- 6.- Medidas de los parámetros de funcionamiento.

7.- Cálculo de los parámetros de funcionamiento, y relaciones entre parámetros.

4.2.2.- Fase experimental previa.

4.2.2.1.- Obtención de las Características Hidráulicas del Reactor.

4.2.2.1.a.- Experimentación realizada.

Con el trazador CINA, se demostró que las características hidráulicas del reactor se ajustaban muy bien al modelo de mezcla completa.

La mezcla completa está dada por medio de los agitadores impulsados por un motor eléctrico con una fuente de alimentación variable, que permite un rango de velocidades de 0-200 revoluciones por minuto. En el caso concreto del RSP, la velocidad de giro fué de 60 r.p.m..

Los dispositivos de entrada y salida, junto a la disposición del marco-soporte, ofrecen un paso de líquido uniforme a lo ancho del reactor.

Para el ensayo de mezcla completa, se desioniza una cantidad suficiente de agua, mediante un desionizador. El

reactor se llena y vacía por dos veces, para su limpieza y así conseguir un agua suficientemente desionizada.

A continuación, se procedió al tarado de las bombas a emplear en todo el experimento, con cronómetro y recipiente graduado. Se realizaron dos ensayos con diferentes caudales.

Se preparó una disolución madre de ClNa, de concentración inicial lo suficientemente alta como para tomar la cantidad precisa para determinar el pulso del trazador, y se midió la conductividad, ($\mu\text{S}/\text{cm}$), del agua inicial ($5 \mu\text{S}/\text{cm}$),

Se ponen en funcionamiento todos los elementos que intervienen en el ensayo, anotando los parámetros correspondientes, y se introduce el trazador para, inmediatamente, medir conductividades en los intervalos de tiempo establecidos.

Las características del trazador, fueron:

- Conductividad de la disolución madre: $8000 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Conductividad del pulso del trazador: $400 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Cantidad de trazador a introducir: 535 cm^3 (Volumen reactor = 10.700 cm^3).

Los caudales aplicados fueron: 50 y 100 l/d.

4.2.2.1.b.- Reactor de mezcla completa.

La mezcla completa se produce cuando las partículas que entran en el depósito se dispersan o diluyen inmediatamente por todo el volumen del mismo.

Este tipo de reactor es resistente a las cargas de choque y de respuesta aceptable a los volúmenes de entrada variables con el tiempo, debido al principio mismo de "mezcla completa".

La concentración del efluente se puede determinar como una función del tiempo a partir del balance de masas correspondiente, aplicando las simplificaciones oportunas a la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{d C_A}{d t} \quad (4.1)$$

$$\nabla C_A = 0 \quad (4.2)$$

Resulta entonces que:

$$\frac{d C_A}{d t} = - \nabla V C_A + R_A \quad (4.3)$$

Que resolviendo para el estado estacionario y no estacionario resulta, respectivamente:

$$C_A = \frac{C_o}{1 + K (Q/V)} \quad (4.4)$$

$$C_A = \frac{Q}{V} \frac{o}{K + Q/V} \left[1 - e^{-(K + Q/V)t} \right] + C_o e^{-(K+Q/V)t} \quad (4.5)$$

La expresión correspondiente para conocer la

concentración del efluente procedente de un reactor del cual se extrae un trazador, viene dada por:

$$C_A = C_0 e^{-t/t_0}; \quad (4.6)$$

siendo $t_0 = V/Q$, es decir, el tiempo teórico de detención.

Si la entrada es continua, la expresión que se obtiene es

$$C_A = C_0 \left[1 - e^{-(t/t_0)} \right] \quad (4.7)$$

4.2.2.1.c.- Análisis de los datos.

El ajuste de los datos obtenidos se referencia en el anexo con sus tablas y gráficas correspondientes.

4.2.2.2.- Siembra inicial.

El reactor se sembró, para el primer conjunto de experimentos (1-8), con microorganismos aerobios, obtenidos de otro proceso aerobio de tratamiento de aguas residuales, como es el caso de la Unidad de Aireación Prolongada de la estación depuradora de aguas residuales de la fábrica NESTLE S.A.. Esta planta trata los desechos líquidos que provienen de los diferentes procesos de alimentos, lácteos y derivados del cacao. Los Fangos Activos de este proceso, contenían alrededor de 5.000 mg/l de SSV, lo cual aseguraba, en cierta forma, la posibilidad de desarrollo de la biopelícula en el soporte permeable (membrana).

Durante el proceso de siembra y adaptación, se suministró oxígeno y sustrato alimenticio a los microorganismos, siendo el sustrato el agua residual sintética.

Al cabo de 2-3 horas, ya se podía observar una cierta adsorción sobre el soporte, por medio del color que iba tomando la superficie de la membrana.

Para la segunda siembra inicial, correspondiente al

segundo medio soporte, el procedimiento general fué el mismo con la particularidad de que los microorganismos empleados, eran procedentes de la biopelícula que se había desarrollado en el primer medio soporte. De esta forma, la variable, que lo fué para el primer soporte, de adaptación, quedó prácticamente cubierta con la garantía total de no incidir negativamente en los resultados a obtener. De hecho, se aprecian resultados más uniformes en el primer experimento de la segunda membrana.

Para la consecución de estos apartados era necesaria la obtención de un amplio intervalo de resultados, que permitiera variaciones apreciables en los parámetros.

4.2.2.3.- Período de adaptación y estabilización.

La adaptación de los microorganismos a las nuevas condiciones de diferente sustrato, medio soporte, condiciones de flujo, Carga Orgánica y Carga Hidráulica, se extendió a 84 horas, (48 horas en el segundo soporte), ya que, al cabo de ese tiempo, se podía observar una biopelícula de un espesor apreciable sobre el soporte. Esta condición apuntada, parece reflejar alguna desviación en los resultados obtenidos en el primer experimento de la serie realizada en este primer soporte, respecto al resto.

4.2.2.4.- Puesta a punto del reactor.

Inmediatamente después del tiempo mencionado de adaptación y estabilización, tanto para un soporte como para el otro, se desechó el licor mezcla que contenía el reactor, se limpiaron todas las paredes interiores del recipiente, eliminando la posibilidad de influencias ajenas a la propia biopelícula de la membrana en los resultados a obtener.

Después de haber hecho las operaciones descritas, se volvió a llenar el reactor de agua residual sintética de concentración 200 mg/l de DQO, (400 mg/l para la segunda membrana), es decir, con la concentración del primer experimento a realizar a continuación en uno y otro caso.

Se midieron los parámetros: temperatura, pH, OD, Alcalinidad, DQO, DBO₅, N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, en el Afluente, y al cabo de un periodo de tiempo igual al TRH, se midieron en el Efluente. Los SS y SSV, se analizaron un día después.

Se tomó, igualmente en este periodo de tiempo, una muestra de biopelícula, para calcular su espesor, densidad, masa total, seca, agua y volátiles.

4.2.3.- Diseño de los Experimentos.

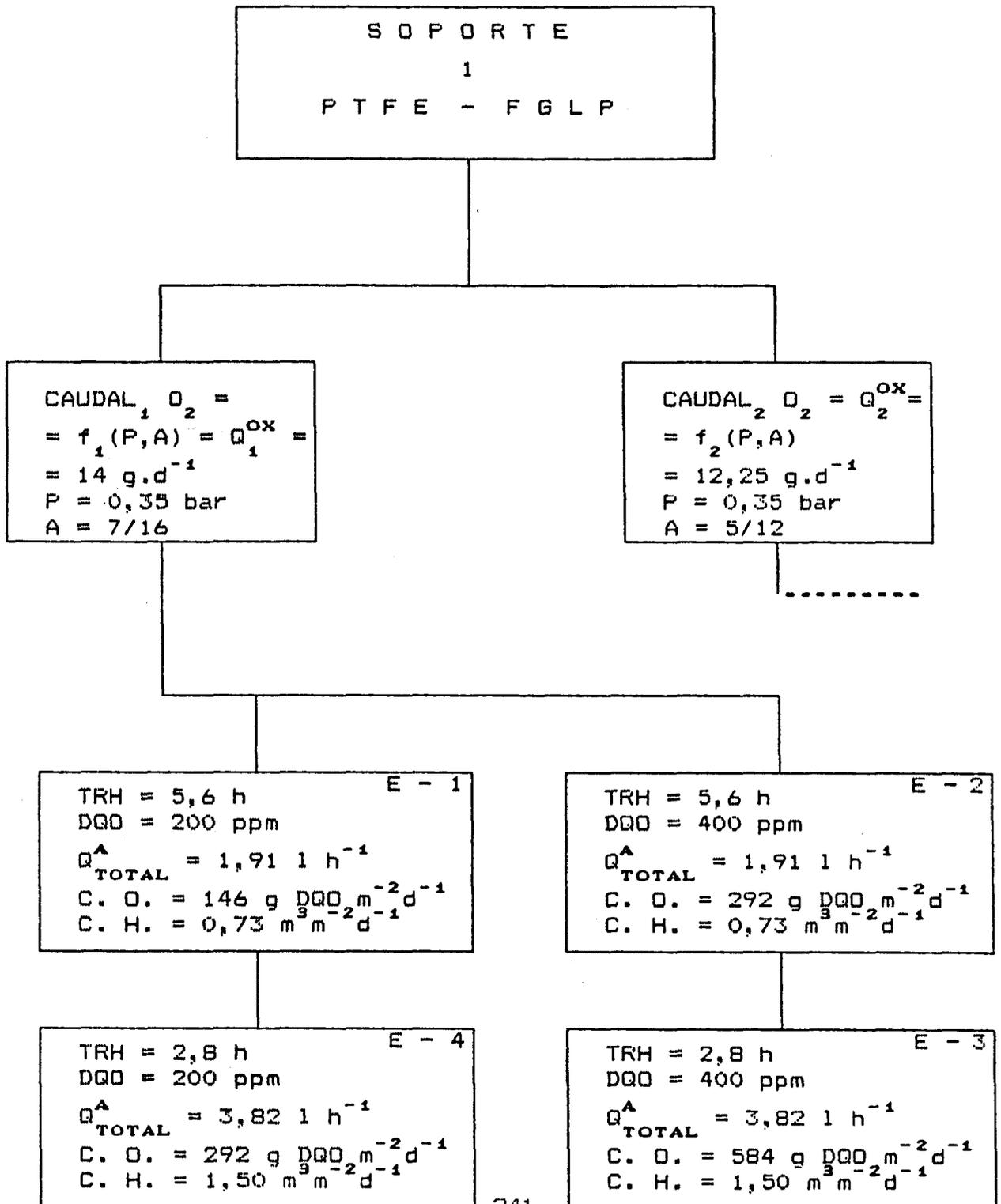
Para la consecución de estos apartados era necesaria la obtención de un amplio intervalo de resultados, que permitiera variaciones apreciables en los parámetros.

De esta forma se diseñó el Plan Experimental (figura 4.7), en el cual se programaron 16 experimentos a partir de 4 variables de máxima importancia, como fueron, el Caudal de Oxígeno (Q_{O_2}), el Medio Soporte (MS), el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y la Concentración del Afluente (S_0), dando lugar estos dos últimos parámetros a diferentes valores de la Carga Orgánica (CO).

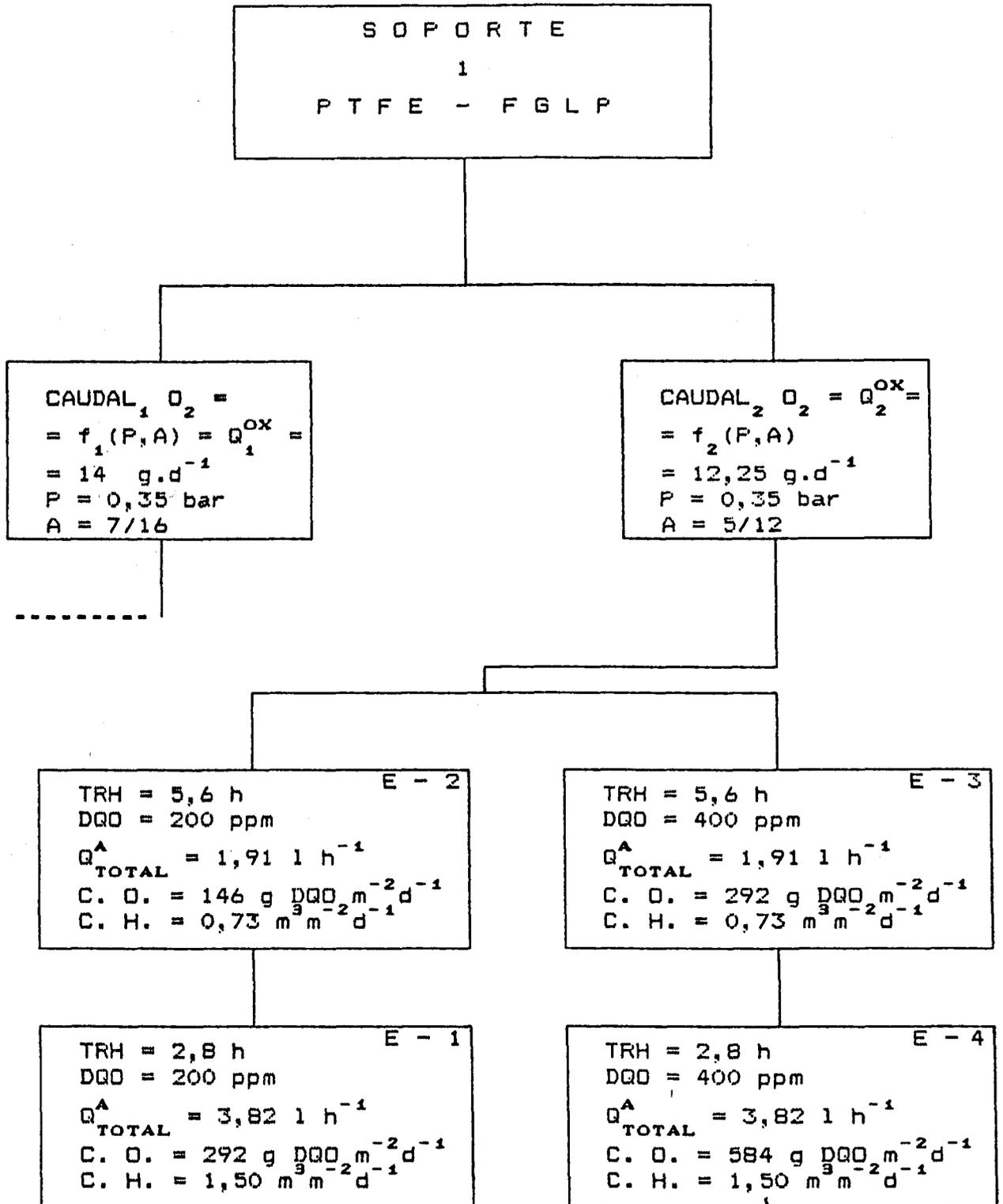
Estas cinco variables básicas se distribuyen entre los 16 experimentos según se refleja en la figura 4.8. Cada una de las variables ha adoptado dos o tres diferentes valores entre todos los experimentos, que quedan reflejados por un número en la representación adjunta.

Los 16 experimentos, se ampliaron a 19, por ser los tres adicionales, extremos que se quisieron comprobar. Estos extremos se aplicaron: (a) a la reducción de la concentración

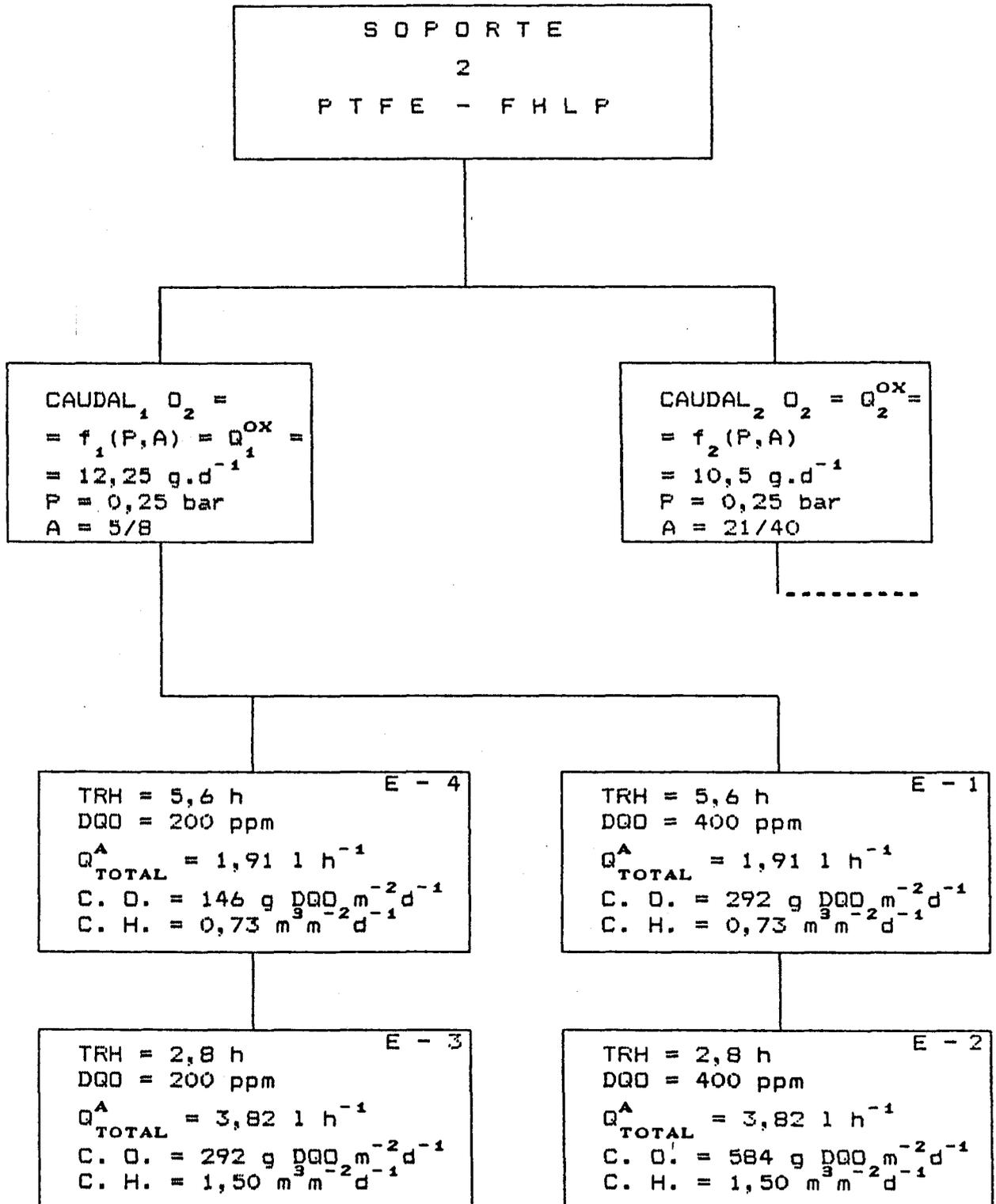
PLAN EXPERIMENTAL



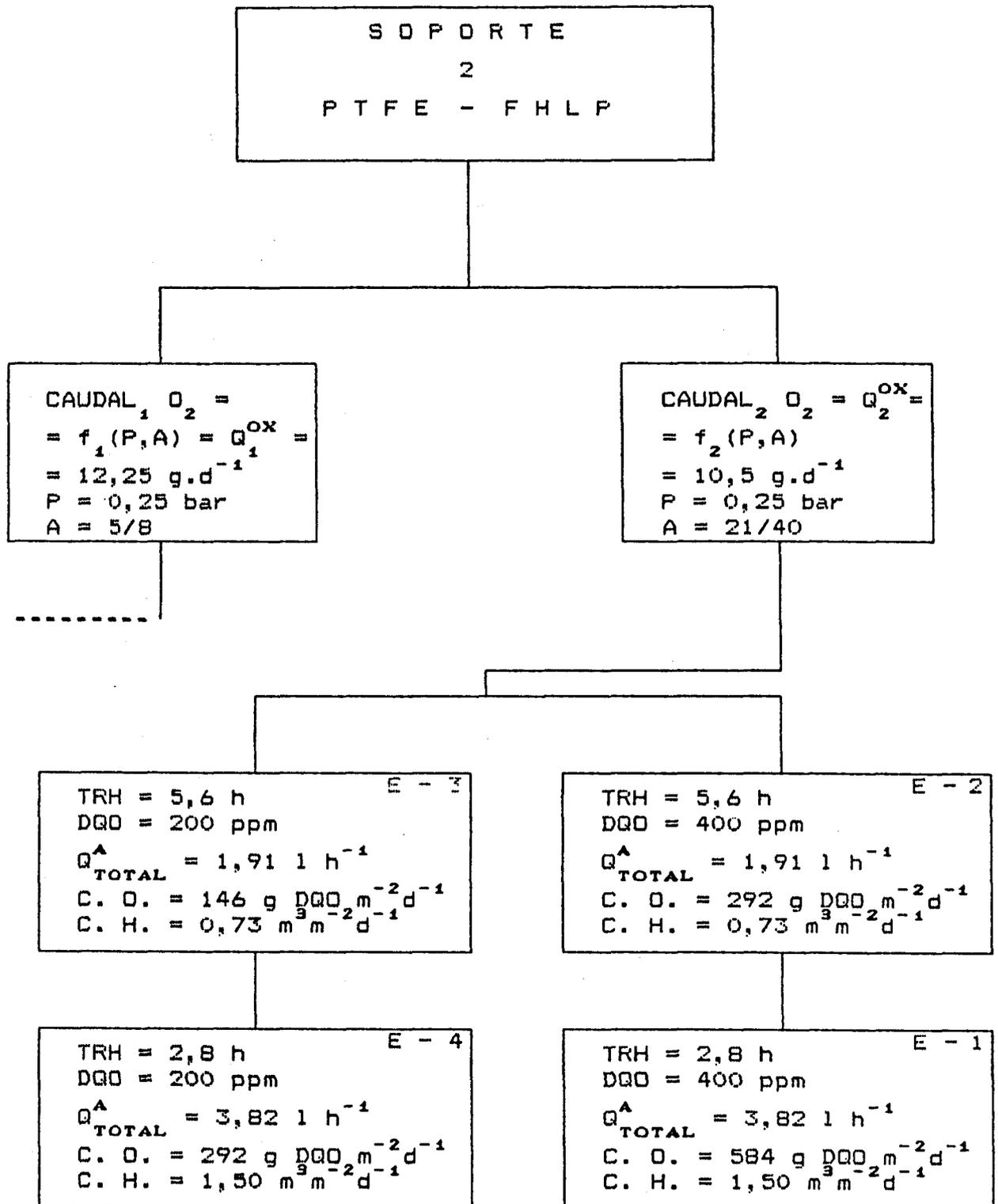
PLAN EXPERIMENTAL



PLAN EXPERIMENTAL



PLAN EXPERIMENTAL



S O P O R T E
1
P T F E - F G L P

QO2 = 12,25 g/d^(A)
DQO = 144 PPM
CO = 210 g/m²d
CH = 1,5 m³/m²d

QO2 = 12,25 g/d^(B)
DQO = 200 ppm
CO = 146 g/m²d
CH = 0,78 m³/m²d
* = Sin agitación

S O P O R T E

2

P T F E - F H L P

DQO = 200 ppm, 400 ppm (c)

CO = 94,07; 68,14 g/m².d

CH = 0,17

QO₂ = 10,5 g/d

N-NO₃ = 10 ppm (dia 13-15)

TRH = 24 horas

Q^A = 0,446 l/hq

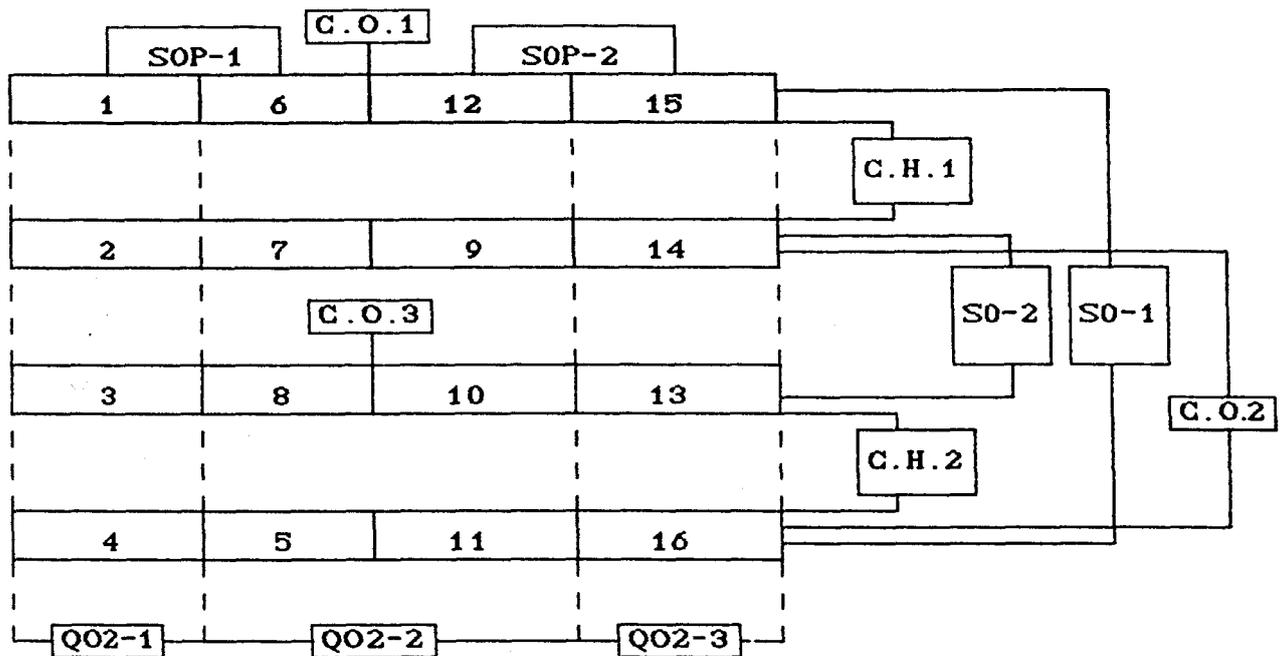


FIG.4.8. Agrupación de experimentos según las variables experimentales básicas.

de sustrato a valores comparativamente bajos (b) a la característica del flujo eliminando la agitación y (c) a la Carga Orgánica del Afluente, con aumento de la proporción de Nitrógeno en forma de Nitratos en el Afluente.

Los períodos de tiempo dados a cada conjunto de experimentos han sido los siguientes:

Experimentos en el Soporte 1:

Experimento 1: desde el día 10 de Junio al 15 de Junio.

Experimento 2: desde el día 15 de Junio al 21 de Junio.

Experimento 3: desde el día 21 de Junio al 27 de Junio.

Experimento 4: desde el 27 de Junio al 02 de Julio.

Experimento 5: desde el día 2 de Julio al 8 de Julio.

Experimento a: desde el día 8 de Julio al 10 de Julio.

Experimento b: desde el 10 de Julio al 12 de Julio.

Experimento ó: desde el día 12 de Julio al 18 de Julio.

Experimento 7: desde el día 18 de Julio al 24 de Julio.

Experimento 8: desde el día 24 de Julio al 29 de Julio.

Experimentos en el Soporte 2:

Experimento 9: desde el 3 de Agosto al 8 de Agosto.

Experimento 10: desde el 8 de Agosto al 13 de Agosto.

Experimento 11: desde el día 13 de Agosto al 18 de Agosto.

Experimento 12: desde el 18 de Agosto al 23 de Agosto.

Experimento 13: desde el 23 de Agosto al 28 de Agosto.

Experimento 14: desde el 28 de Agosto al 2 de Septiembre.

Experimento 15: desde el 2 de Septiembre al 7 de Septiembre.

Experimento 16: desde el 7 de Septiembre al 12 de Septiembre.

Experimento c: desde el 14 de Septiembre al 29 de Septiembre.

4.2.4.- Medición de variables

4.2.4.1.- Plan de muestreos y análisis.

La metodología a emplear en la toma de muestras, persiguió en todo momento la máxima fiabilidad de los resultados, la cual depende de la forma de obtenerlos y de la periodicidad.

Respecto a este último punto, se podría plantear el tomar muestras cada hora tanto en el afluente como en el efluente y así tener un control prácticamente continuo. Pero la dificultad para llevarlo a cabo con los medios de que se dispone, lo hace imposible. No obstante en algunos parámetros se elaboró una serie de resultados lo suficientemente alta como para poder afirmar que son razonablemente fiables.

En esta línea, hay algunos aspectos que conviene resaltar. En los periodos previos a la puesta en marcha de la planta, es decir, en los periodos de siembra con microorganismos obtenidos de otro proceso aerobio de tratamiento, se alargó el tiempo de cultivo hasta tener espesores relativamente apreciables, pero no excesivos, con

el objeto de trabajar con edades de fango lo más altas posibles, para que los microorganismos de la nitrificación tuvieran un cierto desarrollo, ya que el largo periodo de reproducción y crecimiento de las nitrosomonas, responsables de la oxidación del NH_4^+ a NO_2^- lo convierten en un factor limitante.

Los índices a obtener sobre las muestras del afluente y efluente fueron:

Mediante instrumentos de medida:

- pH
- Oxígeno Disuelto
- Temperatura

Mediante Técnicas Analíticas:

- Demandas de Oxígeno:
 - DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días en ppm)
 - DQO (Demanda Química de Oxígeno en ppm)
- Ciclo del Nitrógeno:
 - NH_4^+ (Nitrógeno Amoniacal en ppm)

-NO₃⁻ (Nitrógeno de Nitratos en ppm)

-NO₂⁻ (Nitrógeno de Nitritos en ppm)

-Sólidos:

-SST (Sólidos Totales en ppm)

-SSV (Sólidos Volátiles en ppm)

-SS (Sólidos en suspensión en ppm)

-Alcalinidad

Las técnicas analíticas empleadas fueron las del Standard Methods (1985), y para el Nitrógeno Amoniacal, el método del Indofenol del Rodier, 1989.

Como Datos de Control del reactor, se obtuvieron los siguientes:

-Temperatura del efluente. (°C)

-Caudal del afluente. (l.d⁻¹)

-pH del afluente.

-pH del efluente.

-Oxígeno Disuelto en el Afluente (ppm)

-Oxígeno Disuelto en el Efluente (ppm)

-Oxígeno Suministrado (g.d⁻¹)

-Alcalinidad en el Afluente (ppm)

-Alcalinidad en el Efluente (ppm)

En cuanto a las Variables del Fenómeno, se midieron:

- Espesor de la Biopelícula. (μm)
- Acumulación. (g/cm^2)
- Densidad. (Kg/m^3)
- Sólidos Totales en el Efluente. (ppm)
- Sólidos Volátiles en el Efluente. (ppm)
- Sólidos en Suspensión en el Efluente. (ppm)
- Porcentaje de Volátiles en la Biopelícula.
- Porcentaje de Agua en la Biopelícula.

Cada día se realizaban de 2 a 3 análisis de DQO, de tal forma que la estabilización del proceso respecto a este parámetro, se detectaba con bastante facilidad al cabo de 6-8 ensayos consecutivos en que el valor obtenido permanecía constante.

Esto respondía a que en el caso estudiado, el objetivo fundamental fué la eliminación de la materia orgánica carbonácea. En cada experimento se hacían, como mínimo, dos análisis de DBO_5 , y tres o más cuando el experimento duraba más de cinco días o el material disponible lo permitía.

La periodicidad aplicada para la DQO, fué la óptima

en función de los medios de que se dispuso y estableció la frecuencia para todos los parámetros de control e índices a obtener, excepto los "Sólidos" que se realizaban una vez cada día.

En cuanto a las variables del fenómeno relativas a la biopelícula, la frecuencia fué de una vez cada uno o dos días durante todo el tiempo de experimentación. Hay que decir al respecto, que se alternaron las tomas de muestra de biopelícula de las membranas para que la incidencia de la extracción del trozo de biopelícula tuviera una importancia relativamente pequeña. No obstante, este es uno de los aspectos que hay que cuidar en futuras experiencias. La superficie específica de la película absorbida por el sistema empleado, fué del orden de las diezmilésimas respecto de la superficie específica total de las membranas.

4.2.4.2.- Métodos de medida de espesores, acumulación de biopelícula seca, agua y sólidos de la biopelícula. (SS y SSV).

En el "Plan de muestreos y análisis" y en el apartado correspondiente a las "variables del fenómeno", se establece la medida del espesor de la biopelícula. Esta medida se hace de dos formas (1) aplicando la técnica propuesta por Trulear y Characklis (1982), figura 4.9, y (2) por gravimetría. El método de la microscopía, adaptado del de Sanders (1964), requiere un microscopio óptico con micrómetro.

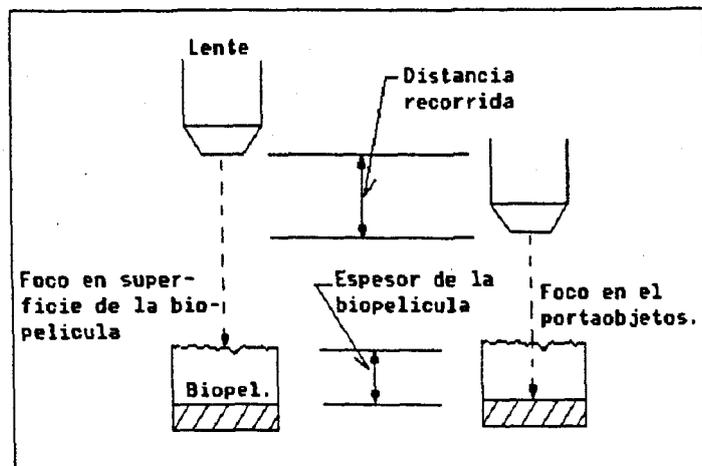


FIG.4.9. Determinación del espesor de la biopelícula con microscopía óptica. (Fuente: Trulear y Characklis).

En nuestra experimentación, se prepararon dos jeringuillas, a las que se les cortó el extremo soporte de la aguja. Se calculó la superficie que iba a ser la específica para todos los cálculos a realizar y se procedió a su utilización con resultados muy positivos. Figuras 4.10 y 4.11

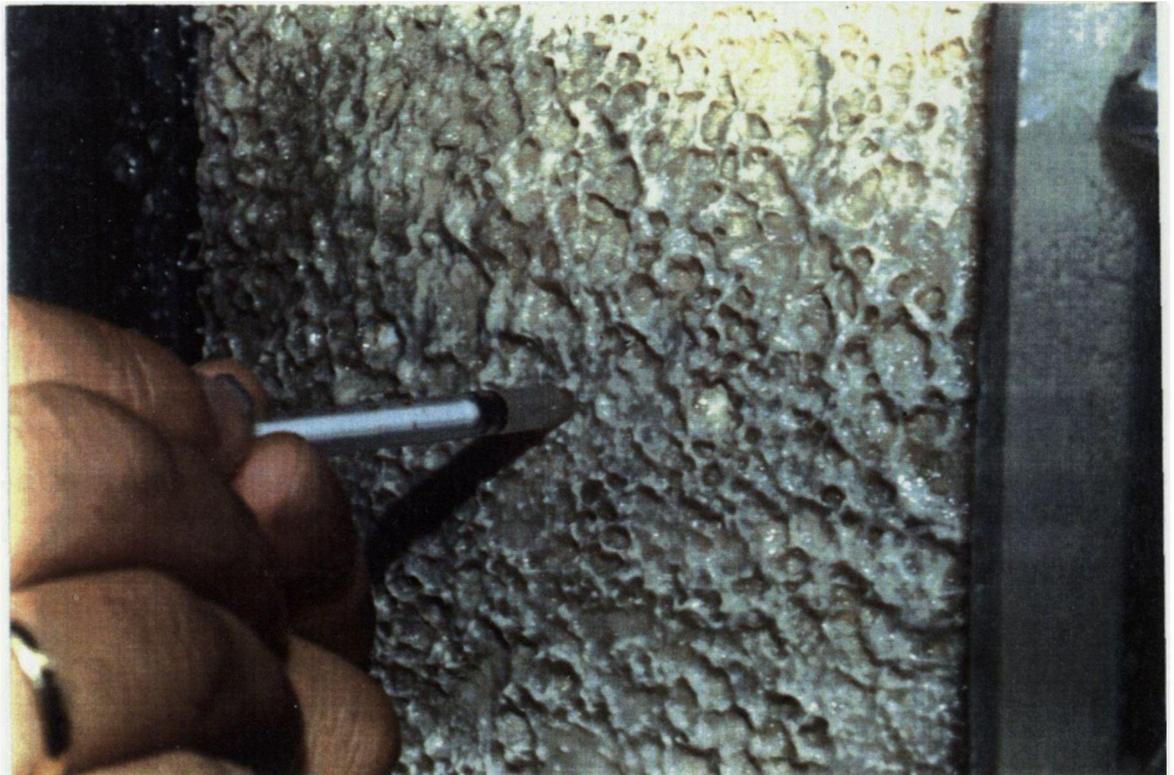


FIG.4.10. Sistema de extracción de la Biopellicula



FIG.4.11. Aplicando la técnica de microscopía óptica.

La biopelícula que se extrajo con el dispositivo mencionado, se depositó sobre un portaobjetos totalmente limpio y con una marca de referencia. Figura 4.12. Se pesó, e inmediatamente se determinó el espesor por microscopía, tomando hasta un máximo de 10 medidas en toda la superficie de la biopelícula.



FIG.4.12. Biopelícula extraída del soporte

El punto de referencia sirvió como cero en cada medida. La media de todas las medidas realizadas, se comparó con el resultado de aplicar la técnica de la gravimetría.

Igualmente la técnica de la gravimetría se aplicó también para conocer la masa de biopelícula acumulada en el soporte, los sólidos suspendidos, los volátiles y el

porcentaje de agua de la biopelícula. La dinámica del experimento fué la siguiente:

La biopelícula que se tomó del medio soporte y que sirvió para conocer el espesor por microscopía óptica, se introdujo en el horno a 105°C. Se dejó durante 3 horas y al cabo de ese tiempo se volvió a pesar. La diferencia de pesos entre el inicial y este último, supuso conocer el contenido de agua que posee la biopelícula. El resultado de esta pesada representa la masa de sólidos suspendidos (SS) que posee la biopelícula.

Al ser el porcentaje de agua superior al 90%, el espesor se calcula suponiendo el valor de la densidad igual al del agua.

La acumulación de biopelícula en el soporte (g/cm^2), está calculada para la biopelícula seca. Es el resultado de dividir los gramos de biopelícula seca por el área de la superficie específica del sistema de extracción de biopelícula del soporte.

Después de la pesada de los sólidos suspendidos, se introduce el recipiente que los contiene en la mufla a 550°C. Después de 1 hora, se vuelve a pesar y la diferencia con el

peso correspondiente a los SS, representa los SSV de la biopelícula. El residuo que queda es la materia inorgánica de la biopelícula.

5.- RESULTADOS

5.- RESULTADOS

5.1- ELABORACION DE RESULTADOS

5.5.1.- Resultados Obtenidos

Para cada experimento, se tabularon los valores obtenidos de las siguientes variables, tanto en el afluente como en el efluente del reactor:

- pH
- Alcalinidad
- DQO
- DBO5
- N-NO₂
- N-NO₃
- N-NH₄

Se calcularon los rendimientos de depuración en DQO y DBO₅, para cada uno de los análisis que se realizó. Cuando la concentración de DQO en el efluente, los valores en el afluente fueron más regulares que los de la DBO₅, debido a las características muy particulares de las técnicas

analíticas que se utilizan normalmente, que hacen que las medidas de DBOs en análisis repetidos tengan una mayor desviación que los de la DQO) permanecía constante a lo largo de seis u ocho análisis consecutivos, el experimento llegaba a su fin.

Además de esta tabla de resultados, se elaboró una tabla complementaria con los resultados de los análisis de las siguientes determinaciones de la biopelícula:

- Masa total de biopelícula (g)
- Masa de biopelícula seca (g)
- Masa de volátiles (g)
- Masa de agua en la biopelícula (g)
- Acumulación de biopelícula (g/cm^2)
- % de volátiles en la biopelícula.
- % de agua en la biopelícula.
- Espesor de la biopelícula por gravimetría (cm)
- Espesor de la biopelícula por microscopía óptica (cm)
- Densidad de la biopelícula (Kg/m^3)

En el Anexo (A.1: "Resultados"), figuran todos estos resultados en forma de tablas. Igualmente se adjunta (A.2: "Desarrollo"), la descripción gráfica de cada experimento, representando a lo largo de la duración del

experimento las diferentes variables que lo caracterizan.

5.1.2.- Obtención de parámetros, rendimientos y tasas.

5.1.2.1.- Relación de variables y parámetros.

Para cada experimento se tomó un valor que corresponde a la fase estacionaria, y se elaboró una tabla con los datos de los dieciseis experimentos, en la cual figuran los parámetros siguientes:

-Biomasa:

- SSVE (g/d)
- SSE (g/d)
- SSB (g)
- SSVB (g)
- Densidad (Kg/m^3)
- Espesor (μm)
- X_{eB} (gSSB/m^2)
- ABSSV (g/d)
- ABSS (g/d)
- ABSSV* (g/d)

-Afluente:

- Q_{O_2} ($\text{Kg/m}^2.\text{d}$)
- Caudal (L/d)

- TRH (h)
- CH ($m^3/m^2.d$)
- So (mg/l), referida a DQO y DBO5
- (N-NH₄)_o (mg/l)
- (N-NO₃)_o (mg/l)
- No. (g/d)
- COA ($g/m^2.d$), referida a DQO y DBO5
- COXA (g/g SSVB.d), referida a DQO y DBO5
- CNA ($g/m^2.d$)

Efluente:

- S (mg/l), referida a DQO y DBO5
- (N-NH₄) (mg/l)
- (N-NO₃) (mg/l)
- N (g/d)
- COEf ($g/m^2.d$), referida a DQO y DBO5
- CNEf ($g/m^2.d$)

Eliminado:

- COE ($g/m^2.d$), referida a DQO y DBO5
- COXE (g/gSSVB.d), referida a DQO y DBO5
- DQO E. (g/d)
- N E. (mg/l)
- CNTEL. ($g/m^2.d$)

Rendimientos:

- RENDQO
- RENDBO₅
- RENETN
- REN(N-NO₃)

Relaciones:

- S/So para DQO
- So/S para DQO
- SSVB/SSB
- SSVE/SSE
- N/No
- No/So
- N/S
- ND/No
- No/So para DBO₅

Tasas:

- TD (1/d)
- PF (SSV) (g/gDQOEL)
- PF (SS) (g/gDQOEL)
- TP (g/d)
- TCO' (g/m².d)
- TCOX (g/gSSVB.d)
- TCO(DQO) (g/gDQOEL)
- TRF (SSV) (d)

- TRF (SS) (d)

5.1.2.2.- Cálculo de los parámetros:

Los razonamientos y operaciones seguidos para la determinación de los parámetros que se acaban de relacionar, se indican a continuación.

1.- Caudal Específico de Oxígeno (QO_2)

$$QO_2 = O_2 / 62,832 \quad (\text{Kg}/\text{m}^2.\text{d})$$

2.- Carga Orgánica Afluyente (COA)

$$COA = \frac{Q.(DQO)_A \text{ ó } Q.(DBO5)_A}{62,832} \quad (\text{g}/\text{m}^2.\text{d})$$

siendo: $(DQO)_A$ ó $(DBO5)_A$ = Concentración en el Afluyente,
expresada en DQO o DBO.(mg/l)

3.- Carga Orgánica Eliminada (COE)

$$COE = \frac{Q.(DQO)_E \text{ ó } Q.(DBO5)_E}{62,832} \quad (\text{g}/\text{m}^2.\text{d})$$

siendo: $(DQO)_E$ ó $(DBO5)_E$ = Concentración Eliminada,
 expresada en DQO o DBO
 (mg/l).

4.- Carga Orgánica Específica Eliminada (COXE)

$$COXE = \frac{COE \cdot 0,062832}{SSVB*} \quad (\text{g de DQO o DBO/g de SSVB*.d})$$

siendo: SSVB* = Sólidos Suspendidos Volátiles en la
 biopelícula, tomados en la última
 medida del experimento en la fase
 estabilizada. (g).

5.- Carga Orgánica Específica Afluente (COXA)

$$COXA = \frac{COA \cdot 0,062832}{SSVB*} \quad (\text{g de DQO o DBO /g de SSVB*.d})$$

6.- Tiempo de Retención de Fangos (TRF-SST ó SSVT)

$$TRF(SST \text{ ó } SSVT) = \frac{SST \text{ ó } SSVT}{TP \text{ ó } TP'} \quad (\text{d})$$

siendo: SST o SSVT = Sólidos Suspendidos Totales o
 Sólidos Suspendidos Volátiles
 Totales, respectivamente. (g).

TP o TP' = Tasa de Producción de Fangos
 referida, respectivamente, a los

Sólidos Suspendidos Totales o a los Sólidos Suspendidos Volátiles Totales. (g/d).

7.- Tasa de Dilución (TD)

$$TD = 1/TRH \text{ (d}^{-1}\text{)}$$

Siendo: TRH = Tiempo de Retención Hidráulico. (d)

8.- Producción Específica de Fangos (Pf)

$$Pf = \frac{T P \times 1000}{(S_o - S) \cdot Q} \text{ (g de Sólidos Suspendidos/g DQO o DBO Eliminadas).}$$

9.- Densidad de la Biopelícula (DENS.BIOP.)

$$DENS. BIOP. = \frac{\text{Acumulación}}{\text{Espesor}} \times 10^6 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

siendo: Acumulación = Acumulación de biopelícula seca en el soporte (g/cm²).

Espesor = Espesor de la Biopelícula húmeda (cm).

10.- Espesor de la Biopelícula (ESPESOR)

$$\text{ESPESOR} = \text{VBH} / \text{Se} \quad (\text{cm})$$

$$\text{VBH} = \text{PBH} / \delta \quad (\text{cm}^3)$$

siendo: PBH = Peso de la Biopelícula Húmeda. (g).

δ = Densidad del agua. (g/cm^3).

VBH = Volumen de Biopelícula Húmeda (cm^3).

Se = Superficie específica (1,227 y 0,1735 cm^2)

11.- Acumulación de Biopelícula en el Soporte (AB)

$$\text{AB} = \text{PBS} / \text{Se} \quad (\text{g}/\text{cm}^2).$$

siendo: PBS = Peso de la Biopelícula Seca (g).

12.- Biomasa Específica de la Biopelícula (XEB)

$$\text{XEB} = \text{SSB} / 0,062832 \quad (\text{g}/\text{m}^2)$$

siendo: SSB = Sólidos Suspendidos en la Biopelícula (g)

13.- Tasa Específica de Consumo de Oxígeno (TCO-DQO)

$$\text{TCO(DQO)} = \frac{(\text{ODA} + \text{O}_2 - \text{ODE})}{Q (\text{S}_0 - \text{S})} \quad (\text{g/g de DQO Eliminada.})$$

14.- Tasa Específica de Consumo de Oxígeno (TCO-X)

$$TCO(X) = \frac{(ODA + O_2 - ODE)}{SSVB} \quad (\text{g/g.d})$$

15.- Tasa de Consumo de Oxígeno (TCO')

$$TCO' = \frac{(ODA + O_2 - ODE)}{62,832} \quad (\text{g/m}^2.\text{d})$$

16.- Relaciones Nitrogeno-Sustrato (N/S)

$$NA/So = \frac{NA \cdot 1000}{So \cdot Q} \quad (\text{g/g})$$

$$NE/S = \frac{NE \cdot 1000}{S \cdot Q} \quad (\text{g/g})$$

17.- Carga Nitrogeno (Afluente y Efluente) (CNA-CNE)

$$CN = \frac{NA \text{ ó } NE}{0,062832} \quad (\text{g/m}^2.\text{d})$$

18.- Carga Nitrogeno Eliminada (CN')

$$CN' = \frac{NA - NE}{0,062832} \quad (\text{g/m}^2.\text{d})$$

Rendimiento DQO o DBO5

$$RENDQO \text{ o } DBO_5 = \frac{(So - S)}{So} * 100 \quad \%$$

Rendimiento Eliminación Total Nitrogeno (RENDETN)

$$\text{RENDETN} = \frac{(\text{No}-\text{N})}{\text{No}}$$

Rendimiento Eliminación de Nitratos (RENDNO₃)

$$\text{RENDNO}_3 = \frac{(\text{N}-\text{NO}_3)_A - (\text{N}-\text{NO}_3)_E}{(\text{N}-\text{NO}_3)_A}$$

5.1.3.- Balances de Materia.

De cara a analizar con más detalle los factores o fenómenos consumidores o productores de materia dentro del sistema biopelícula experimentado, se desarrollan a continuación los balances correspondientes a los cuatro principales tipos de materia.

5.1.3.1.- Balance de Oxígeno.

A continuación se obtiene este Balance, con las precisiones siguientes:

- El Oxígeno para la nitrificación (ONI), requiere conocer antes la cantidad de nitrógeno nitrificada realmente, por lo que el dato depende del Balance de Nitrógeno, donde este parámetro es incógnita.
- El coeficiente α se fija en 1,1 g de Oxígeno/g de Glucosa oxidada. (Turakhia y Characklis, 1988)
- El coeficiente β se fija en 1,416 g de Oxígeno/g de Biomasa (Characklis).

OD_A .- Oxígeno Disuelto Afluente (g/d)

QO_2 .- Oxígeno Suministrado al Soporte Permeable (g/d)

ORD.- Oxígeno Recuperado por Desnitrificación (g/d)

OD_E .- Oxígeno Disuelto Efluente (g/d)

OSM.- Oxígeno para Síntesis y Mantenimiento (g/d)

ONI.- Oxígeno para la nitrificación (g/d)

ORE.- Oxígeno para la Respiración Endógena (g/d)

Balance:

Planteamiento:

$$OD_A + QO_2 + ORD = OD_E + OSM + ONI + ORE$$

Aplicación:

$$QO_2 + Q (OD_A) + Q ORD = Q (OD_E) + Q \alpha \left[(DQO_A) - (DQO_E) \right] + \\ + \beta \chi (SSV_B) + Q \delta \left[(CN-NH_4^+)_A - (CN-NH_4^+)_E \right]$$

Q.- Caudal (ld^{-1})

α .- Relación Oxígeno/Glucosa ($1,1 \text{ g } O_2 / \text{g } C_6H_{12}O_6$)

β .- Relación Oxígeno/Biomasa ($1,416 \text{ g } O_2 / \text{g } C_{1,4}H_{0,4}O_{0,2}N_{0,2}$).

(SSV_B) .- Acumulación de Sólidos Suspendidos Volátiles en la Biopelícula ($g \text{ d}^{-1}$) (Se toma la biomasa del último día del experimento en fase estacionaria).

χ .- Coeficiente de Biopelícula en Respiración Endógena. (CRE)

δ .- Coeficiente de Nitrificación.

5.1.3.1.a.- Cálculo de parámetros del balance.

1.- Oxígeno afluente:

1.A. Oxígeno Disuelto Afluente (ODA)

$$ODA = ODA_m \cdot Q / 1000 \quad (\text{g/d})$$

siendo: ODA_m = Oxígeno Disuelto Afluente medido. (ppm)

Q = Caudal Afluente (L/d)

1.B.- Oxígeno Aportado (O₂)

$$O_2 = V_c \cdot \delta \quad (\text{g/d})$$

siendo: V_c = Volumen de oxígeno aportado, corregido por los coeficientes: "presión diferencial" y "naturaleza del gas". (dm³/d).

δ = Densidad del oxígeno a la temperatura ambiente. (1,35 g/dm³)

2.- Oxígeno Disuelto Efluente (ODE)

$$ODE = ODE_m \cdot Q / 1000 \quad (\text{g/d}).$$

siendo: ODEm = Oxígeno Disuelto Efluente medido (ppm)

3.- Oxígeno para síntesis y mantenimiento (OSM)

$$OSM = (S_o - S) \cdot Q \cdot 1,1 / 1000 \quad (\text{g/d}).$$

siendo: S_o = Concentración DQO Afluente (mg/l)

S = Concentración DQO Efluente (mg/l)

4.- Oxígeno necesario para la nitrificación (ON)

$$ON = (N - \text{NH}_4^+)_r \cdot 4,1$$

siendo: $(N - \text{NH}_4^+)_r$ = Nitrógeno amoniacal realmente nitrificado (g/d)

5.- Oxígeno recuperado por desnitrificación (ORD)

$$ORD = N - \text{DESN} \cdot 2,85$$

siendo: N-DESN = Nitrógeno desnitrificado (g/d)

6.- Oxígeno teórico para la Respiración Endógena (OREt)

$$\text{OREt} = \text{SSVB} \cdot 1,416$$

7.- Oxígeno real para la respiración endógena (ORE_r)

$$\text{ORE}_r = \text{ODA} + \text{O}_2 + \text{ORD} - \text{ODE} - \text{OSM} - \text{ON} \text{ (g/d)}$$

8.- Coeficiente de Respiración Endógena (CRE)

$$\text{CRE} = \text{ORE}_r / \text{ORE}_t$$

5.1.3.2.- Balance de Nitrógeno.

Las precisiones a hacer respecto al cálculo siguiente, son:

- En la nitrificación, cada gramo de Nitrógeno nitrificado, requiere 4,1 gramos de Oxígeno (Ronzano-Poncela, 1985)
- La desnitrificación de 1 gramo de $N-NO_3$, conduce a recuperar 2,85 gramos de Oxígeno. Ronzano-Poncela, (1985)

N_A .- Nitrógeno total Afluente (g/d)

N_E .- Nitrógeno total efluente (g/d)

SSV_E .- Sólidos Suspendidos Volátiles Efluente (ppm)

ΔSSV_B .- Incremento Sólidos Suspendidos Volátiles Biopelícula (g/d).

$D-NO_3^-$.- Nitrógeno desnitrificado a partir de los Nitratos (g/d).

$N-NH_{4T}^+$.- Nitrógeno Amoniacal Teórico Nitrificado (g/d).

$\delta = CN$.- Coeficiente de Nitrificación.

$N-NH_{4R}^+$.- Nitrógeno Amoniacal Nitrificado (g/d).

ϵ .- Coeficiente de Nitrógeno Asimilado en los fangos.

NDES.- Nitrógeno total desnitrificado. (g/d).

N-SSV_E.- Nitrógeno Asimilado en los Fangos Efluente (g/d).

N-SSV_B.- Nitrógeno Asimilado en la Biopelícula (g/d).

Balance:

Planteamiento:

$$N_A = N_E + N\text{-SSV}_E + N\text{-SSV}_B + \text{NDES}$$

$$\text{NDES} - (D\text{-NO}_3^-) = N\text{-NH}_4^+$$

Aplicación:

$$Q \left[(N\text{-NO}_2^-)_{2A} + (N\text{-NO}_3^-)_{3A} + (N\text{-NH}_4^+)_{4A} \right] = Q \left[(N\text{-NO}_2^-)_{2E} + (N\text{-NO}_3^-)_{3E} + (N\text{-NH}_4^+)_{4E} \right] + (SSV_E) \cdot \epsilon \cdot Q + \Delta SSV_B \cdot \epsilon$$

$$\text{NDES} = Q \cdot N_A - Q \cdot N_E - (SSV_E) \cdot \epsilon \cdot Q - \Delta SSV_B \cdot \epsilon$$

El incremento de SSV_B, es decir ΔSSV_B , se obtiene en la fase en la que se estabiliza el Rendimiento de depuración de DQO, siendo la operación a realizar la siguiente:

$$(SSV_B^F - SSV_B^U) / t, \text{ siendo:}$$

SSV_B^F El valor final de los medidos.

SSV_B^U El valor inmediato anterior en la fase de estabilización.

t.- tiempo entre las dos medidas (d)

5.1.3.2.a.- Cálculo de parámetros del Balance.

1.- Nitrógeno Afluyente (NA)

$$NA = \left[(N-NH_4^+)_A + (N-NO_3^-)_A + (N-NO_2^-)_A \right] \cdot Q / 1000 \text{ (g/d)}$$

siendo: $(N-NH_4^+)_A$ = Concentración de Nitrógeno Amoniacal Afluyente (mg/l).

$(N-NO_3^-)_A$ = Concentración de Nitrógeno de Nitratos Afluyente (mg/l).

$(N-NO_2^-)_A$ = Concentración de Nitrógeno de Nitritos Afluyente (mg/l).

2.- Nitrógeno en los Sólidos Suspendidos Volátiles en el efluente (N-SSVE).

$$N-SSVE = SSVE \cdot 0,15 / 1000 \text{ (g/d)}$$

siendo: SSVE = Sólidos Suspendedos Volátiles en el Efluente (mg/l)

3.- Nitrógeno en los SSV de la Biopelícula (N-SSVB).

$$N\text{-SSVB} = \Delta BSSV.0,1 \quad (\text{g/d}).$$

siendo: $\Delta BSSV$ = Acumulación en la Biopelícula de Sólidos Suspendedos Volátiles (g/d).

4.- Nitrógeno Desnitrificado (N-DESN)

$$N\text{-DESN} = N_A - N_E - (N\text{-SSVE}) - (N\text{-SSVB}) \quad (\text{g/d})$$

siendo: N_E = Nitrógeno Efluente (g/d)

5.- Nitrógeno Amoniacal Teóricamente Nitrificado (N-NH₄⁺).

$$N\text{-NH}_4^+ = \left[(N\text{-NH}_4^+)_A - (N\text{-NH}_4^+)_E \right] \cdot Q / 1000 \quad (\text{g/d}).$$

siendo: $(N\text{-NH}_4^+)_E$ = Nitrógeno Amoniacal Efluente (mg/l).

6.- Nitrógeno Desnitrificado de Nitratos (D-NO₃⁻)

$$D\text{-NO}_3^- = \left[(N\text{-NO}_3^-)_A - (N\text{-NO}_3^-)_E \right] \cdot Q / 1000 \quad (\text{g/d})$$

siendo: $(N-NO_3^-)_E$ = Concentración de Nitrógeno de Nitratos en el Efluente (mg/l).

7.- Nitrógeno Amoniacal Nitrificado $(N-NH_4^+)_r$:

$$(N-NH_4^+)_r = (N-DESN) - (D-NO_3^-) \quad (g/d).$$

8.- Coefficiente de Nitrificación (CN)

$$CN = (N-NH_4^+)_r / (N-NH_4^+)_i$$

9.- Nitrógeno Efluente (NE)

$$NE = \left[(N-NH_4^+)_E + (N-NO_2^-)_E + (N-NO_3^-)_E \right] \cdot Q / 1000 \quad (g/d)$$

siendo: $(N-NO_2^-)_E$ = Concentración de Nitrógeno de Nitritos en el Efluente (mg/l).

5.1.3.3.- Balance de Sustrato.

Después de haber conocido el oxígeno recuperado en la desnitrificación, se puede plantear el balance de sustrato de tal forma, que se conozca el sustrato eliminado por el efecto de la desnitrificación y el eliminado por la oxidación de la materia orgánica carbonácea.

So.- Sustrato en el Afluente (mgDQO/l)

S.- Sustrato en el Efluente (mgDQO/l).

ORD.- Oxígeno recuperado por Desnitrificación. (gO₂/d).

α.- Relación Oxígeno-Sustrato (1,1 gO₂/gDQO).

SEO.- Sustrato eliminado por oxidación (g/d).

Q.- Caudal Afluente (l/d).

Balance:

Planteamiento:

$$S_o = S + SEO + ORD/\alpha$$

Aplicación:

$$Q.(S_o - S)/1000 - ORD/1,1 = SEO$$

5.1.3.4.- Balance de Sólidos.

Aunque en todos los experimentos se ha obtenido el estado estacionario del sistema en cuanto a eliminación de sustrato, no se ha podido garantizar la obtención de una biopelícula estable en cuanto a espesor y densidad. Por ello, en el balance de sólidos se introduce la posible variabilidad en cuanto al crecimiento de la biopelícula, como un incremento instantáneo en el último intervalo medido.

Por otra parte, dadas las características del agua residual artificial utilizada, y la filtración tanto de ésta como de la de dilución, la concentración de sólidos en el afluente ha sido prácticamente despreciable.

ABSS.- Incremento en la Biopelícula de Sólidos Suspendidos (g/d).

SSE.- Sólidos Suspendidos en el Efluente (ppm).

PF.- Tasa de Producción de Sólidos.(g/d).

SSA.- Sólidos Suspendidos en el Afluente (ppm).

Balance:

Planteamiento:

$$\Delta BSS + SSE - SSA = TP$$

Aplicación:

$$\Delta BSS + Q.SSE - Q.SSA = TP$$

El incremento de Sólidos Suspendidos en la Biopelícula, se calcula con el mismo criterio que se expresó en el Balance de Nitrógeno, aplicado en este caso al peso de biopelícula seca.

5.1.3.4.a.- Cálculo de parámetros del Balance.

1.- Sólidos Suspendidos en el Efluente (SSE)

$$SSE = SSEm.Q / 1000 \quad (\text{g/d}).$$

siendo: SSEm = Sólidos Suspendidos Efluente medidos
(mg/l).

2.- Incremento en la Biopelícula de Sólidos Suspendidos
(ΔBSS).

$$\Delta BSS = \frac{P_f - P_i}{t \cdot S_e} \times 628,32 \quad (\text{g/d})$$

siendo: P_f = Peso de la biopelícula seca, tomada de la membrana con el dispositivo dispuesto para tal fin, al final de cada experimento (g).

P_i = Peso de la biopelícula seca tomada en la medida justo anterior a la última.

t = Tiempo en días transcurrido entre las dos últimas medidas de sólidos realizados en el experimento. (d).

S_e = Superficie específica del dispositivo mencionado. (cm^2).

5.1.4.- Parámetros Modificados por Balances.

1.- Concentración DQO en la capa externa de la biopelícula aerobia (S*)

Se ha considerado que la concentración de DQO en la capa externa de biopelícula aerobia, sería la concentración que habría si no existiera el fenómeno de desnitrificación.

Para ello, se modifica la concentración en el efluente aplicando la reducción correspondiente por desnitrificación y obteniendo la concentración de DQO solamente por oxidación carbonácea.

$$S^* = S - \frac{\text{ORD} \cdot 1000}{1,1 \cdot Q} \quad (\text{mg/l})$$

siendo: ORD = Oxígeno Recuperado por Desnitrificación
(g/d).

2.- Carga Orgánica Eliminada (por oxidación carbonácea) (CO*)

$$\text{CO}^* = \frac{Q(S_0 - S)}{1.000} - \frac{\text{ORD}}{1,1} \quad (\text{g/d})$$

3.- Tasa de Consumo de Oxígeno (para la oxidación carbonácea) (TCO*).

$$\text{TCO*} = \text{QO}_2 + \text{ODA} - \text{ODE} - \text{Q} \delta (\text{NA} - \text{NE}) \text{ (g/d)}$$

5.2.- ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO

Para poder entender el funcionamiento del proceso de desarrollo de la biopelícula en un medio soporte permeable, es obligado el análisis de los diferentes parámetros que intervienen para deducir su interdependencia.

En este sentido, se ha elaborado una serie de gráficos que interrelacionan conjuntos de variables y parámetros (Anexo A.4 "Relaciones entre variables y parámetros. Gráficas"), presentándose en este capítulo aquellos que dan algo de luz al entendimiento del sistema.

Los gráficos mencionados, se agrupan en varios bloques con un parámetro concreto común, que permiten una estructura lógica y fácilmente comprensible.

Todos los gráficos abarcan los dieciséis experimentos que han figurado en el planteamiento de la etapa experimental, y refieren los resultados del estado estacionario que se alcanzó para cada experimento.

La relación entre parámetros, se hará teniendo en

cuenta cuatro grupos fundamentales de parámetros en el desarrollo del proceso. Son los siguientes:

- 1.- Rendimiento del proceso (Eliminación de Sustrato).
- 2.- Biomasa del Sistema.
- 3.- Consumo de Oxígeno.
- 4.- Eliminación del Nitrógeno.

El diseño y aplicación del sistema de depuración mencionado, depende del análisis de parámetros que se acaba de describir. Como aplicación de esta elaboración, en el apartado 6.2 se presentará un procedimiento de diseño.

Es importante se tenga en cuenta que el uso de rectas en la mayoría de los ajustes que se realizarán en los apartados siguientes, se hace para indicar fundamentalmente la tendencia de la relación que se analiza.

5.2.1.- Rendimiento del Proceso.

Con el fin de detectar los factores o parámetros que influyen sobre el rendimiento de eliminación de sustrato (DQO o DBO5), se han comparado los valores del rendimiento o de parámetros que pueden expresar en alguna medida dicho rendimiento, con los valores de los parámetros que se consideran importantes a este respecto. Los parámetros que se han interrelacionado en este primer bloque fueron:

-RENDIMIENTO DQO Y DBO5.

-CARGAS ORGANICAS:

Afluyente y Eliminada.

-CARGAS ORGANICAS ESPECIFICAS:

Afluyente y Eliminada.

-CONCENTRACIONES DE SUSTRATO:

Afluyente y Efluente.

-CARGA HIDRAULICA.

-MODIFICACIONES POR BALANCES DE S Y COE.

Entre todos estos parámetros, se han elegido las relaciones que mejor pueden explicar la influencia sobre el rendimiento en DQO, y que son las siguientes:

- COA-RENDQO
- So-RENDQO
- S-RENDQO
- RENDQO-COE
- RENDQO-COXE

Estos parámetros, a su vez, están relacionados con todos los que conforman los tres bloques restantes, y de estas relaciones se vuelven a seleccionar los que siguen definiendo cualitativa y cuantitativamente el proceso estudiado. De esta forma se incluyen las relaciones siguientes:

- ESPESOR-RENDQO
- TRF(SS)-RENDQO

Asimismo, cada uno de los parámetros que ejercen influencia sobre el rendimiento en DQO, están influenciados por otros. Se recogen las relaciones más significativas del desarrollo realizado, por sub-bloques:

Influencia de la carga orgánica afluyente (COA):

- COA-S
- COA-XeB

-COA-TCO(DQO)

-COA-ESPESOR

-COA-DENSIDAD

-COA-N2

-COA-COE

Influencia de la carga orgánica específica afluente (COXA):

-S-COXA

-TCO(X)-COXA

-ESPESOR-COXA

-DENSIDAD-COXA

-SSV/SS-COXA

-TRF(SSV)-COXA

-CRE-COXA

-XeB-COXA

Influencia de la carga orgánica eliminada (COE):

-TCO(DQO)-COE

-S-COE

Modificaciones por balances:

-S*-S

-COE-COE*

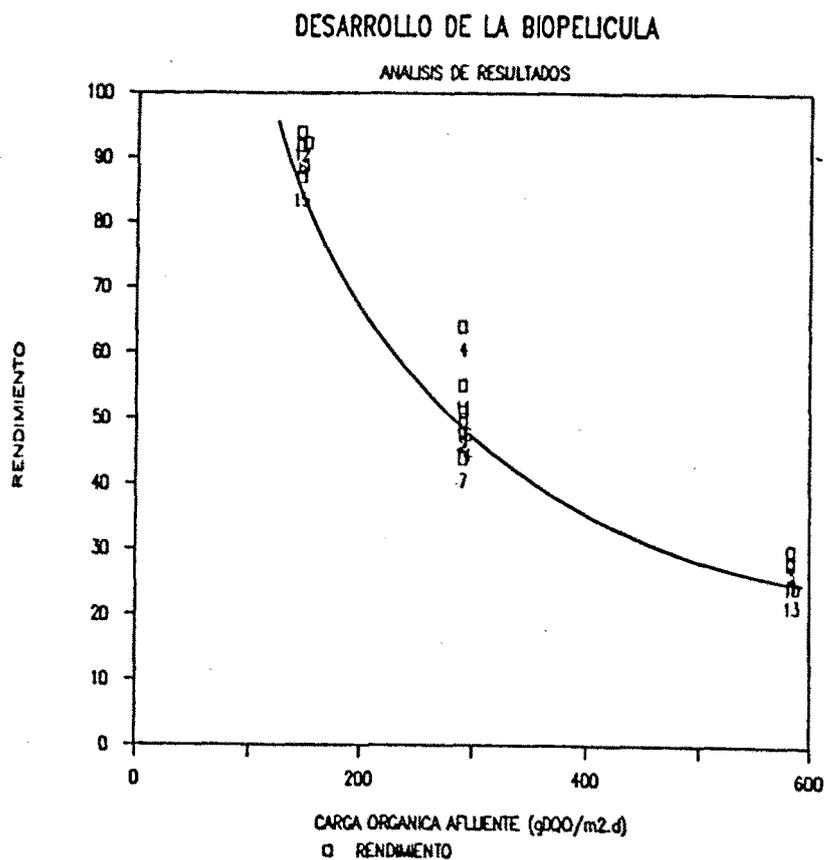
Otros factores:

-%SSV/SS-COXE

-CH-S

5.2.1.1.- Rendimiento de eliminación del sustrato:

COA-RENDQO: Se observa que al aumentar la carga orgánica afluyente (COA), representada en este caso por la Demanda Química de Oxígeno, el rendimiento en eliminación de DQO del proceso disminuye. (Gráfica 1).



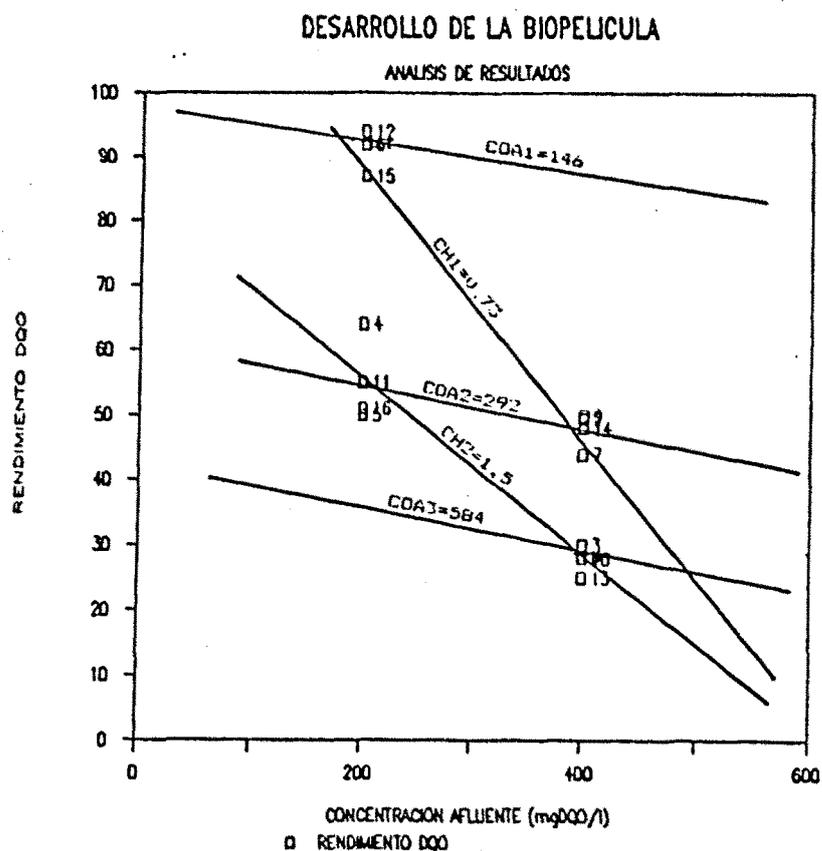
Se deduce que para valores de C.O. Afluyente de 146 g./m².d, se puede garantizar un Rendimiento superior al 85%, (92-94% si se trata de un proceso con la relación de oxígeno más ajustada según se verá más adelante). Asimismo, se obtiene de esta observación que para cargas orgánicas superiores en dos y tres veces a la mencionada, el rendimiento oscila entre 64% y 25%.

Se ha ajustado el conjunto total de experimentos, aplicando una ecuación doble logarítmica a los resultados, se obtiene, entonces, un coeficiente de correlación de: -0,9803. La ecuación es:

$$\text{RENDQO} = 7540,17 \cdot \text{COA}^{-0,8818}$$

So-RENDQO: La influencia de la concentración de sustrato afluyente, (en DQO), sobre el Rendimiento, es tal que, a medida que crece la So, el rendimiento aparentemente disminuye. (Gráfica 2). Esta relación complementa la estudiada en el apartado anterior. Del análisis completo de

la gráfica, con las rectas en función de la COA y de CH, se deduce que la influencia del primer parámetro (COA) respecto al segundo (CH), es más apreciable, ya que para la misma carga orgánica el rendimiento permanece dentro de un rango de valores relativamente pequeño, y en cambio la CH varió desde $0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ a $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$



Para concentraciones de 200 mg/l, el rango de rendimientos obtenido ha sido 50-94%. Para So de 400 mg/l, el

rango ha variado desde el 25% al 51%. Ajustando dos rectas en función de la CH, se establecen las correlaciones lineales, de coeficientes -0,993 y -0,956, sigüentes:

$$\text{RENDQO} = 135,31 - 0,22.S_o; \text{CH} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

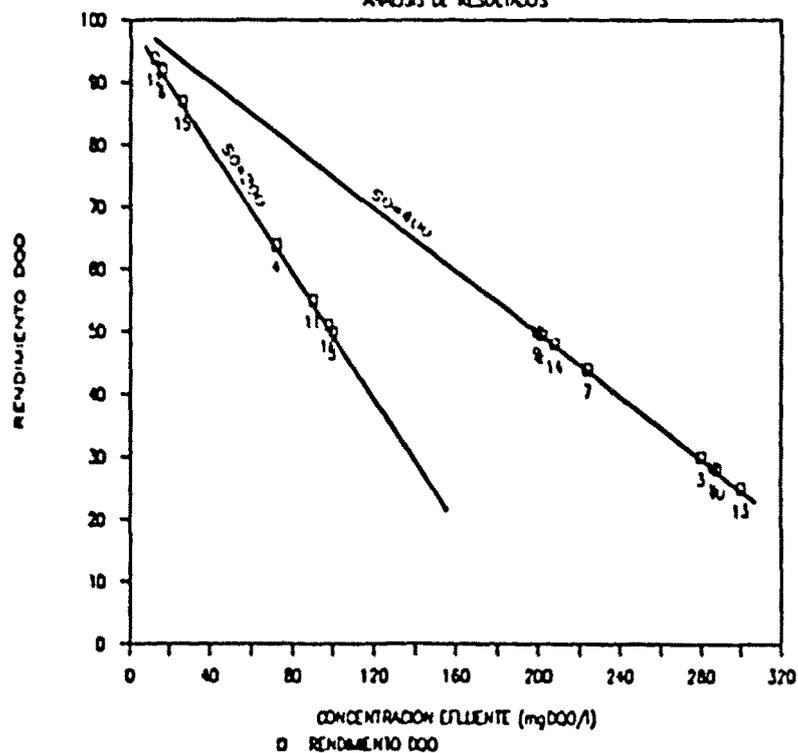
$$\text{RENDQO} = 82 - 0,14.S_o; \text{CH} = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

S-RENDQO: La relación entre la concentración en el efluente con el rendimiento, (gráfica 3), indica que las concentraciones en el efluente más bajas que se han alcanzado, lo son, lógicamente, para los valores menores en la concentración afluyente.

Las S menores alcanzadas están en el rango de 12 a 26 ppm y son las correspondientes a $S_o = 200 \text{ mg/l}$. $\text{COA} = 146 \text{ gDQO/m}^2.\text{d}$ y $\text{CH} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Para la misma S_o , y carga orgánica e hidráulica dobles que las anteriores, se obtienen rangos de 72-100 mg/l. Para $S_o = 400 \text{ mg/l}$, el rango se extiende desde 200 a 300 mg/l con distintas COA y CH.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



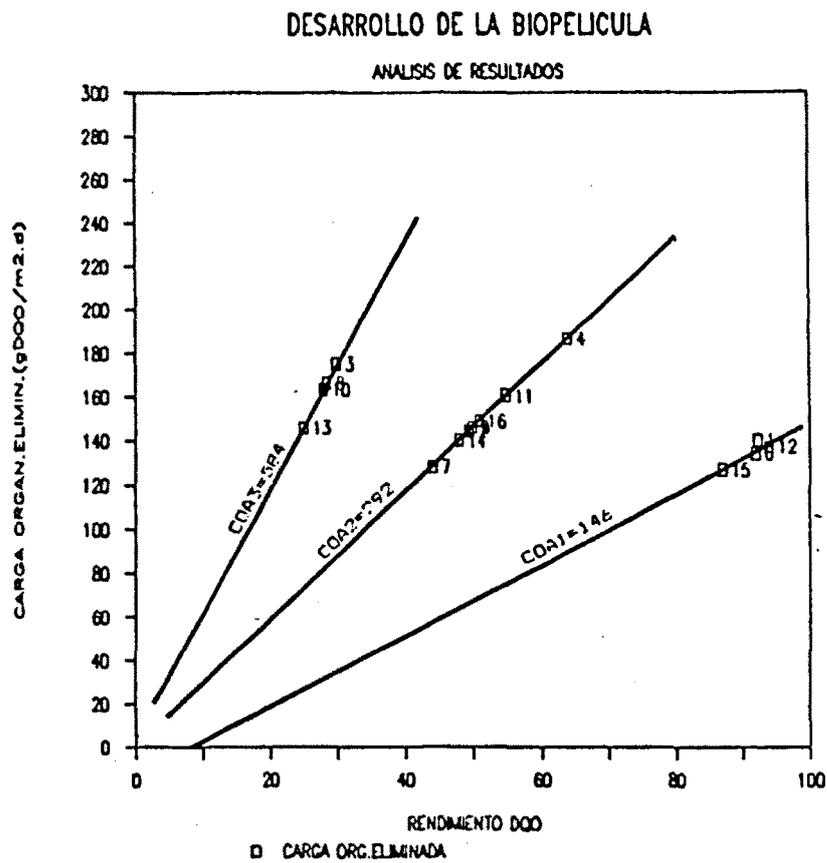
Se han ajustado dos rectas en función de S_0 , con coeficientes de correlación lineal: -0,999.

$$\text{RENDQO} = 100,01 - 0,5.S; S_0 = 200 \text{ mg/l}$$

$$\text{RENDQO} = 100,21 - 0,25.S; S_0 = 400 \text{ mg/l}$$

Lógicamente, estas relaciones son evidentes, puesto que representan la definición del rendimiento.

RENDQO-COE: La relación entre estos parámetros, ha conducido a la gráfica 4, en la cual se observa que, la COE se ha limitado en un rango relativamente pequeño. Si exceptuamos los experimentos 3 y 4, la diferencia entre el valor máximo y mínimo es del orden de los 40 g/m².d, que es casi 1/4 de la mínima carga aplicada, y, aproximadamente, 1/15 de la máxima COA.



La COE máxima se dió para $S_0 = 200 \text{ mg/l}$, $COA = 292 \text{ g/m}^2\text{.d}$, $CH = 1,5 \text{ m}^3\text{/m}^2\text{.d}$ y $QO_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2\text{.d}$. Por otra parte,

el conjunto de valores de COE más uniforme, lo ha sido para $S_o = 200 \text{ mg/l}$, $COA = 146 \text{ g/m}^2\text{.d}$ y $CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{.d}$.

En función de COA, se han relacionado en la siguiente correlación lineal las tres rectas correspondientes, con coeficientes de: 0,994; 0,999 y 0,860

$$COE = 5,07 + 5,63.RENDQO; COA = 584 \text{ g/m}^2\text{.d}$$

$$COE = -0,65 + 2,93.RENDQO; COA = 292 \text{ g/m}^2\text{.d}$$

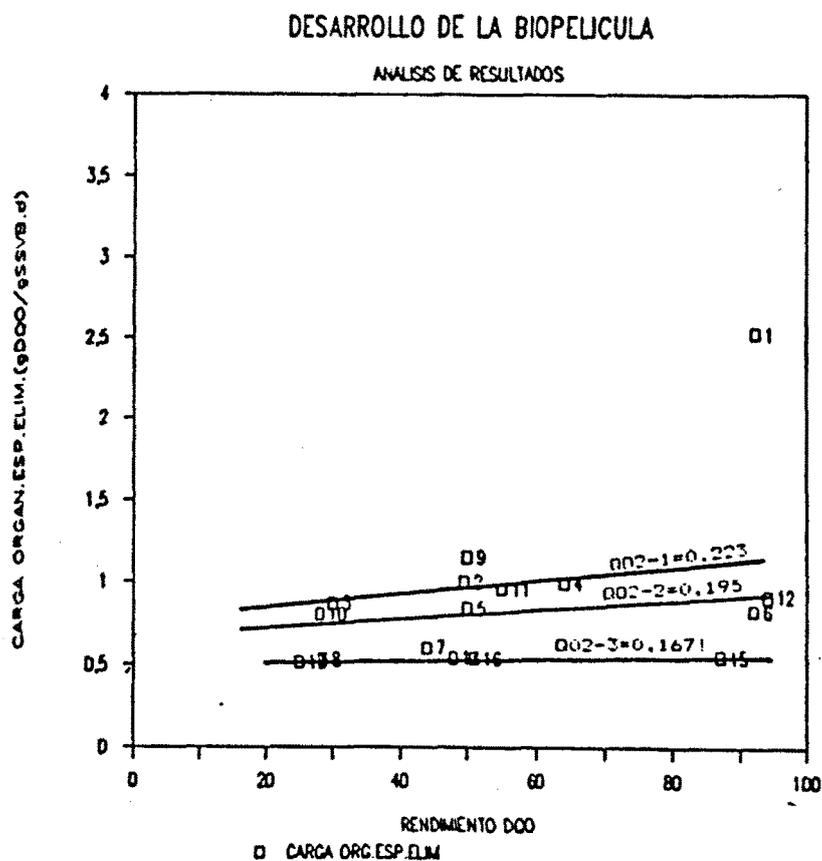
$$COE = -13,57 + 1,62.RENDQO; COA = 146 \text{ g/m}^2\text{.d}$$

Relación que resulta evidente dado que por definición el rendimiento es igual a la COE dividido la COA.

RENDQO-COXE: Esta relación está ajustada considerando el resultado del experimento 1 como no representativo en el conjunto obtenido. (Gráfica 5). De la observación se deduce que la COXE crece al hacerlo el QO_2 y que el rendimiento no depende esencialmente de aquella, ya que, al ser el rango de COXE tan pequeño, se podría considerar constante.

El rango varía desde $0,52 \text{ gDQO/gSSVB}$ a prácticamente 1 gDQO/gSSVB (excepto el experimento 1). Las

mayores relaciones RENDQO-COXE son las correspondientes a la
 COA = 146 g/m².d y CH = 0,73 m³/m².d.



Se han ajustado tres rectas en función de QO₂, con
 coeficientes de correlación: 0,912; 0,356; 0,928.

$$\text{COXE} = 0,764 + 0,004.\text{RENDQO}; \text{QO}_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXE} = 0,676 + 0,003.\text{RENDQO}; \text{QO}_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXE} = 0,513 + 0,0004.\text{RENDQO}; \text{QO}_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

Se deduce la escasa, o nula, relación entre el

rendimiento y COXE, y por otra parte, dato fundamental, la COXE es relativamente constante para una aportación de oxígeno dada.

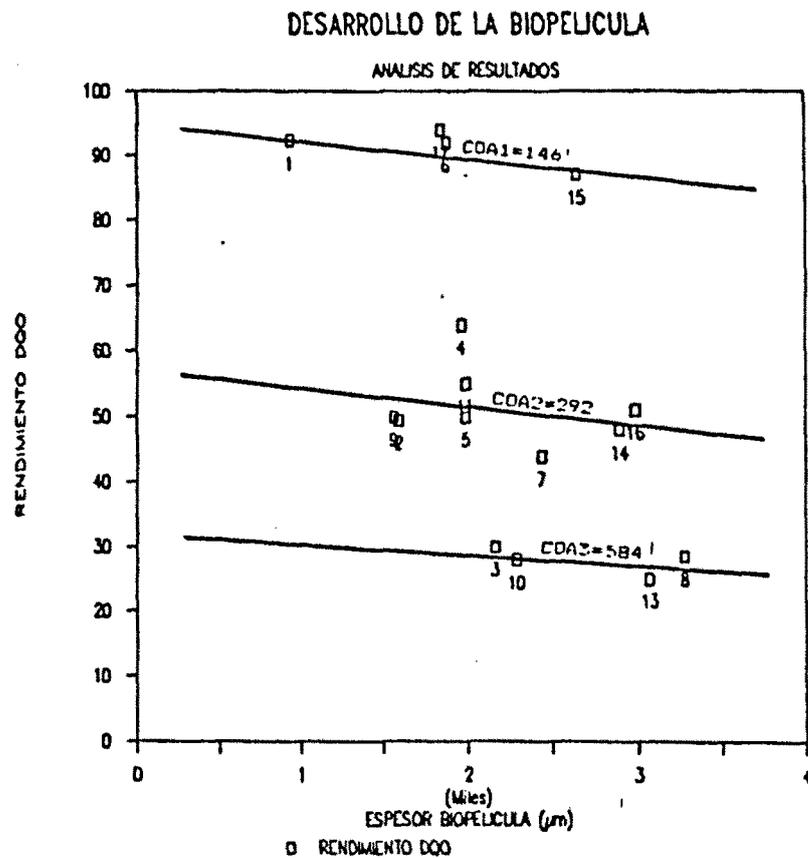
ESPESOR-RENDQO: La influencia del espesor de la biopelícula sobre el rendimiento, (gráfica 6), es tal que, a medida que el espesor aumenta a partir de un cierto rango, el rendimiento parece sufrir una ligera disminución. Se han ajustado tres rectas en función de la COA, y, mientras en la COA1 Y COA2 hay un punto intermedio con rendimiento máximo, en la COA3 los valores de rendimiento permanecen prácticamente constantes con ligera tendencia a disminuir. Esto podría indicar que, mientras en las dos primeras se pasa por el rango de espesor óptimo, en la tercera ya se ha sobrepasado dicho valor.

El rango de espesores obtenido para los experimentos con máximo rendimiento (COA = 146 g/m².d y CH = 0,73m³/m².d) es de 1000-2700 μm. Si se concreta en función del QO₂ para este rango, se obtiene que para el QO₂ = 0,223 Kg/m².d, el espesor medio es de 932 μm; para QO₂ = 0,195 Kg/m².d, es de 1840-1876 μm; y para el QO₂ = 0,167 Kg/m².d,

de 2657 μm .

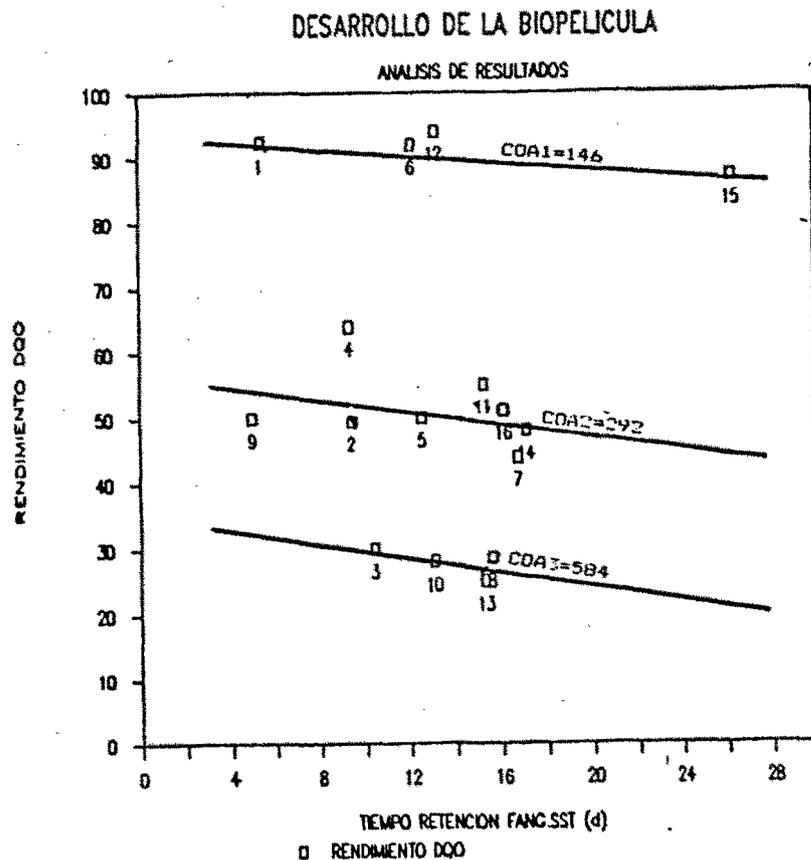
Por todo lo deducido, el rango óptimo de espesores en el que se han obtenido los mayores rendimientos relativos está comprendido en el rango de 1600-2000 μm .

Las rectas se han ajustado para COA constante, con coeficientes de correlación lineal de -0,653; -0,248 y -0,442, para indicar la tendencia.



TRF(SS)-RENDQO: Se observa en la gráfica 7, que se definen claramente tres zonas de valores de RENDQO prácticamente constantes, a los que corresponden rangos de TRF cada vez más pequeños.

Estos rangos tienen los siguientes valores: para los experimentos con RENDQO del orden del 90% , varían entre los 5 y 26 días; para los experimentos con RENDQO del orden del 50%, el TRF oscila entre los 5 y 17 días; por último, para RENDQO del orden del 25%, los TRF están comprendidos entre 10 y 16 días.



Es necesario definir algún parámetro que relacione estos conjuntos de experimentos. De esta forma, se ajustan tres rectas en función de COA, con coeficientes de correlación lineal de 0,796; 0,351 y 0,61. Parece haber una cierta relación entre la aportación de oxígeno (QO₂) y el TRF. A medida que aumentan los valores de QO₂, disminuye el rango de valores del TRF, obteniéndose rangos de 5-10 días; 5-17 días y 15-26 días para QO₂(1), QO₂(2) y QO₂(3), respectivamente.

En función de COA:

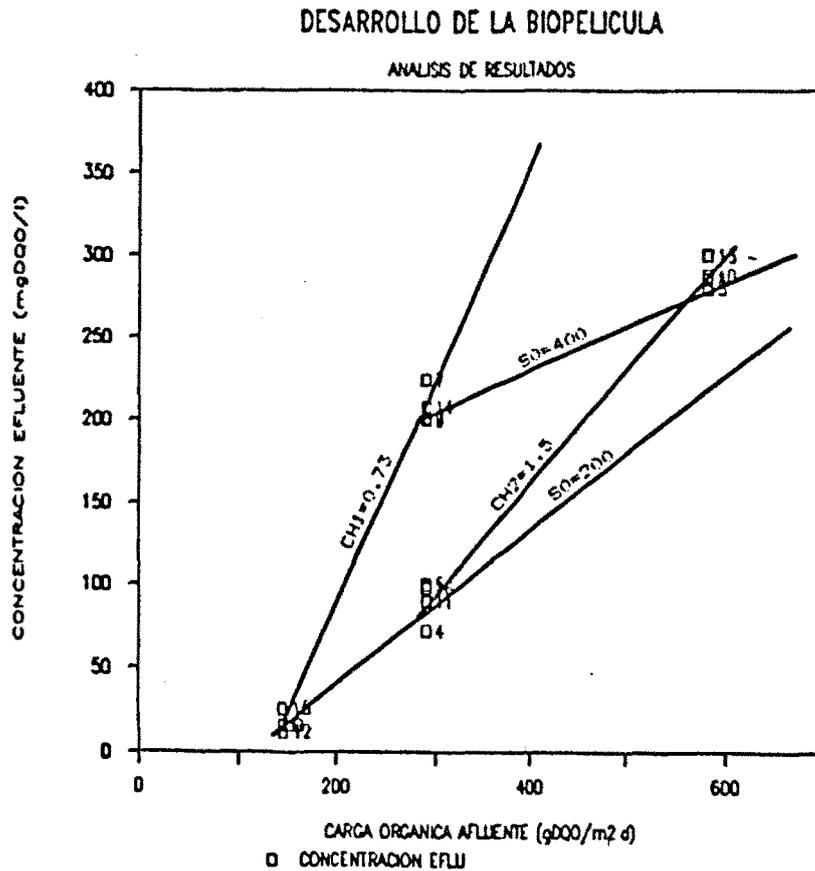
$$\text{RENDQO} = 95,11 - 0,27.\text{TRF}; \text{COA} = 584 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{RENDQO} = 57,91 - 0,47.\text{TRF}; \text{COA} = 292 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{RENDQO} = 35,24 - 0,55.\text{TRF}; \text{COA} = 146 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

5.2.1.2.- Influencia de la COA.

COA-S: La relación entre estos parámetros se recoge en la gráfica 8 donde se observa que la S es prácticamente constante para cada grupo de cuatro experimentos, y que a medida que crece COA, igualmente lo hace S. Para COA2 constante, la diferencia en los valores de S son debidos a la CH y So.



Los rangos de valores de S que corresponden a los cuatro conjuntos de experimentos son: Para COA1 12-16 mg/l; para COA2 y So = 200 mg/l, 72-100 mg/l; para COA2 y So = 400 mg/l, 200-224 mg/l; y para COA3, 280-300 mg/l.

Se han ajustado 4 rectas en función, 2 de So y 2 de CH. Los coeficientes de correlación son, respectivamente: 0,972; 0,979; 0,996 y 0,996. Las correlaciones que se obtienen son:

En función de So:

$$S = -56,35 + 0,5.COA; \text{ So} = 200 \text{ mg/l}$$

$$S = 128,5 + 0,27.COA; \text{ So} = 400 \text{ mg/l}$$

En función de CH:

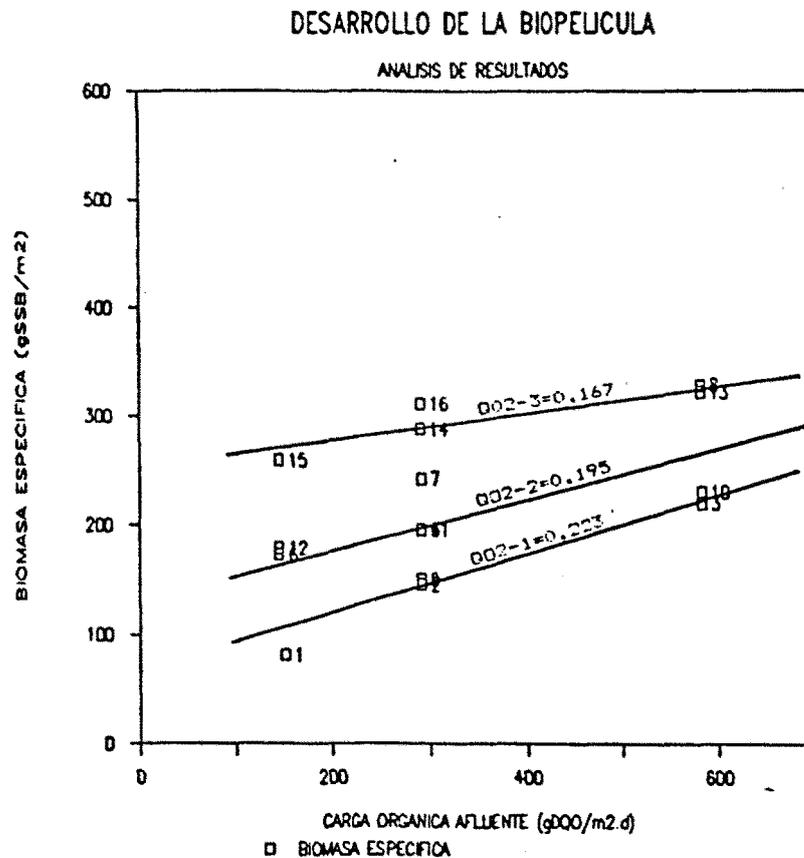
$$S = -177,12 + 1,32.COA; \text{ CH} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$S = -108,51 + 0,68.COA; \text{ CH} = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

COA-XeB: La relación entre estos parámetros indica que: A medida que aumenta COA, existe una tendencia a aumentar XeB.

Los rangos de valores para las tres COA investigadas, están comprendidos entre 80-280 gSSB/m² para

COA1; para COA2 oscilan entre 130-330 gSSB/m², y para COA3, entre 200 y 335 gSSB/m².



Ajustando tres rectas en función de QO₂, (gráfica 9), resultan los rangos siguientes: 80-200 gSSB/m² para QO₂-1, 180-225 para QO₂-2, y para QO₂-3 entre 250-335 g/m².

$$XeB = 66,14 + 0,29.COA; \text{ (Coef.} = 0,852); QO_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2.d$$

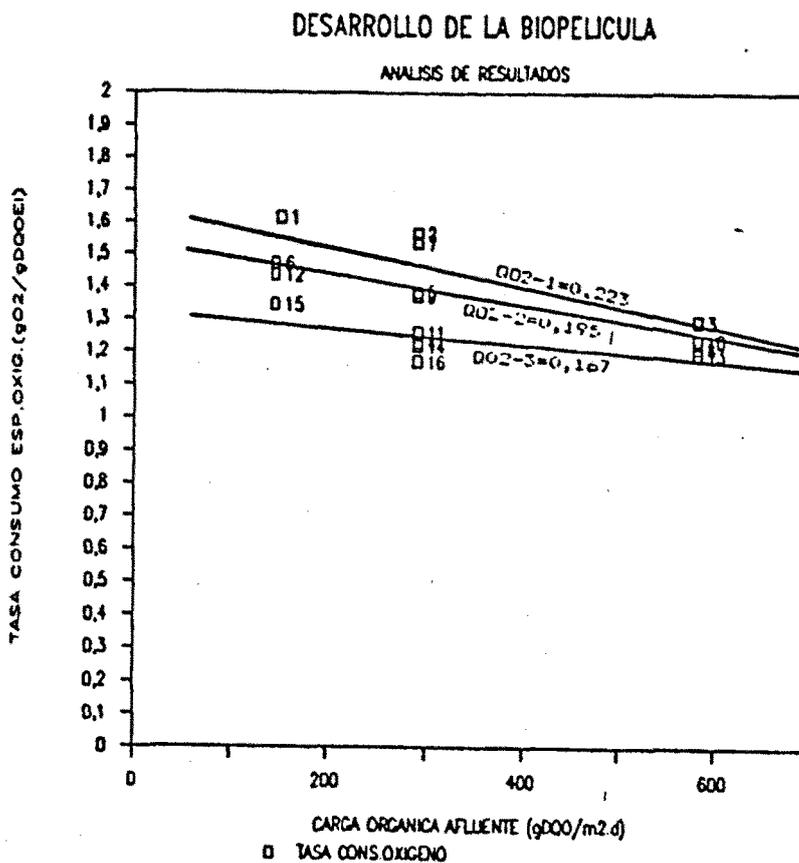
$$XeB = 130,57 + 0,25.COA; \text{ (Coef.} = 0,753); QO_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$XeB = 252,47 + 0,13.COA; \text{ (Coef.} = 0,859); QO_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2.d$$

COA-TCO(DQO): A medida que la COA aumenta, hay tendencia a una disminución poco acentuada en los valores de TCO. (gráfica 10).

Para COA1, el rango de valores de TCO oscila entre 1,35-1,61 g/g DQOEl; para COA2 el rango es: 1,17-1,57 g/g DQOEl; y para COA3 1,2-1,29 g/g DQOEl.

Se ajustan tres rectas en función de QO_2 , con los coeficientes de correlación siguientes: -0,622; -0,757 y -0,617.



$$\text{TCO(DQO)} = 1,64 - (6,6 \cdot \text{COA})10^{-4} ; \text{QO}_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{TCO(DQO)} = 1,54 - (5,19 \cdot \text{COA})10^{-4} ; \text{QO}_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{TCO(DQO)} = 1,32 - (2,67 \cdot \text{COA})10^{-4} ; \text{QO}_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

Esta relación, dado los bajos valores del coeficiente de COA, indica una independencia de TCO respecto a COA y vuelve a expresar la constancia de la COE ya que aproximadamente $\text{TCO(DQO)} = \text{QO}_2 / \text{COE}$.

COA-ESPESOR: A medida que aumenta COA, se refleja una tendencia en el crecimiento del ESPESOR. (gráfica 11).

Los rangos de ESPESORES para COA1, COA2 Y COA3 son, respectivamente, 900-2700 μm ; 1600-3000 μm y 2200-3300 μm .

Ajustando tres rectas en función de QO_2 , resultan unos coeficientes de correlación de valores: 0,843; 0,724 y 0,855. Estas rectas, expresando el valor en micras, es:

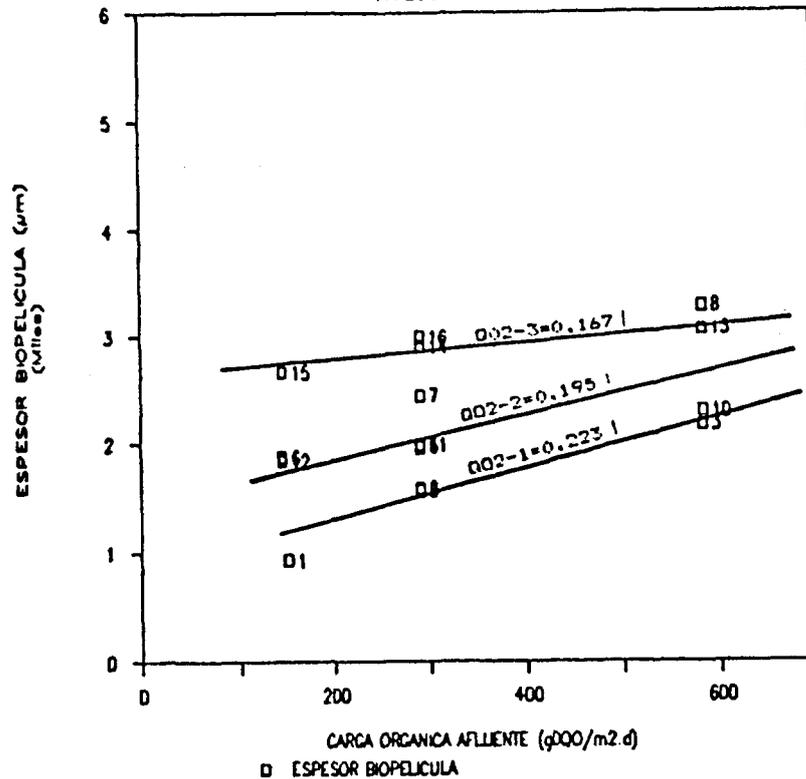
$$\text{ESPESOR} = 883,35 + 2,52 \cdot \text{COA}; \text{QO}_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{ESPESOR} = 1421,53 + 2,24 \cdot \text{COA}; \text{QO}_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{ESPESOR} = 2631,31 + 0,83 \cdot \text{COA}; \text{QO}_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

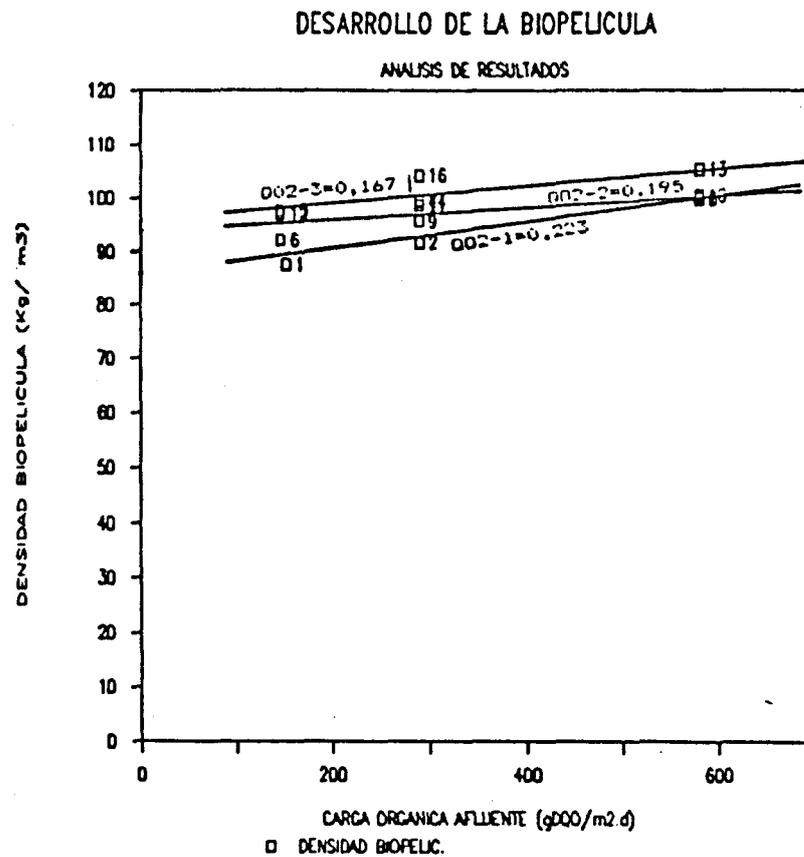


COA-DENSIDAD: En la gráfica 12 se puede observar una tendencia muy ligera a aumentar la densidad, a medida que aumenta la COA. También se podría afirmar que, prácticamente, la densidad permaneció constante para las COA experimentadas.

Si se confirma la constancia del valor de la densidad durante todos los experimentos, el rango de variación se mantendría entre 90 Kg/m^3 y 105 Kg/m^3 .

Se han ajustado tres rectas en función de QO_2 , para

establecer la muy pequeña diferencia entre unos y otros experimentos. Los coeficientes de correlación fueron: 0,756; 0,743 y 0,814.



$$\text{DENSIDAD} = 86,24 + 0,025 \cdot \text{COA}; \quad \text{QO}_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

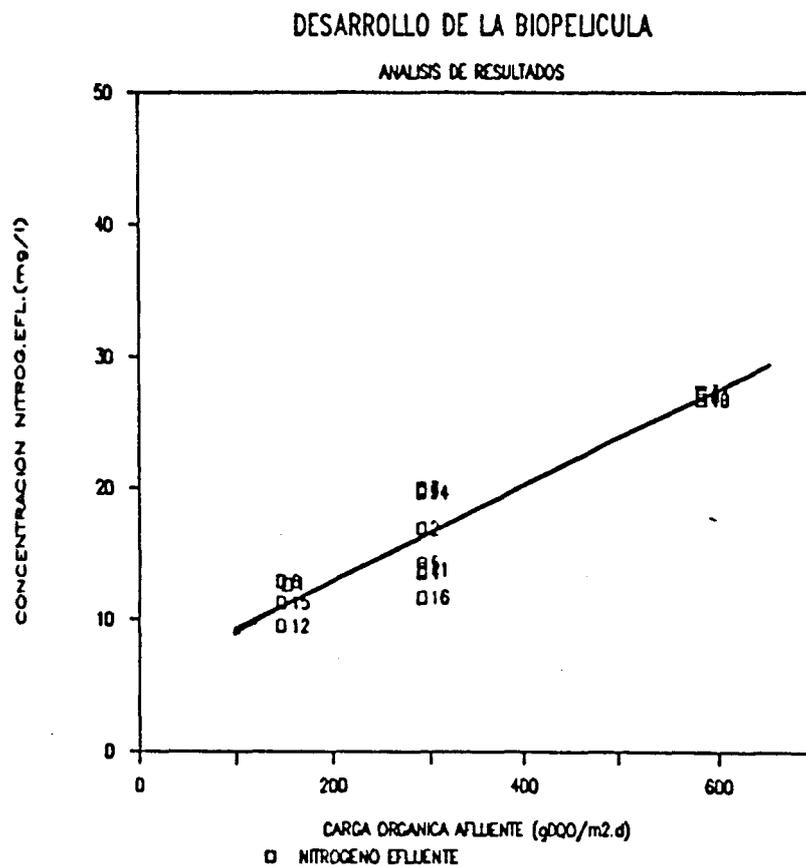
$$\text{DENSIDAD} = 93,84 + 0,012 \cdot \text{COA}; \quad \text{QO}_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$\text{DENSIDAD} = 96,26 + 0,016 \cdot \text{COA}; \quad \text{QO}_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

COA-N₂: De la relación de estos parámetros, se deduce que: a medida que crece COA, aumenta N₂. (Gráfica 13).

Los rangos para COA1, COA2 y COA3 son, respectivamente, 10-13 mg/l; 12-20 mg/l y 27-28 mg/l de N₂.

Se ajusta una recta cuyo coeficiente de correlación



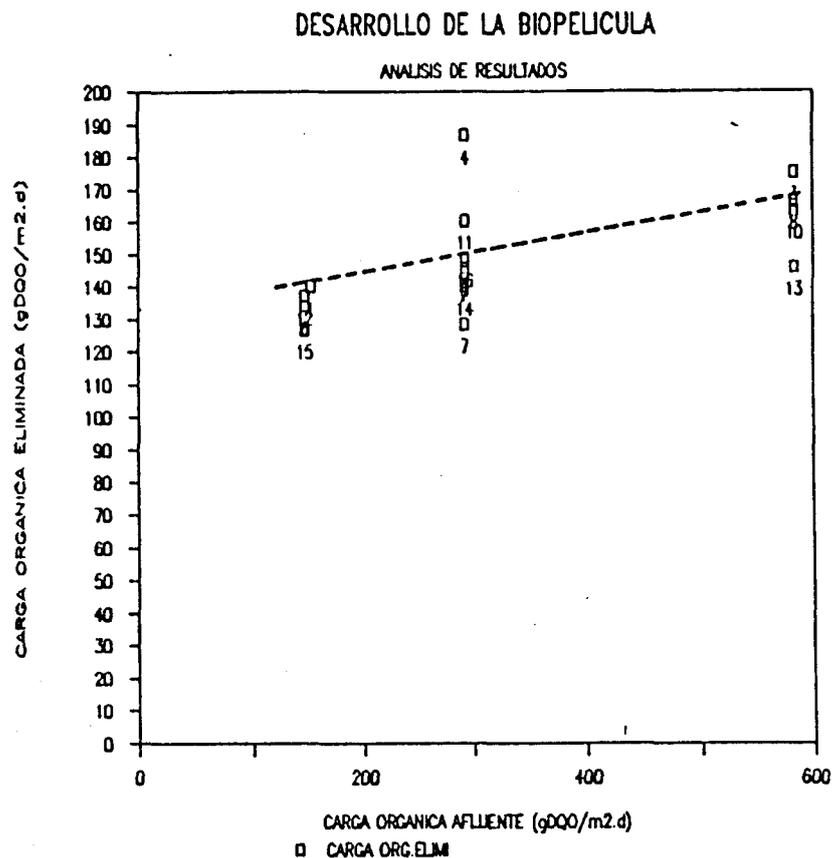
es 0,9287. La correlación lineal establecida, responde a la ecuación:

$$N_2 = 5,933 + 0,036 \cdot COA$$

COA-COE: Se observa para esta relación de parámetros, que al crecer COA, crece COE hasta un máximo que corresponde al experimento 4. A partir de este máximo, existe una tendencia a mantenerse constante COE.

Cualitativamente, el experimento 4 corresponde a las características paramétricas siguientes: $S_0 = 200 \text{ mg/l}$; $CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ y $QO_2 = 0,223 \text{ Kg}/\text{m}^2.\text{d}$, es decir a una condición de QO_2 máximo de los empleados.

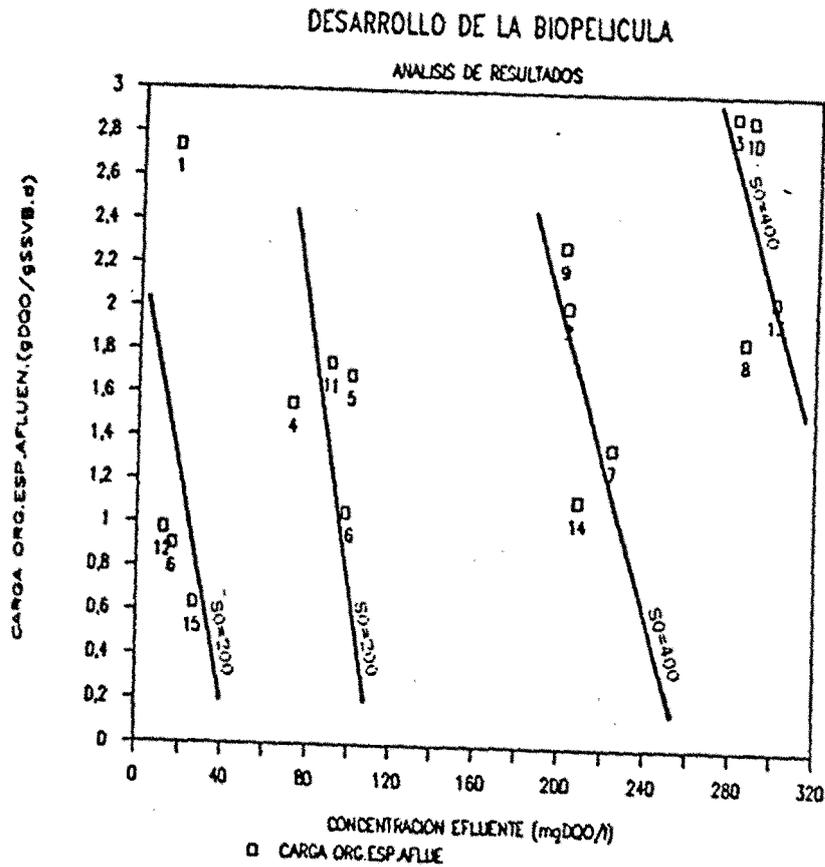
Se ajusta una recta (gráfica 14), simplemente para correlacionar todos los experimentos, obteniéndose la ecuación:



$$COE = 129,68 + 0,06.COA; \text{ (factor correlación} = 0,585)$$

5.2.1.3.- Influencia de la COXA:

S-COXA: En esta relación paramétrica se puede observar que, al aumentar la COXA, la tendencia es que aumente la concentración en el efluente. Los rangos de valores así lo indican.



Para la COXA que corresponde a $S_o = 200$ mg/l, y $CH_1 = 0,73$ m³/m².d, exceptuando el experimento 1, el rango varia entre 0,63-0,97 gDQO/gSSVB.d. Para la COXA correspondiente a S_o igual y CH_2 , el rango es de 1,06-1,75 gDQO/gSSVB.d; para $S_o = 400$ mg/l y CH_1 , el rango oscila entre 2,3-2,89 gDQO/gSSVB.d; por último para S_o igual que la anterior y $CH_2 = 1,5$ m³/m².d, el rango es 1,87-2,91 que corresponde al máximo valor de COXA.

Ajustando 4 rectas en función de S_o (gráfica 15), se obtiene las ecuaciones lineales siguientes.

$$COXA = 2,2 - 0,05.S; S_o = 200 \text{ mg/l}; CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

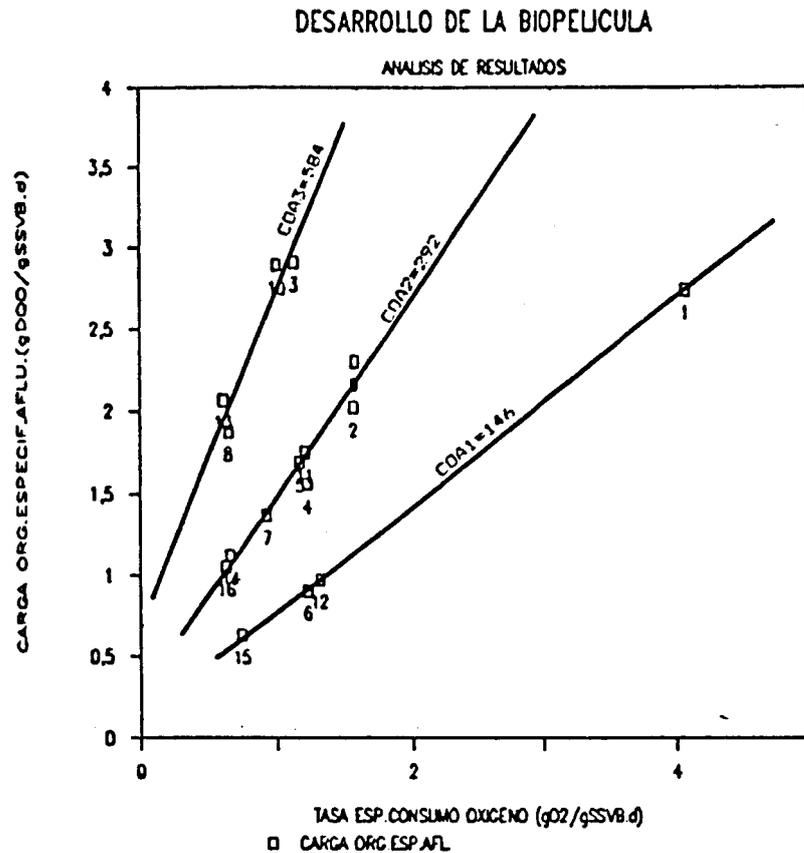
$$COXA = 6,01 - (5,53.S)10^{-3}; S_o = 200 \text{ mg/l}; CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

$$COXA = 8,75 - 0,03.S \text{ (Coeficiente de correlac.} = 0,669); S_o = 400 \text{ mg/l}; CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

$$COXA = 12,07 - 0,03.S \text{ (Coeficiente de correlac.} = 0,516); S_o = 400 \text{ mg/l}; CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

TCO(X)-COXA: La relación entre estos parámetros se puede observar mejor, si se ajustan las relaciones entre experimentos con una característica común. En este caso es la

COA esta característica. (gráfica 16). El análisis es, entonces, el siguiente:



Los rangos de variación de COXA, para COA1 se han determinado en el análisis de la relación paramétrica S-COXA. Los rangos de variación de TCO(X) son: 0,74-1,31 gO₂/gSSVB.d (excepto el experimento 1); para COA2: 0,63-1,58 gO₂/gSSVB y para COA3: 0,65-1,13 gO₂/gSSVB.d.

Las rectas que se han ajustado, tienen coeficientes de correlación de: 0,9998; 0,9727 y 0,9614. Las ecuaciones de las rectas son:

$$\text{COXA} = 0,141 + 0,636.\text{TCO(X)}; \text{COA} = 146 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXA} = 0,328 + 1,143.\text{TCO(X)}; \text{COA} = 292 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXA} = 0,688 + 2,055.\text{TCO(X)}; \text{COA} = 584 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

ESPEJOR-COXA: De la observación de esta relación de parámetros, se obtiene la siguiente conclusión: A medida que crece la COXA, hay una ligera tendencia del espesor a disminuir.

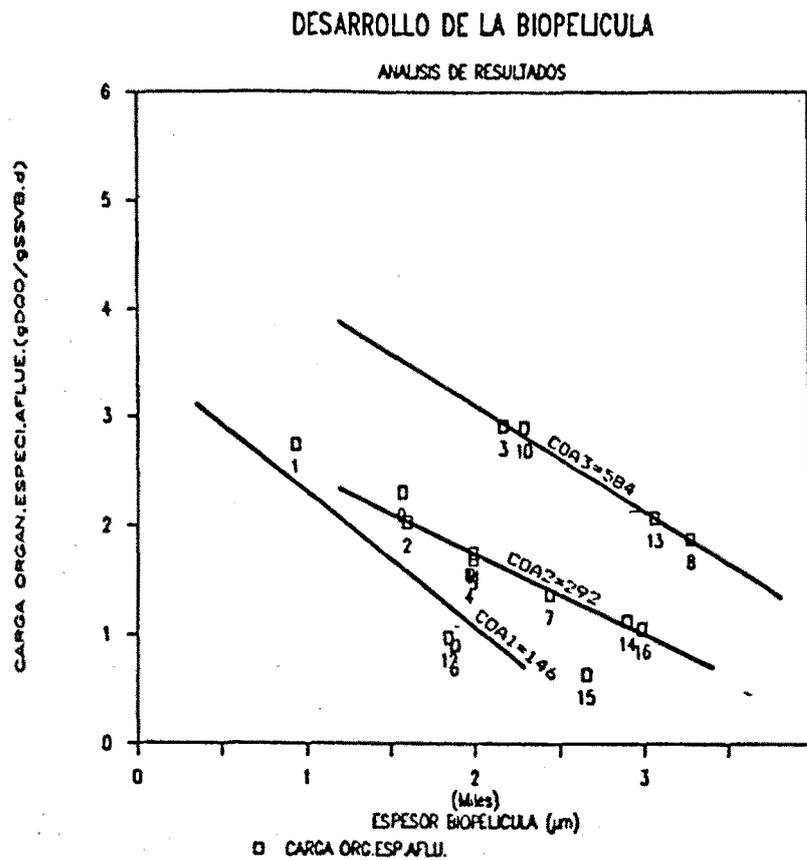
Los rangos en función de COA son: 1000-2700 μm para COA1; 1600-3000 para COA2 y 2200-3300 para COA3.

Las relaciones lineales resultantes, en función de COA, son: (gráfica 17).

$$\text{COXA} = 3,6 - 1,25.\text{ESPEJOR}, \text{ (Coefic. relación} = 0,916); \text{COA} = \\ = 146 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXA} = 3,24 - 0,747.\text{ESPEJOR} \text{ (Coefic. relación} = 0,956); \text{COA} = \\ = 292 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

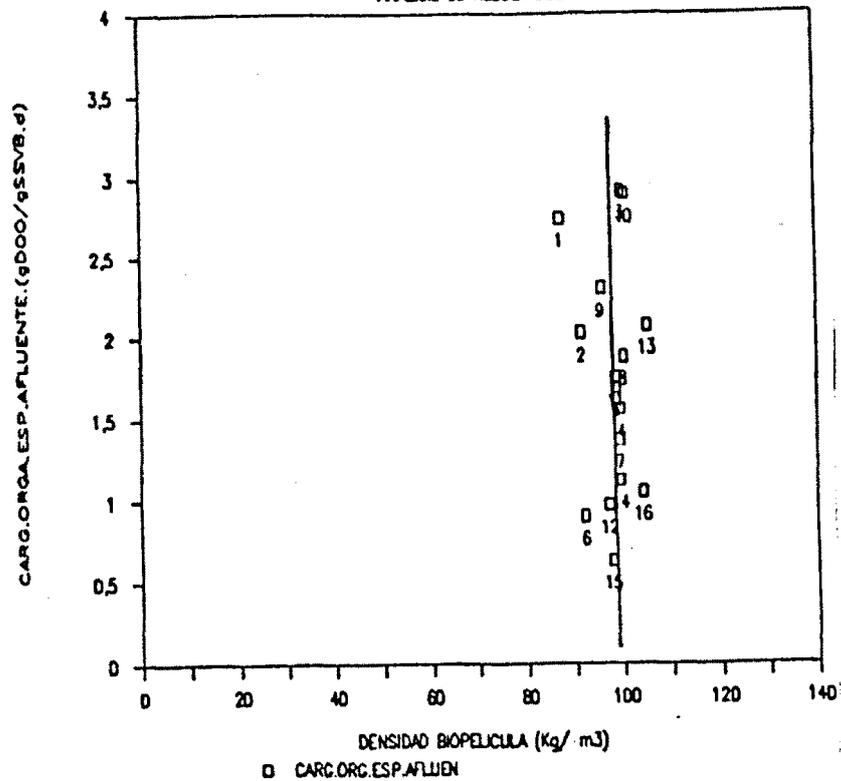
$$\text{COXA} = 5,08 - 0,979 \cdot \text{ESPESOR} \quad (\text{Coefic. relación} = 0,997); \text{COA} = 584 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$$



DENSIDAD-COXA: Se observa en la relación de parámetros propuesta que, la densidad ha variado dentro de un rango muy pequeño de valores, (gráfica 18), por lo que se puede considerar constante en todo el proceso.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

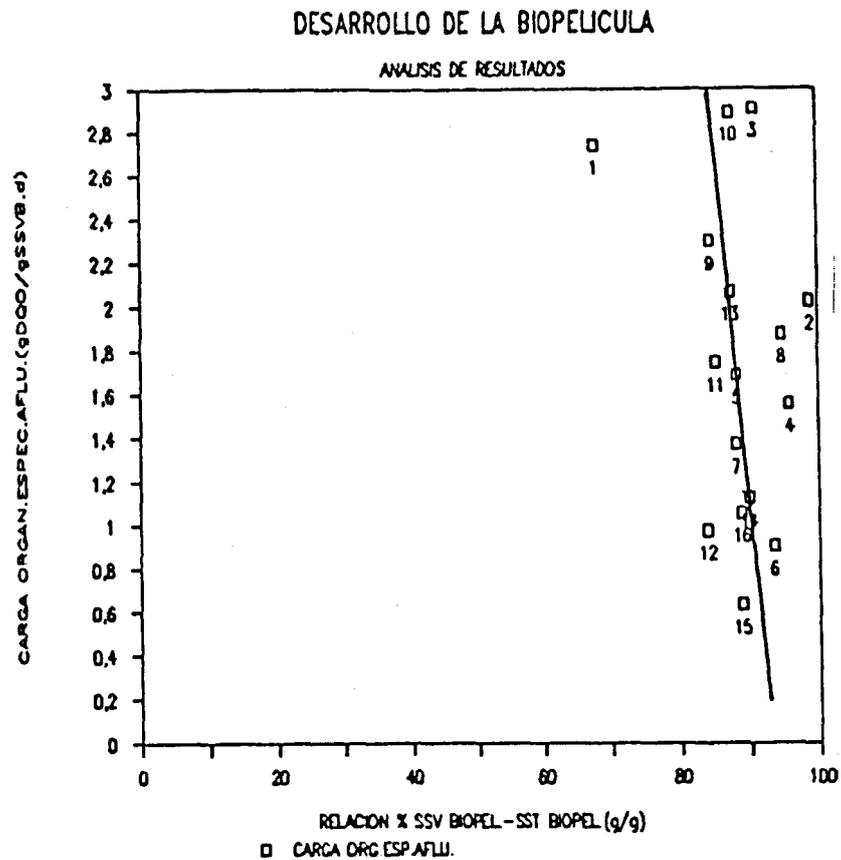
ANALISIS DE RESULTADOS



Bien es cierto que estos valores representados, corresponden a la medida realizada al final de la fase estacionaria, por lo que se puede suponer que al final de cada experimento, la biopelícula "recobraba" la densidad "característica" del proceso.

El valor medio de todos los obtenidos, es decir de los 63 medidos, es 93,37 Kg/m³.

%SSVB/SSB-COXA: Esta relación de parámetros, indica que hay una ligera tendencia a que, a medida que la COXA aumenta, disminuya la relación SSVB/SSB (gráfica 19).



El rango de variación de %SSVB/SSB, está comprendido entre 0,68 g/g y 0,99 g/g., correspondiendo, respectivamente a $S_o = 200 \text{ mg/l}$ y $S_o = 400 \text{ mg/l}$.

La relación lineal resultante de considerar todos los valores, tiene un coeficiente de correlación de -0,281. y la ecuación resultante es:

$$\%SSVB/SSB = 93,08 - 2,677.COXA$$

Si no se considera el experimento 1, entonces la ecuación resultante es:

$$\%SSVB/SSB = 89,527 + 0,1533.COXA$$

Evidentemente en el primer caso existe la tendencia indicada. En el segundo caso la tendencia es hacia un valor constante, y por lo tanto no habría influencia de la COXA sobre la relación %SSVB/SSB.

COXA-TRF(SSV): Se observa de esta relación que, a medida que disminuye la COXA, aumenta el TRF.

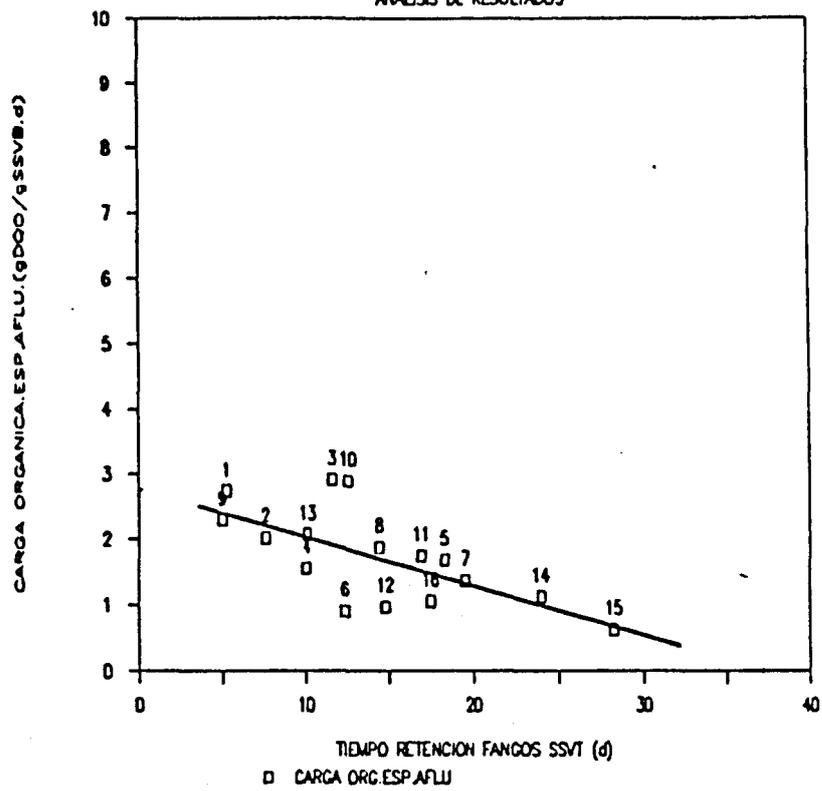
El rango de valores extremos es de 5 días a 28 días, correspondiendo los valores más bajos al comienzo de cada conjunto de experimentos, y los más altos, al final de esos conjuntos (gráfica 20).

Se ha ajustado una recta general de esta tendencia, con coeficiente de correlación 0,673. Esta ecuación lineal es:

$$COXA = 2,82 - 0,076.TRF$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

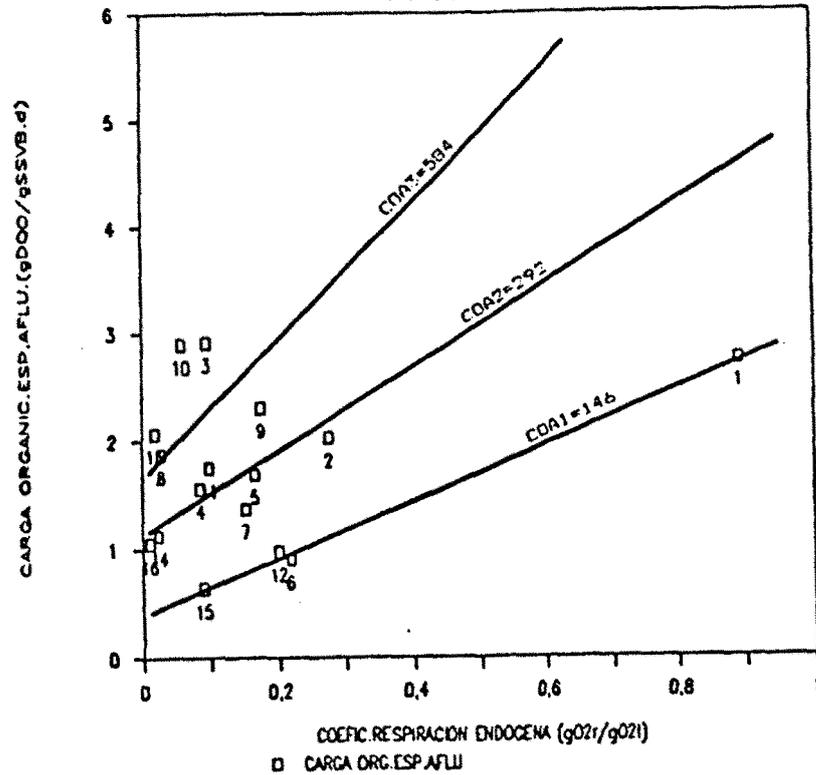
ANALISIS DE RESULTADOS



COXA-CRE: De la observación de la relación propuesta (gráfica 21), se deduce que el CRE varía muy poco a pesar de la variación de COXA (excepto el exp.1).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



Los rangos de variación de CRE, están entre 0,01 y 0,27; correspondiendo los valores más bajos a Q0z-3 (0,01-0,09 gO2r/gO2t).

Se ajustan tres rectas en función de COA, con coeficientes de correlación: 0,997; 0,787 y 0,889. Las ecuaciones lineales resultantes son:

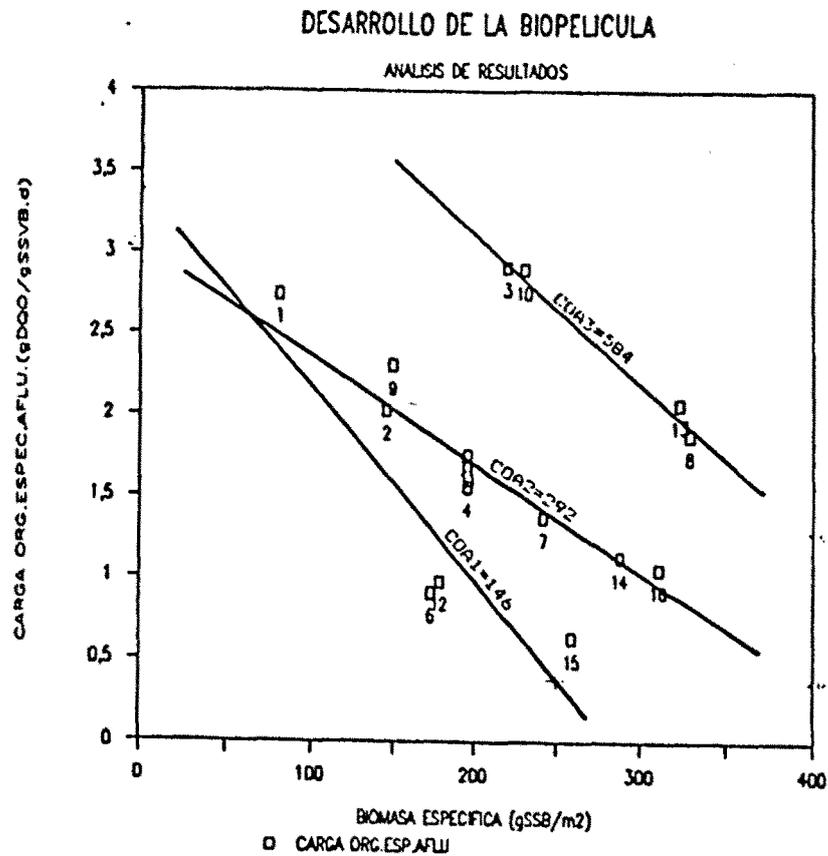
$$\text{COXA} = 0,39 + 2,64.\text{CRE}; \text{COA} = 146 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXA} = 1,13 + 3,93.\text{CRE}; \text{COA} = 292 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXA} = 1,67 + 15,27.\text{CRE}; \text{COA} = 584 \text{ g/m}^2.\text{d}$$

COXA-XeB: Se han relacionado estos parámetros, para obtener la correspondencia siguiente: A medida que disminuye la COXA, aumenta XeB. (Gráfica 22).

Los rangos de valores, en función de COA son: 80-260 gSSB/m^2 ; 150-310 gSSB/m^2 y 220-330 gSSB/m^2 , respectivamente.



Las rectas que resultan al ajustar los puntos en función de COA, son:

COXA = 3,4 - 0,012.XeB (Coefic. de correlación = -0,91);

COA = 146 g/m².d

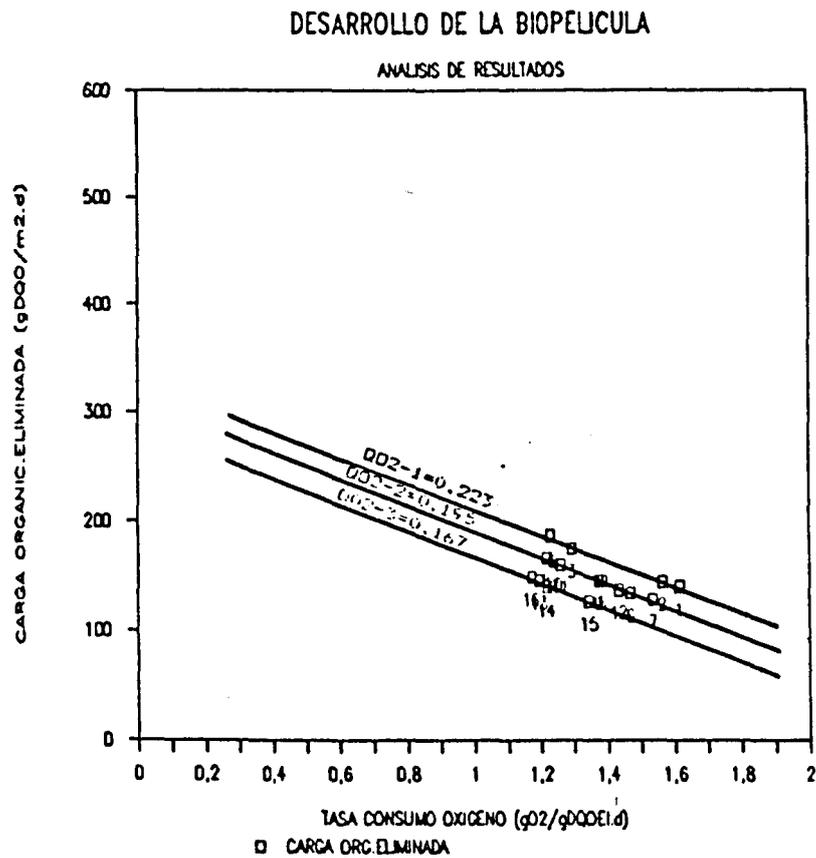
COXA = 3,06 - 0,00674.XeB (Coefic. de correlación =
-0,954); COA = 292 g/m².d

COXA = 4,99 - 0,00928.XeB (Coefic. de correlación =
-0,992); COA = 584 g/m².d

5.2.1.4.- Influencia de COE:

TCO-COE: La relación entre estos parámetros, indica que la COE prácticamente ha permanecido constante y la TCO, ha variado, en consecuencia, muy poco. (Gráfica 23).

Los rangos de valores para TCO, considerando todo el conjunto, han sido: 1,17-1,61 gO₂/gDQOEL.



Se han ajustado las rectas en función de QO_2 , con coeficientes de correlación: -0,997; -0,997 y -0,988.

Las ecuaciones lineales resultantes son:

$$COE = 331,07 - 118,86.TCO; QO_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$COE = 314,4 - 122,1.TCO; QO_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$COE = 289,68 - 120,84.TCO; QO_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2.d$$

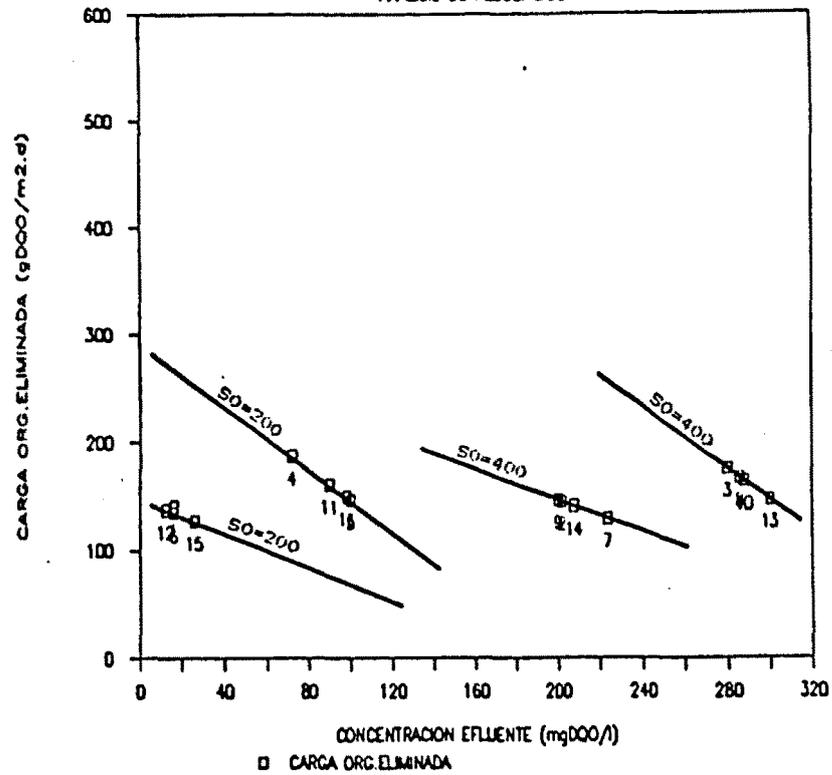
S-COE: De la relación de estos dos parámetros, se puede deducir que: Aún aumentando S, la COE se mantuvo, prácticamente constante. (Gráfica 24).

Los rangos de S obtenidos, en función de S_o , son los siguientes: Para $S_o = 200 \text{ mg/l}$, se obtienen dos rangos en función de la CH, a saber: 12-26 ppm y 72-100 mg/l (CH1 y CH2, respectivamente. Para $S_o = 400 \text{ mg/l}$, y con el mismo razonamiento anterior, se obtienen: 200-224 mg/l y 280-300 mg/l.

Se ajustan las rectas en función de S_o y CH, resultando los coeficientes de correlación siguientes: -0,8598; -0,999; -0,999 y -0,999.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



Las ecuaciones lineales resultantes son:

$$COE = 148,81 - 0,8118.S; So = 200 \text{ mg/l}; CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

$$COE = 291,84 - 1,46.S; So = 200 \text{ mg/l}; CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

$$COE = 291,83 - 0,73.S; So = 400 \text{ mg/l}; CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

$$COE = 583,74 - 1,459.S; So = 400 \text{ mg/l}; CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.d$$

Relaciones que resultan evidentes, dado que por definición $COE = CH.S_o - CH.S$.

5.2.1.5.- Parámetros modificados por Balances.

S*-S: Esta gráfica explica el efecto que tiene el fenómeno de la desnitrificación de cara a la eliminación de DQO. La concentración de la biopelícula aerobia, está referida a la capa más externa en que se da la oxidación carbonácea. La figura 5.1 representa la estructura de la biopelícula desarrollada en el proceso. Jácome (1990).

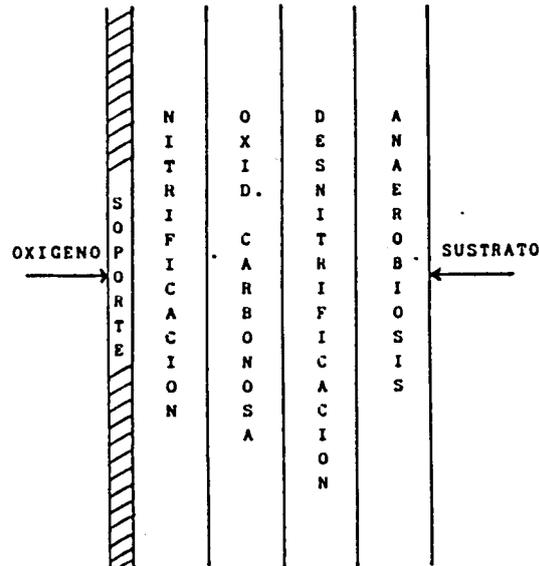
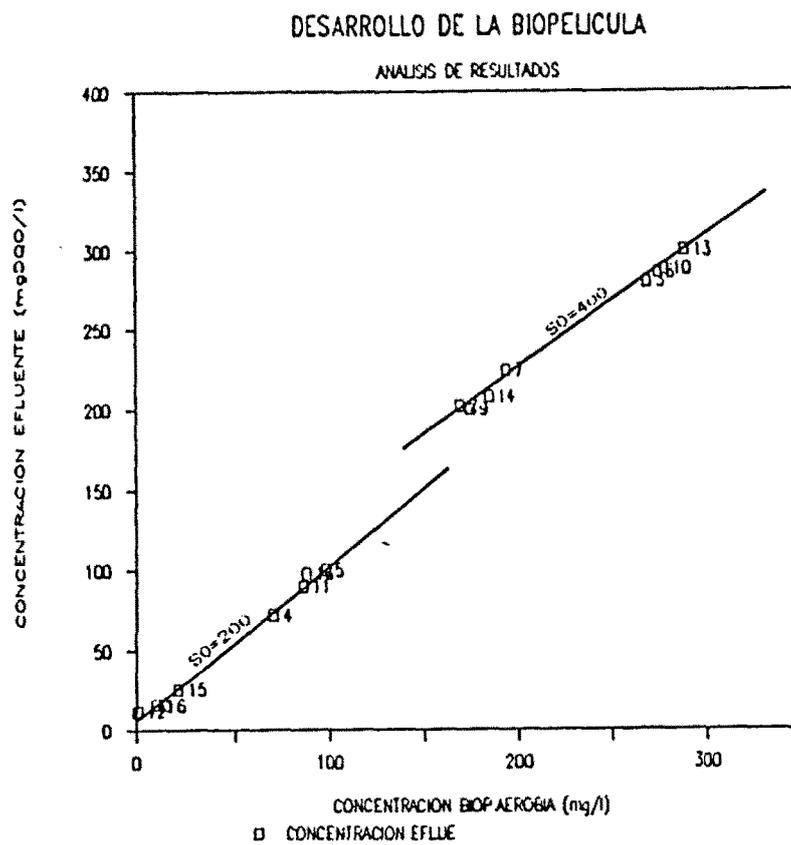


FIGURA 5.1.- ESTRUCTURA DE LA BIOPELICULA

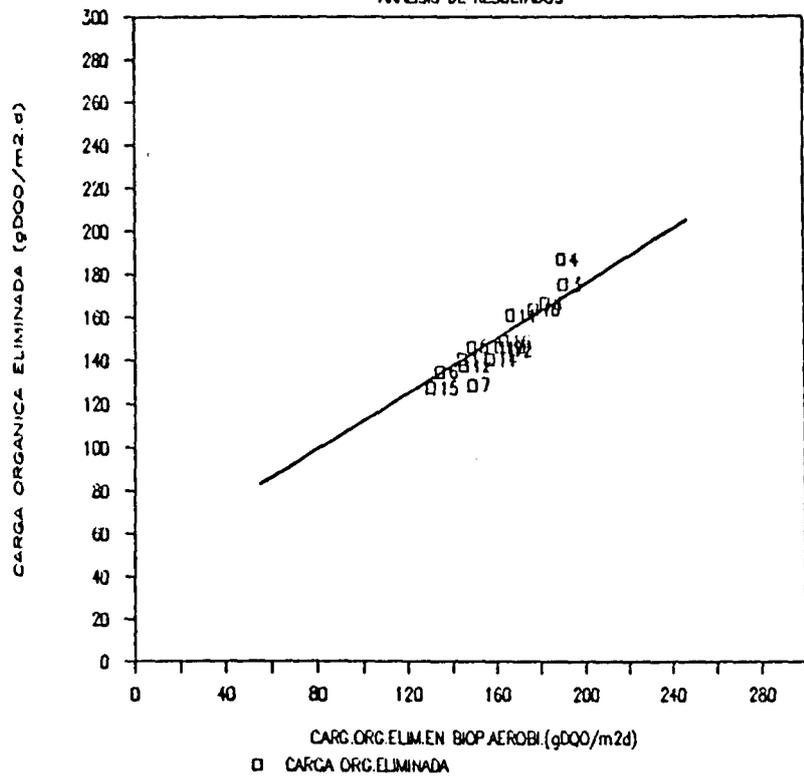
Se puede observar en la gráfica 25 que para la $S_o = 400 \text{ mg/l}$ el efecto es bastante más acentuado que para $S_o = 200 \text{ mg/l}$.



CO*-COE: En la gráfica 26 se representa esta relación entre la carga orgánica eliminada en la cara más externa de la capa aerobia y la COE.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



5.2.2.- Producción de Biomasa:

Los parámetros que se han analizado en este segundo bloque, han sido los siguientes:

Producción de Fangos.

Producción Específica de Fangos:

Para SS y SSV.

Tiempo Retención de Fangos:

Para SS y SSV.

Relaciones SSV-SS:

Efluente y Biopelícula.

Espesor.

Densidad.

Biomasa Específica

De todos estos parámetros, relacionados entre sí y con los correspondientes a los otros bloques, se han elegido los siguientes para su análisis:

TRF(SS)-COXE

TRF(SSV)-COE

XeB-COA

XeB-COXE

ESPESOR-COXE

ESPESOR-DENSIDAD

DENSIDAD-COXE

DENSIDAD-TRF(SS)

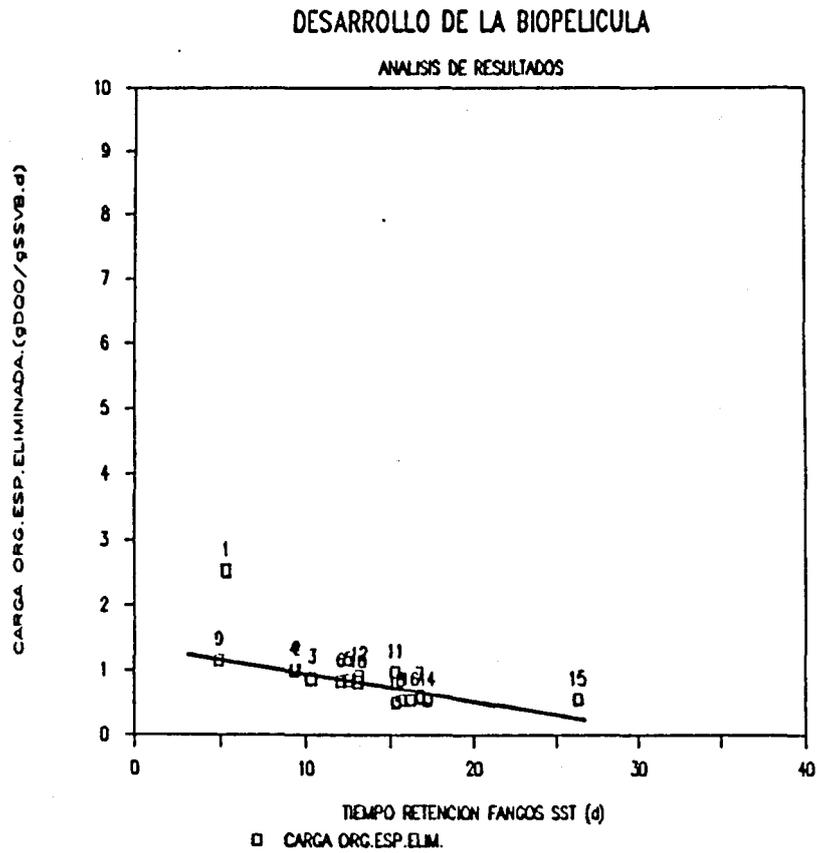
Otros factores:

%SSV/SS-COXE

CRE-DENSIDAD

5.2.2.1.- Influencia del TRF:

TRF(SS)-COXE: De la relación de estos parámetros, se deduce que: el TRF aumenta, cuando disminuye COXE. (Gráfica 27).



El rango de TRF varía, en función de QO_2 , entre los valores siguientes: 5-10 días, 5-17 días y 15-26 días, para

Q0z-1, Q0z-2 Y Q0z-3, respectivamente. No obstante, si se reduce la influencia de los experimentos 1 y 9, que fueron los primeros de los conjuntos a realizar, se obtienen valores del rango mucho más homogéneos: 9-10 días para el Q0z-1; 12-17 días para Q0z-2 y para Q0z-3 permanecería el mismo rango ya expuesto, es decir, 15-26 días.

Se ha ajustado una curva para todo el conjunto de puntos (excepto el valor del experimento 1). El coeficiente de correlación resulta ser -0,677. La ecuación es:

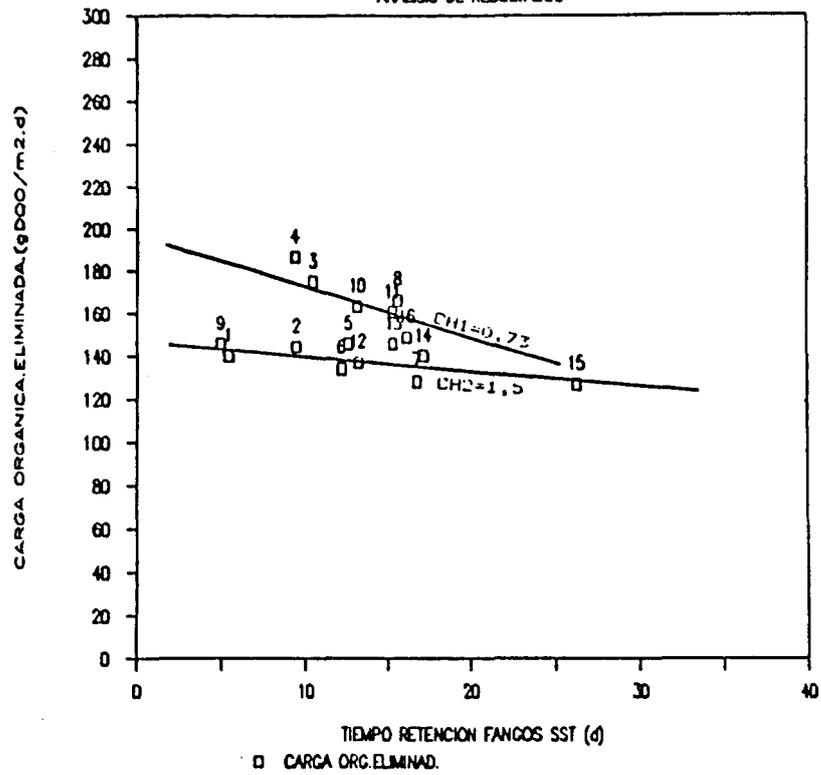
$$\text{TRF}(\text{SS}) = 1,739 - 0,064.\text{COXE}$$

TRF(SS)-COE: La relación entre estos parámetros, conduce a la siguiente conclusión: No influye de forma importante el TRF respecto a COE. Si, en cambio, parece tener importancia Q0z, respecto a TRF, ya que se observan tres zonas bastante diferenciadas. (Gráfica 28).

Los rangos para los tres Q0z utilizados, y para rendimientos mayores del 50% son, respectivamente: 5-9 días (experimentos 1, y 4); 12-15 días (experimentos 6, 11 y 12); y 16-26 días (experimentos 15 y 16).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



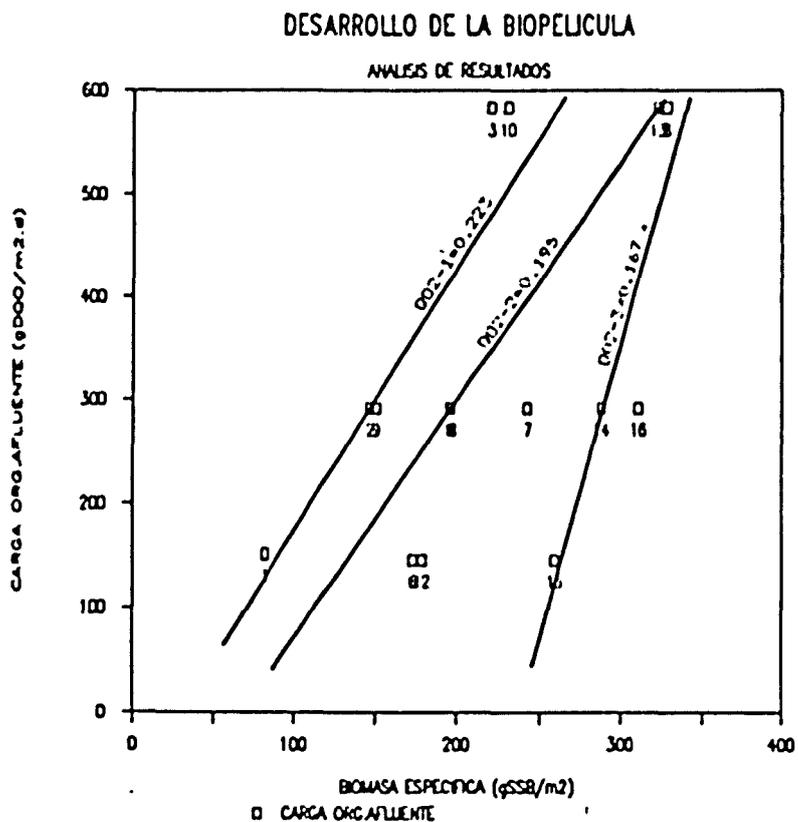
Se han ajustado dos rectas para CH constantes, con coeficientes de correlación: -0,735 y -0,545. Las ecuaciones de estas rectas son:

$$COE = 145,66 - 0,58.TRF; CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$COE = 195,06 - 2,41.TRF; CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

5.2.2.2.- Influencia sobre la biomasa.

XeB-COA: Al relacionar estos parámetros, se observa una tendencia a que: al aumentar la COA, aumente la XeB. La influencia del QO₂, es importante, ya que, según se puede apreciar, pueden definirse tres zonas bastante diferenciadas. (Gráfica 29).



Los rangos de valores en función de QOz son, para QOz-1, QOz-2 y QOz-3, respectivamente: 81-220 gSSB/m²; 170-330 gSSB/m² y 260-325 gSSB/m².

Las rectas resultantes, tienen por ecuaciones:

$$COA = -76,79 + 2,53.XeB \quad (\text{Coefic. de correlación} = 0,852);$$

$$QOz = 0,223 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$COA = -157,25 + 2,29.XeB \quad (\text{Coefic. de correlación} = 0,753);$$

$$QOz = 0,195 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$COA = -1337 + 5,64.XeB \quad (\text{Coefic. de correlación} = 0,859); \quad QOz$$

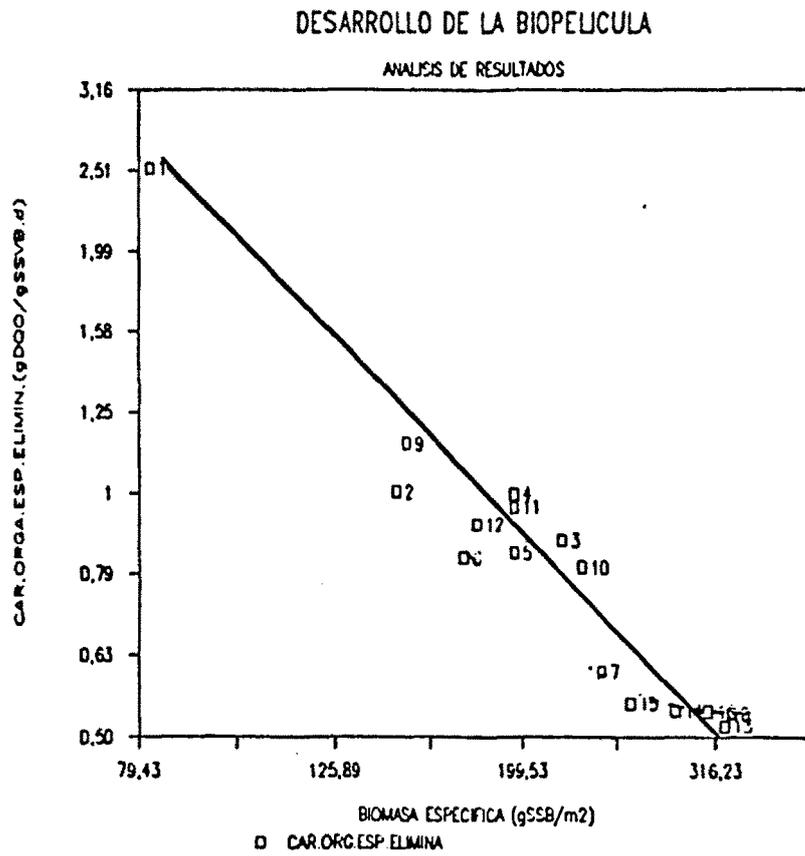
$$= 0,167 \text{ Kg/m}^2.d$$

XeB-COXE: De la observación de relación de parámetros propuesta, se deduce que: COXE disminuye a medida que crece XeB. (Gráfica 30)

Se ajusta una expresión doble logarítmica, con coeficiente de correlación de -0,9613. La ecuación resultante es:

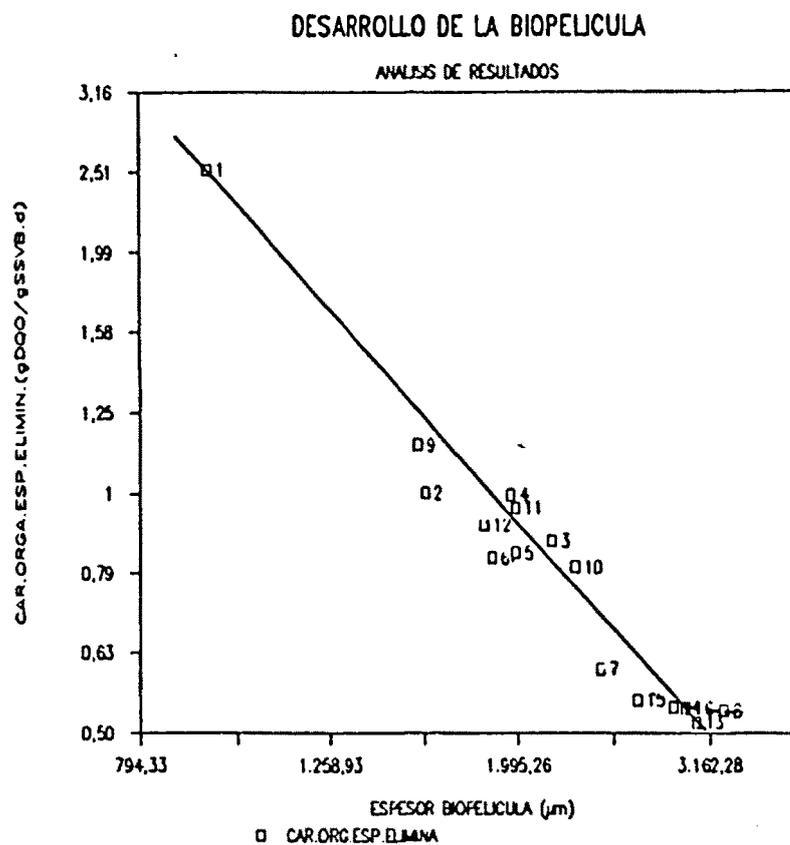
$$COXE = 282,6. XeB^{-1,097}$$

Dado que el exponente es muy próximo a -1, se demuestra que COXE es inversamente proporcional a $X_e B$, con lo que vuelve a deducirse la constancia de la COE.



5.2.2.3.- Influencias sobre el espesor.

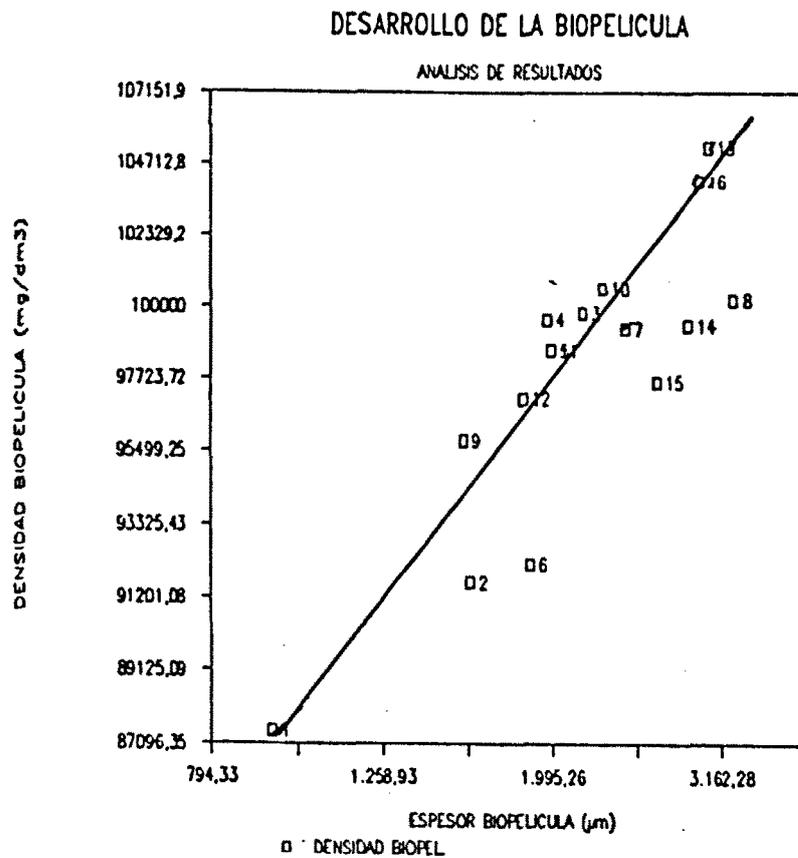
ESPESOR-COXE: De la relación de estos parámetros resulta evidente que: A medida que crece el espesor, se reduce COXE. (Gráfica 31).



La curva que ajusta esta relación es una función doble logarítmica, de coeficiente de correlación $-0,9722$ y ecuación:

$$\text{COXE} = 12.357,3 \cdot \text{ESPEJOR}^{-1,2575}$$

ESPEJOR-DENSIDAD: De la observación de la relación de parámetros propuesta, se deduce que el ESPEJOR y la DENSIDAD crecen hasta un valor máximo, a partir del cual disminuiría. (Gráfica 32).



Se ha ajustado la relación de puntos, por medio de una expresión doble logarítmica, de coeficiente de correlación de 0,8686, y de ecuación:

$$\text{DENSIDAD} = 37.197,6. \text{ESPESOR}^{0,1263}$$

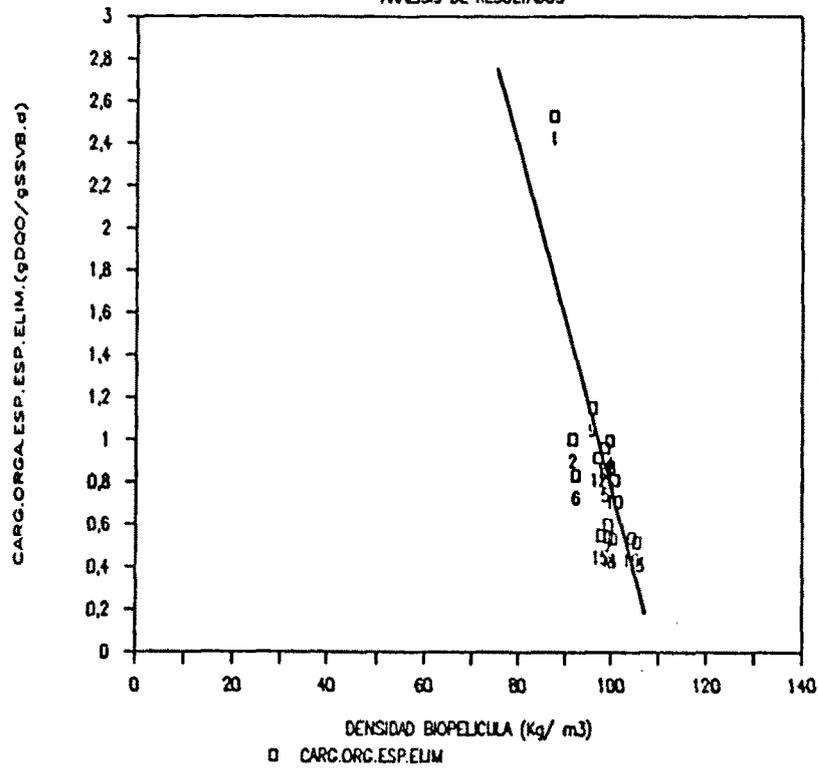
Ahora bien, dado el pequeño rango de valores de la densidad frente a la amplia variación del espesor, y considerando la proximidad del valor del exponente al valor nulo, se podría considerar que la densidad ha sido más o menos constante a lo largo de la experimentación.

5.2.2.4.- Influencia sobre la densidad.

DENSIDAD-COXE: De la observación de esta relación se deduce que: A mayor COXE, hay una tendencia a que disminuya la densidad, aunque parece que se podría considerar constante, ya que la densidad "característica", ya mencionada en este análisis, parece ser la que corresponde al rango de 90-105 Kg/m³. (Gráfica 33).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

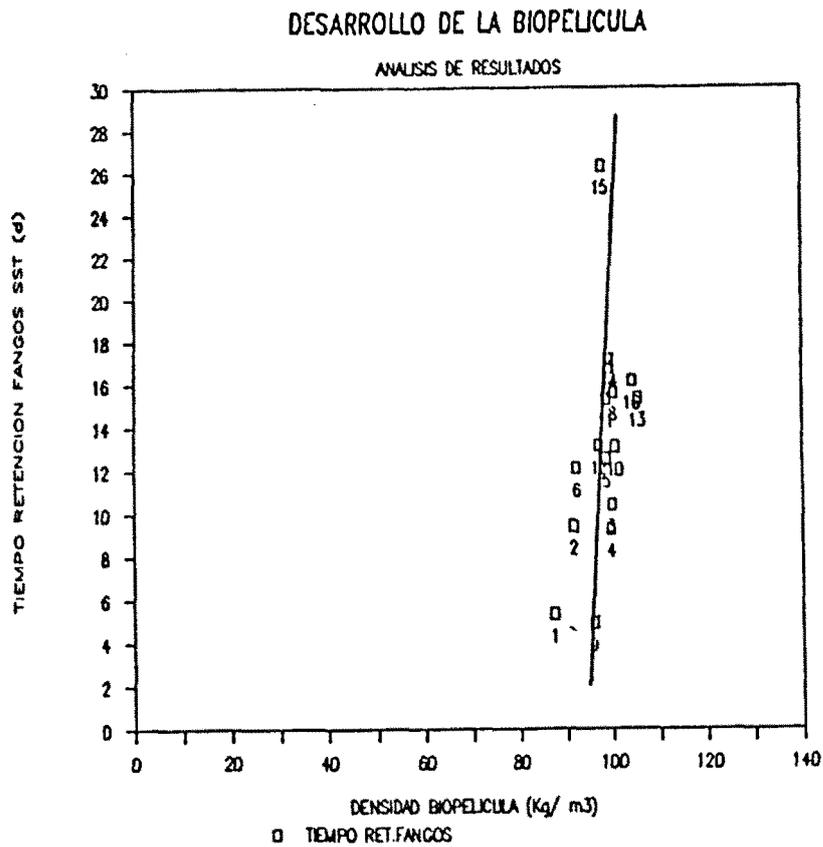


La recta que se ha ajustado indica la tendencia apuntada, y en este sentido se debe interpretar. El coeficiente de correlación es 0,755, y la ecuación correspondiente es:

$$COXE = 8,84 - (8,12.DENSIDAD)10^{-2}$$

DENSIDAD-TRF(SS): La relación de estos parámetros indica lo que ya se ha explicado, tanto en lo referente al TRF, como a

la densidad. Es decir, la constancia en un rango de valores pequeño de DENSIDAD en todo el proceso, y la posible influencia del QO₂ en el TRF. (Gráfica 34).

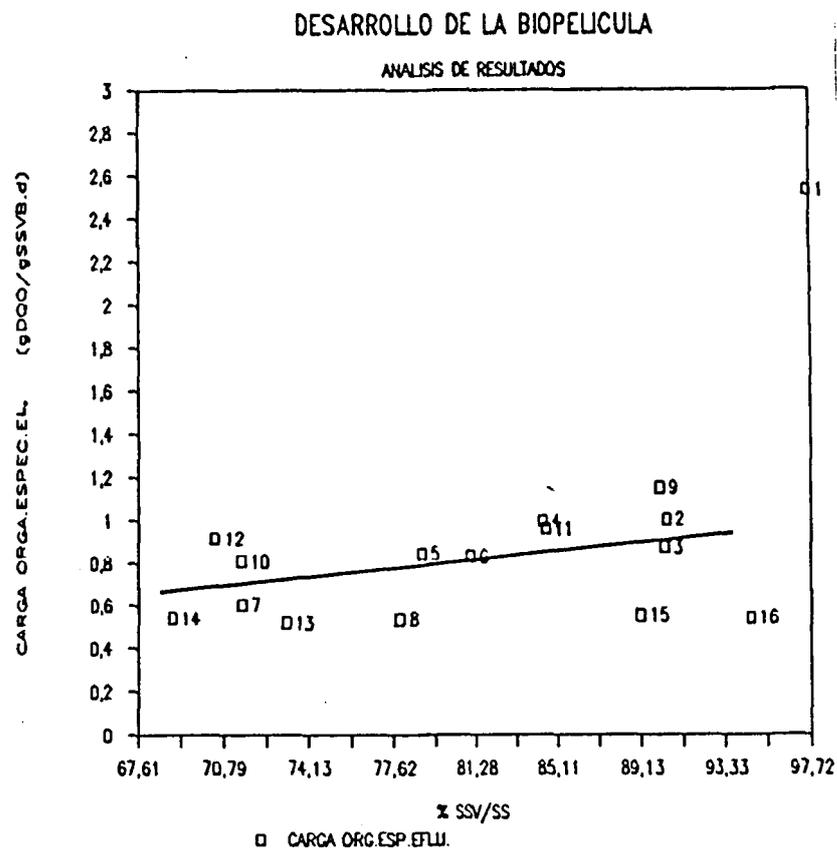


5.2.2.5.- Otros factores.

%SSV/SS-COXE: De la relación de estos parámetros se deduce

que: a medida que crece la COXE, aumenta el porcentaje de SSV/SS. (Gráfica 35).

La recta representada en la gráfica es meramente indicativa.



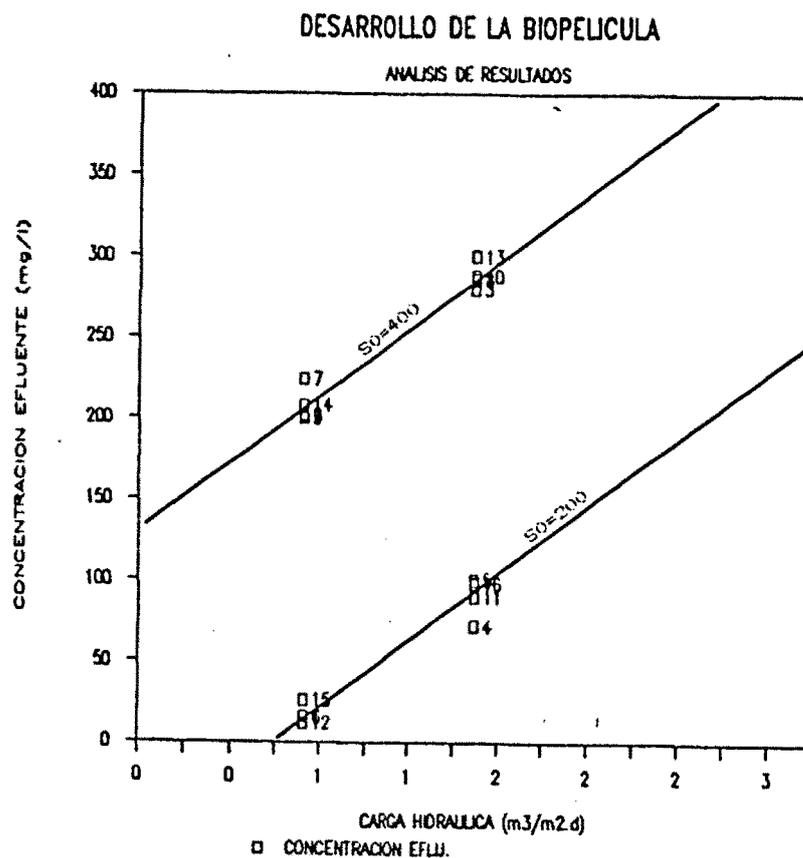
CH-S: De la relación propuesta se deduce que la concentración en el efluente aumenta al hacerlo la CH. (Gráfica 36).

El rango de valores de S_o para $S_o = 200$ está comprendido entre 12-75 mg/l. Correspondiendo el límite inferior a $CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ y el superior a $CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Para $S_o = 400$, el rango varía desde 200 a 280 mg/l, correspondiendo los menores valores a $CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ y los mayores a $CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Se han ajustado dos rectas en función de S_o , con coeficientes de correlación 0,973 y 0,9786. Las ecuaciones correspondientes son:

$$S = -51,233 + 94,156.CH$$

$$S = 132,656 + 103,896.CH$$



5.2.3.- Consumo de Oxígeno: Utilización del Oxígeno

Los parámetros analizados en este tercer bloque, fueron los siguientes:

Tasas de Consumo de Oxígeno:

Para DQO Eliminado, para SSVB.d y para m².d.

Coefficiente Respiración Endógena.

De la relación de estos parámetros con los correspondientes a los tres bloques restantes, se estudian los siguientes, por ser los más representativos:

TCO(X)-COXE

TCO(X)-S

TCO(X)-S/So

TCO(X)-DENSIDAD

TCO(DQO)-S

TCO(DQO)-XeB

TCO(DQO)-DENSIDAD

TCO'-S

TCO'-S/So

TCO'-DENSIDAD

CRE-COE

CRE-DENSIDAD

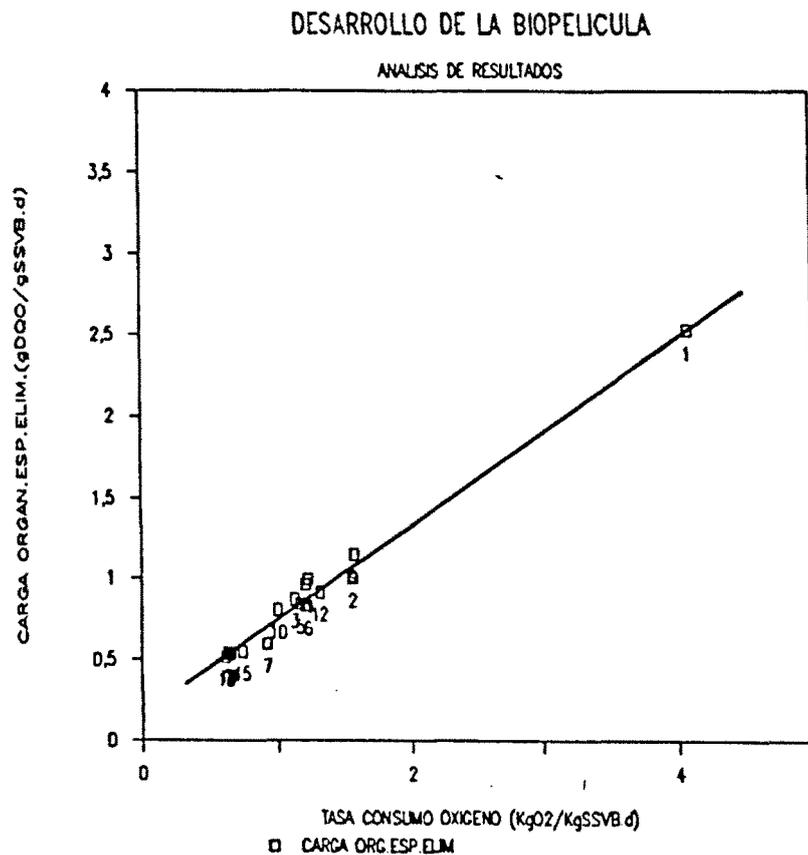
CRE-TCO(X)

CRE-TCO(DQO)

5.2.3.1.- Influencia sobre la TCO(X)

TCO(X)-COXE: De la relación de estos parámetros, se deduce que a mayor COXE, mayor TCO(X). (Gráfica 37).

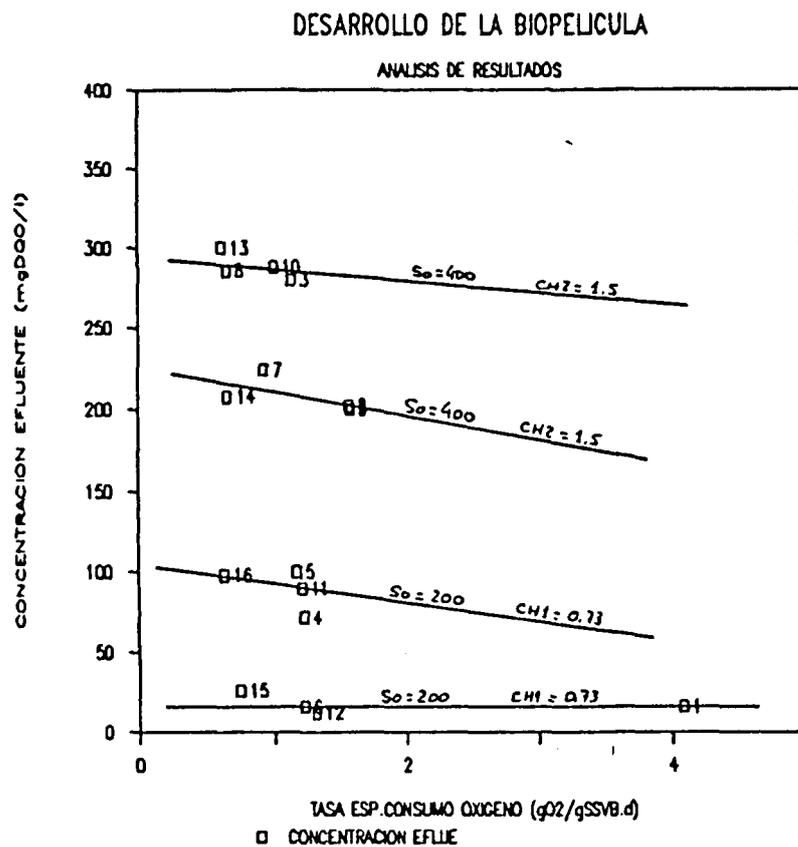
Si se toma con cierta precaución el resultado del experimento 1, se puede obtener un rango de variación más pequeño para todo el conjunto de experimentos. Los valores de este rango son: 0,62-1,58 KgO₂/KgSSVB.d.



Se ha ajustado una recta para esta relación, cuya ecuación es:

$$COXE = 0,17 + 0,58.TCO(X) \quad \text{Coeficiente de correlación} = 0,992$$

TCO(X)-S: En esta relación de parámetros se observa que, en general, la concentración en el efluente disminuye, al aumentar el TCO(X). Para los experimentos homogéneos, respecto a QO₂, se aprecia esta circunstancia apuntada. (Gráfica 38).



Los rangos más bajos de S, corresponden a COA = 146 gDQO/m².d, y varían entre 12-16 mg/l. Para todos los valores de QO₂, y en función de la S₀ respectiva, se puede afirmar que S es prácticamente constante.

Se han ajustado las rectas en función de S₀, con coeficientes de correlación -0,33; -0,48; -0,63; -0,72.

$$S = 18,86 - 12,86.TCO(X)$$

$$S = 112,52 - 21,3.TCO(X)$$

$$S = 226,05 - 14,81.TCO(X)$$

TCO(X)-S/S₀: De la relación de estos parámetros, se deduce lo siguiente: la relación S/S₀ disminuye al aumentar TCO(X). La explicación dada para la relación TCO(X)-S, es válida en este caso igualmente. (Gráfica 39).

Se han ajustado las rectas que corresponden a COA constante, obteniéndose los factores de correlación siguientes: 0,33; 0,2 y 0,79. Las ecuaciones son:

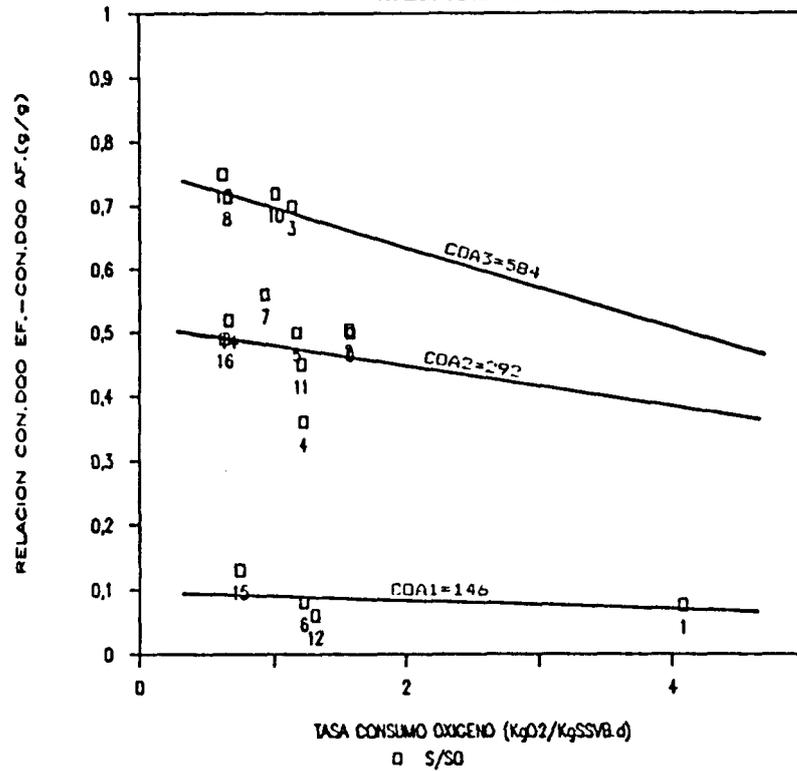
$$S/S_0 = 0,1 - 6,43.10^{-3}.TCO(X); COA = 146 \text{ g/m}^2.d$$

$$S/S_0 = 0,52 - 0,03.TCO(X); COA = 292 \text{ g/m}^2.d$$

$$S/S_0 = 0,78 - 0,06.TCO(X); COA = 584 \text{ g/m}^2.d$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



En general se puede deducir la poca influencia del TCO(X) sobre la fracción remanente de sustrato (S/So).

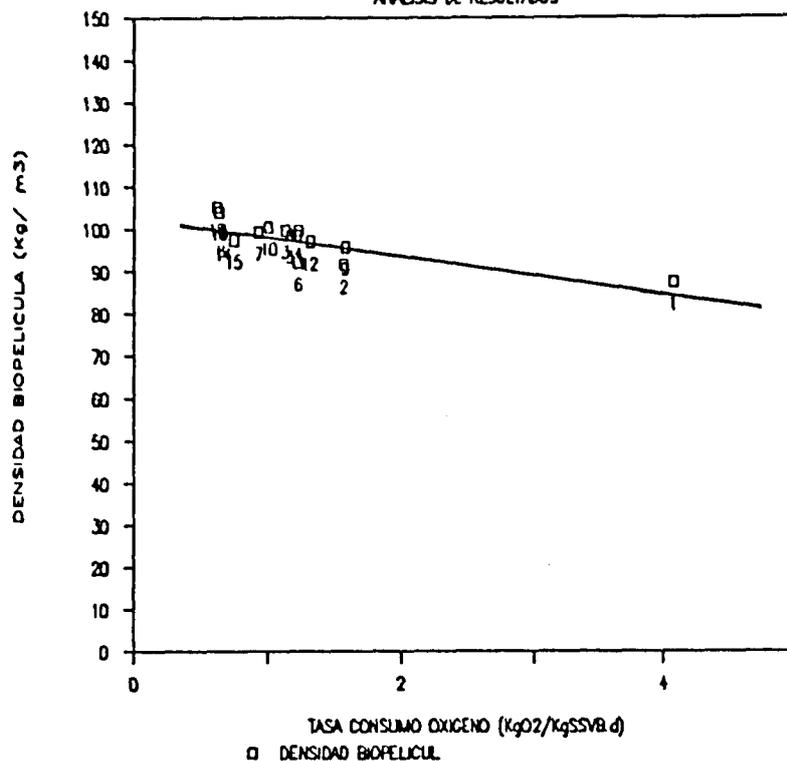
TCO(X)-DENSIDAD: Se puede considerar que la densidad se mantuvo constante para todos los valores de TCO(X). (gráfica 40). La pequeña pendiente de la recta ajustada, es, en parte debida al efecto de considerar el experimento 1.

Esta recta, tiene un coeficiente de correlación de -0,797. La recta tiene la ecuación siguiente:

$$\text{DENSIDAD} = 103,33 - 4,358 \cdot \text{TCO(X)}$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



5.2.3.2.- Influencia sobre la TCO(DQO)

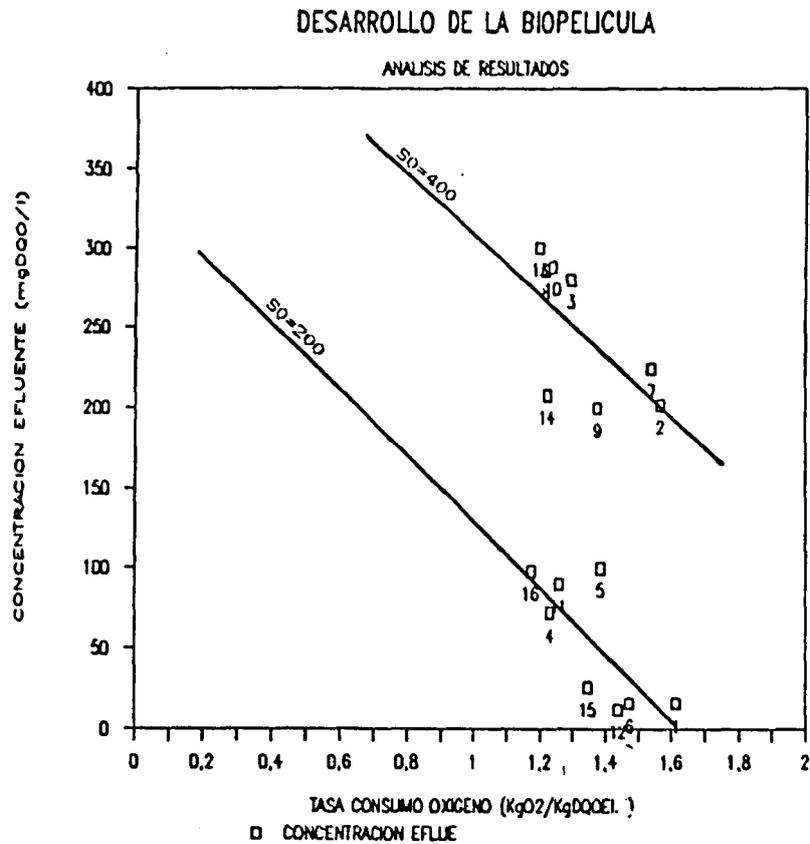
TCO(DQO)-S: De la relación de estos parámetros, se deduce que: la TCO(DQO) aumenta, mientras S disminuye. (Gráfica 41).

Los rangos de valores de TCO(DQO) para las S menores de 100 mg/l, son: 1,17-1,61 KgO₂/KgDQOEl, con QO₂ de 0,223-0,195 Kg/m².d. Para S > 100 mg/l, el rango varía desde 1,2-1,57, para QO₂ de 0,195-0,167 Kg/m².d.

Se han ajustado dos rectas, cuyos coeficientes de correlación son: -0,750 y -0,648. Las ecuaciones respectivas son:

$$S = 338,35 - 208,69.TCO(DQO); S_o = 200 \text{ mg/l.}$$

$$S = 502,72 - 190,96.TCO(DQO); S_o = 400 \text{ mg/l.}$$



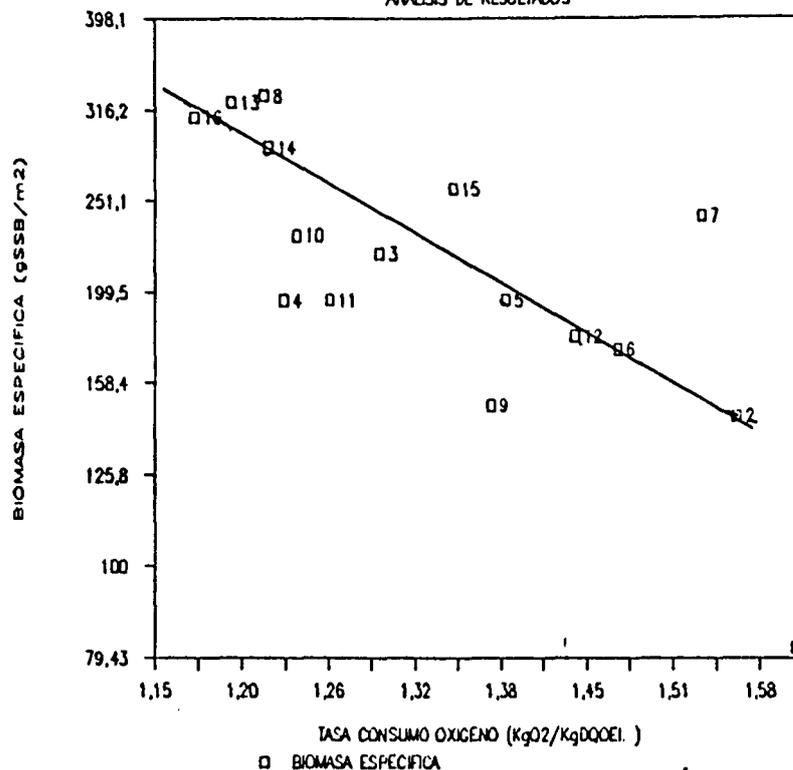
TCO(DQO)-XeB: De la relación gráfica de estos parámetros, se deduce que: la XeB disminuye a medida que aumenta TCO(DQO). (Gráfica 42).

Se ha ajustado con una expresión doble logarítmica la relación propuesta, siendo el factor de correlación -0,9884, y la ecuación correspondiente:

$$XeB = 221,1. TCO(DQO)^{-0,74}$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



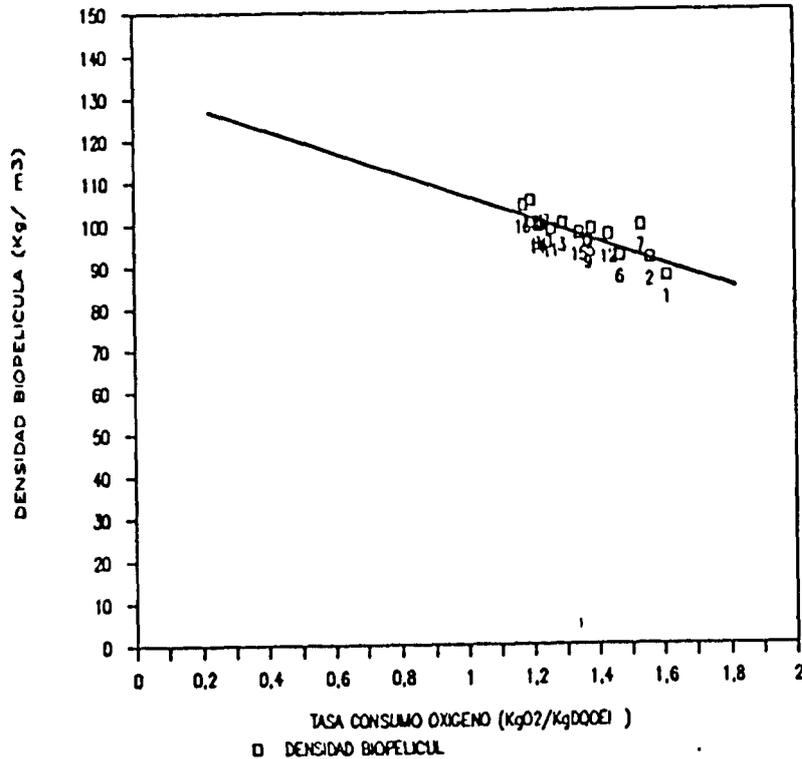
TCO(DQO)-DENSIDAD: En esta relación se observa lo siguiente: Al aumentar TCO(DQO), disminuye (aunque sea ligeramente), la densidad. (Gráfica 43). El aumento de TCO(DQO) implica que si el QO₂ es constante para un conjunto de experimentos determinado, la DQO eliminada decrece.

La recta que se ha ajustado, tiene un coeficiente de correlación de -0,835, y la ecuación de la recta que ajusta es:

$$\text{DENSIDAD} = 133,637 - 26,47 \cdot \text{TCO(DQO)}$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

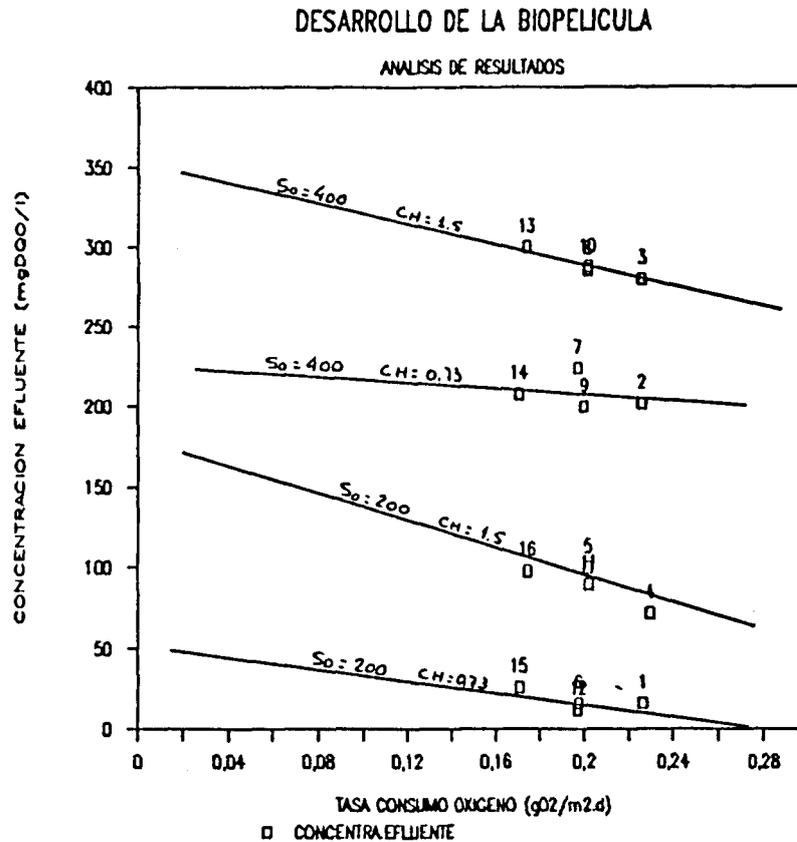
ANALISIS DE RESULTADOS



5.2.3.3.- Influencias sobre la TCO'

TCO'-S: De la observación de esta gráfica, se deduce que, S disminuye a medida que aumenta TCO'. La influencia del QO₂ se muestra sobretodo para el conjunto de experimentos que tienen de parámetros: S₀ = 200 mg/l y CH = 1,5 m³/m².d; y el conjunto de experimentos que tienen como parámetros S₀ = 400 y CH = 1,5 m³/m².d, pues en ellos se refleja un orden lógico de efectos en S, si se afirma la influencia de TCO'. Es interesante ver que el parámetro común de ambos conjuntos, es la CH = 1,5 m³/m².d. (Gráfica 44).

Se han ajustado 4 rectas con coeficientes de correlación: -0,684; -0,225; -0,974 y -0,832. Las ecuaciones son:



$$S = 50,83 - 166,67.TCO'; \quad So = 200 \text{ mg/l}; \quad CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

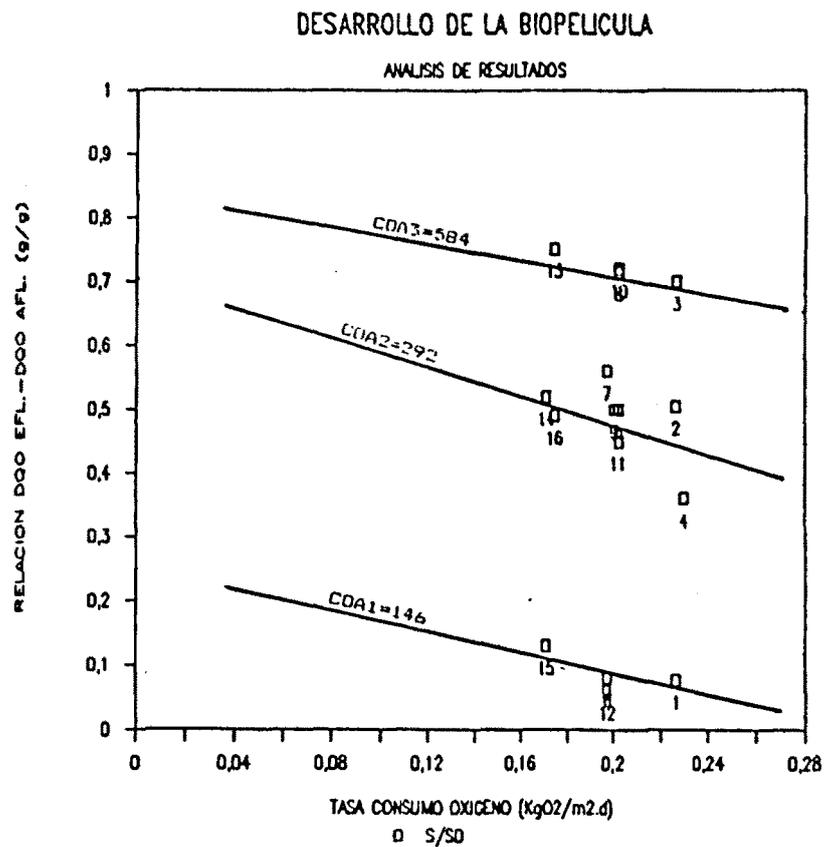
$$S = 176,67 - 433,33.TCO'; \quad So = 200 \text{ mg/l}; \quad CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$S = 228,5 - 100.TCO'; \quad So = 400 \text{ mg/l}; \quad CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$S = 355,17 - 333,33.TCO'; \quad So = 400 \text{ mg/l}; \quad CH = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

TCO'-S/So: De esta relación de parámetros se deduce una

explicación similar a la anteriormente comentada. En este caso, los conjuntos de experimentos se agrupan en función de COA. (Gráfica 45).



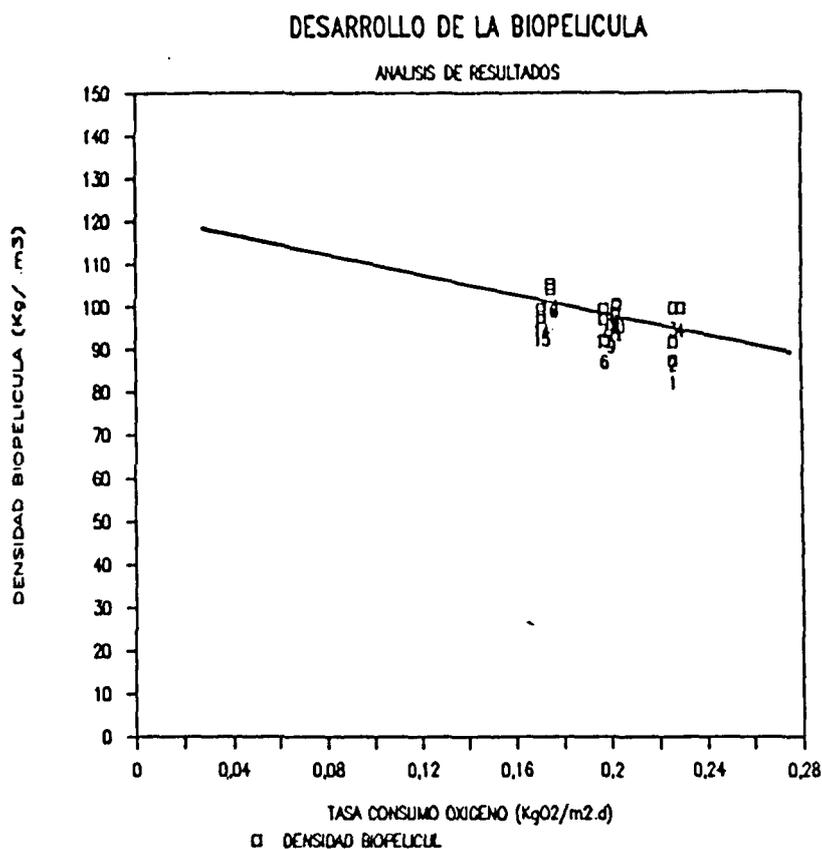
Las relaciones lineales ajustadas, tienen los coeficientes de correlación siguientes: -0,684; -0,444 y -0,999. Las ecuaciones resultantes son:

$$S/S_0 = 0,25 - 0,83.TCO'; \text{ COA} = 146 \text{ g/m}^2.d$$

$$S/S_0 = 0,72 - 1,17.TCO'; \text{ COA} = 292 \text{ g/m}^2.d$$

$$S/S_0 = 0,85 - 0,67.TCO'; \text{ COA} = 584 \text{ g/m}^2.d$$

TCO'-DENSIDAD: De la relación de estos parámetros, se deduce que TCO' aumenta, a medida que la densidad disminuye. Este aumento es pequeño, ya que la densidad, como se ha dicho, prácticamente es constante. (Gráfica 46).



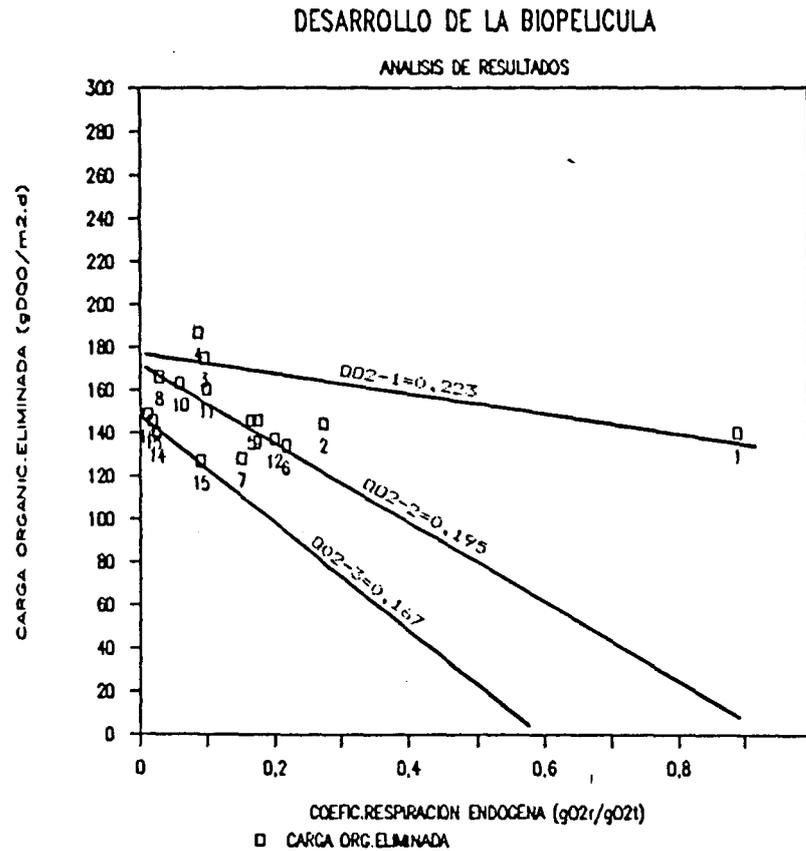
Del ajuste de las relación, resulta una recta de coeficiente de correlación de 0,567. La ecuación resultante es:

$$\text{DENSIDAD} = 121,278 - 116,58 \cdot \text{TCO}'$$

5.2.3.4.- Influencia del CRE

CRE-COE: De la observación de la relación entre estos parámetros se deduce que: al disminuir la COE, aumenta CRE.

Los rangos de valores de CRE, con la precaución del experimento 1, varían en función de Q_{O_2} de la siguiente forma: 0,08-0,27 g_{O_2r}/g_{O_2t} para $Q_{O_2}-1$, es decir de un 8% a un 27% de la biopelícula estuvo en respiración endógena.



Para QO₂-2 el rango es 0,03-0,22 gO₂r/gO₂t; y para QO₂-3 la variación es de 0,01-0,09 gO₂r/gO₂t. (Gráfica 47).

Se han ajustado tres rectas en función de QO₂, con coeficientes de correlación: -0,779; 0,867 y 0,956. Las ecuaciones resultantes son:

$$\text{COE} = 177,33 - 46,96.\text{CRE}; \text{QO}_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COE} = 172,96 - 185,13.\text{CRE}; \text{QO}_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

$$\text{COE} = 149,22 - 250,95.\text{CRE}; \text{QO}_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$$

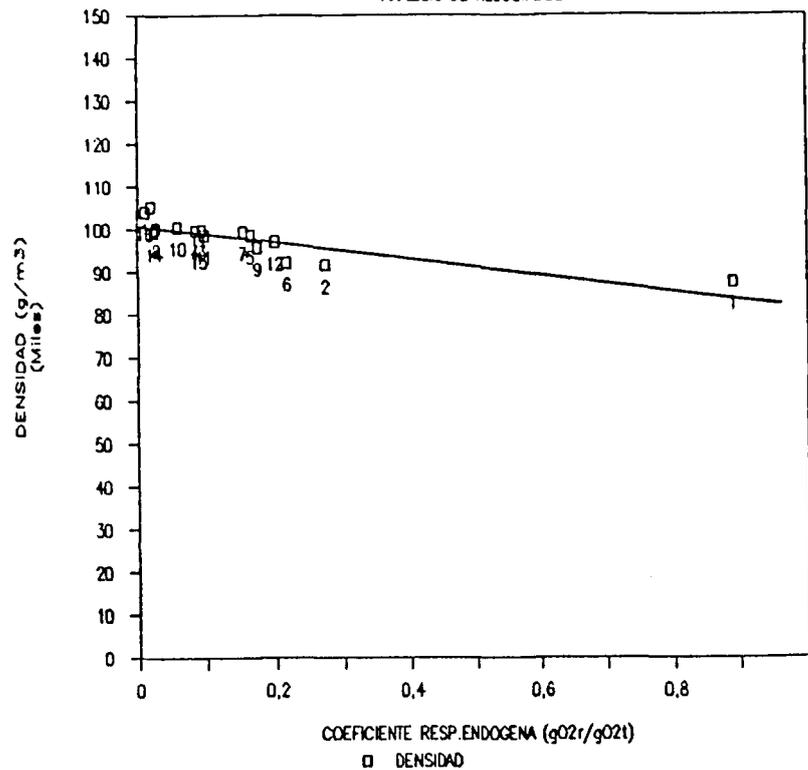
CRE-DENSIDAD: Se puede observar de la relación de estos parámetros que: la densidad de la biopelícula aumenta y disminuye el CRE, es decir, el aumento de consumo de oxígeno para la respiración endógena, produce una disminución de la densidad de la biopelícula. (Gráfica 48).

Se ha ajustado una recta para el conjunto total de puntos representativos, cuyo coeficiente de correlación es 0,832. La ecuación correspondiente es:

$$\text{DENSIDAD} = 100,83 - 17,88.\text{CRE}$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

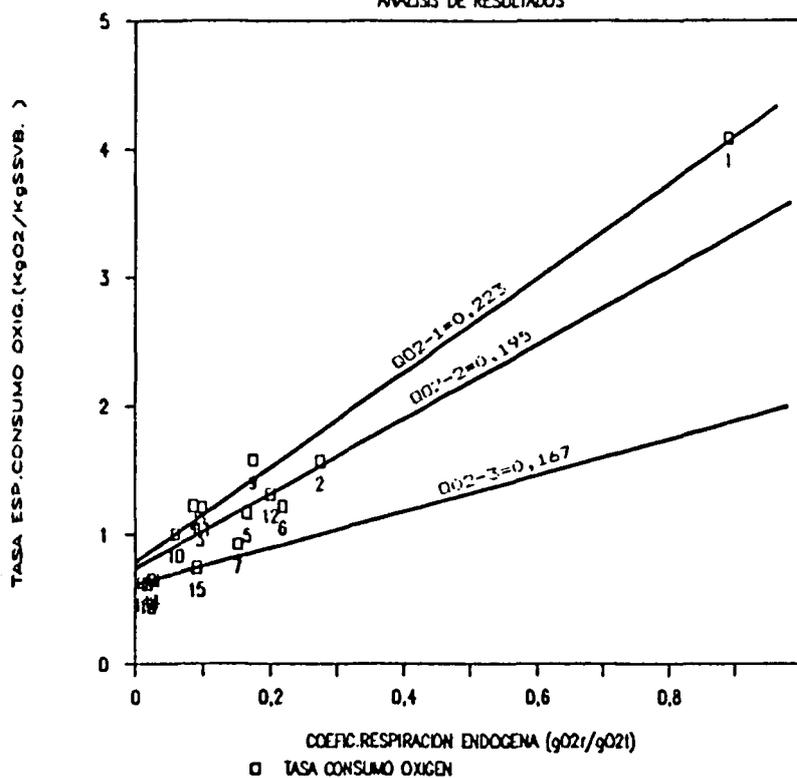


CRE-TCO(X): De la relación de estos parámetros se deduce que: A medida que crece TCO(X), crece el CRE. La explicación de este resultado, se puede hacer de la siguiente forma: Si QO₂ es constante, la única posibilidad de que TCO(X) incremente su valor, es la disminución de SSVB. Esta disminución, provocada por un cambio de régimen (COA o CH), hace, igualmente, que incremente el valor de CRE, pues se limita la difusión del sustrato y el microorganismo entra en fase de respiración endógena más acentuada.

El rango más bajo de valores de CRE, corresponde al último conjunto de experimentos, donde, por una parte, QO₂ fué el mínimo utilizado, y por otra, la TCO(X) también fué la mínima (0,62-0,74 KgO₂/KgSSVB.d). (Gráfica 49).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



Se han ajustado las rectas correspondientes en función de QO_2 , resultando los coeficientes de correlación siguientes: 0,995; 0,696 y 0,953. Las ecuaciones de las rectas son:

$$TCO(X) = 0,77 + 3,67.CRE; QO_2 = 0,223 \text{ Kg/m}^2.d$$

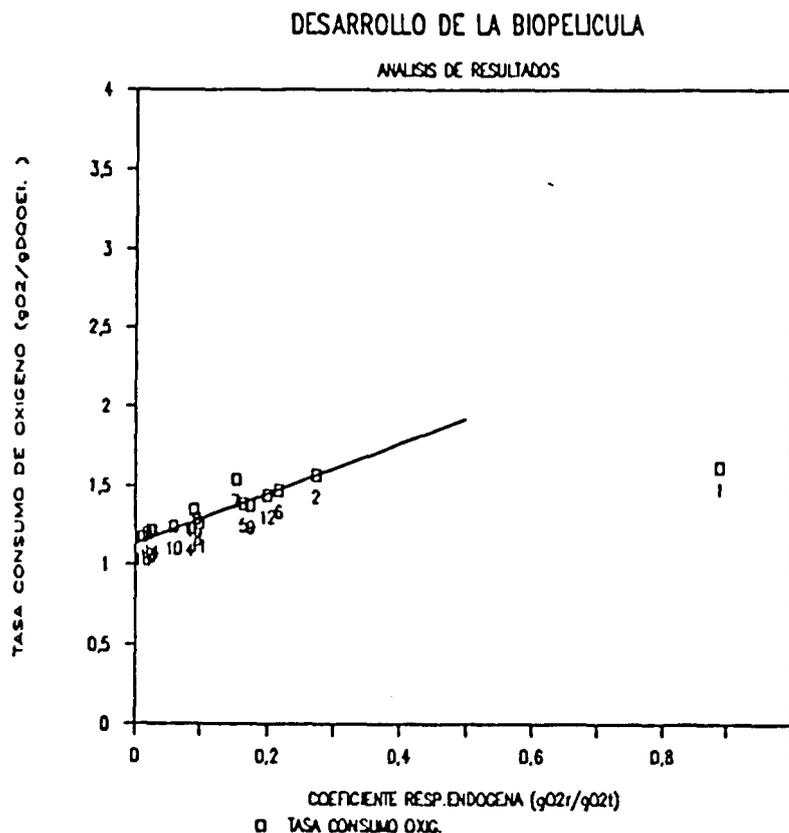
$$TCO(X) = 0,74 + 2,88.CRE; QO_2 = 0,195 \text{ Kg/m}^2.d$$

$$TCO(X) = 0,61 + 1,4.CRE; QO_2 = 0,167 \text{ Kg/m}^2.d$$

CRE-TCO(DQO): De la relación de estos parámetros, se deduce que el aumento de TCO(DQO), lleva aparejado un incremento de

CRE. Al aumentar la DQO eliminada, disminuye la relación TCO(DQO) para Q_{O_2} constante, lo que supone disminución del oxígeno puesto a disposición de los microorganismos para la respiración endógena, es decir disminuye CRE, pues se ha aumentado la difusión del sustrato hacia los microorganismos de la biopelícula.

El rango de valores de TCO(DQO), para los coeficientes de respiración más bajos, es: 1,17-1,35 $KgO_2/KgDQOEI.d$, y que corresponde a los experimentos 13-16. (Gráfica 50).



Se ajusta una recta, sin tener en cuenta el experimento 1, cuyo coeficiente de correlación es: 0,9129, y cuya expresión es:

$$TCO(DQO) = 1,166 + 1,458.CRE$$

5.2.4.- Influencia del Nitrógeno:

Los parámetros analizados en este último bloque, han sido los siguientes:

Rendimiento Eliminación Nitrógeno Total.

Relación N/No.

Relación N/S y No/So.

Nitrógeno Efluente.

Carga Nitrógeno Afluente.

Parámetros modificados por Balance:

Relación ND/No.

De estos parámetros, se han elegido los siguientes:

N/No-COA

N/No-COE

N-COE

N-COA

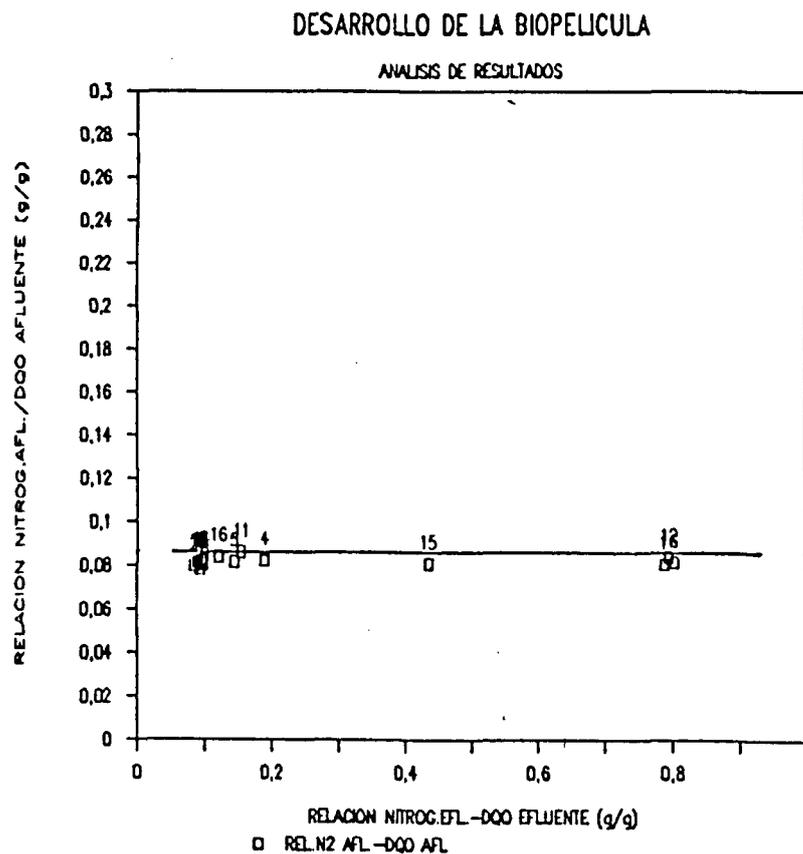
N/S-No/So

RENDETN-N

ND/No-COXE

5.2.4.1.- Eliminación del Nitrógeno

N/No-COA: De la relación de estos parámetros, se deduce que: Al aumentar la COA, la relación N/No tiende a crecer para un misma So. Dado que se ha mantenido la relación Co/No en todo el proceso, significa que No es constante para cada conjunto de experimentos de So constante, y , por lo tanto, el aumentar la relación N/No significa que N aumenta. (gráfica 51), y por lo tanto disminuye el rendimiento de eliminación de nitrógeno.



En resumen, a la vista de la gráfica parece que la fracción remanente de nitrógeno disminuye para valores altos de nitrógeno afluente junto con bajos valores de la carga hidráulica.

El rango de valores que corresponde a una más baja relación de N/N_0 , es el comprendido entre 0,53-0,61 g/g. Este rango es el obtenido para una COA de $292 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$, $CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y $So = 400 \text{ mg/l}$.

Las rectas que figuran en esta gráfica, son indicativas de la tendencia de los parámetros analizados.

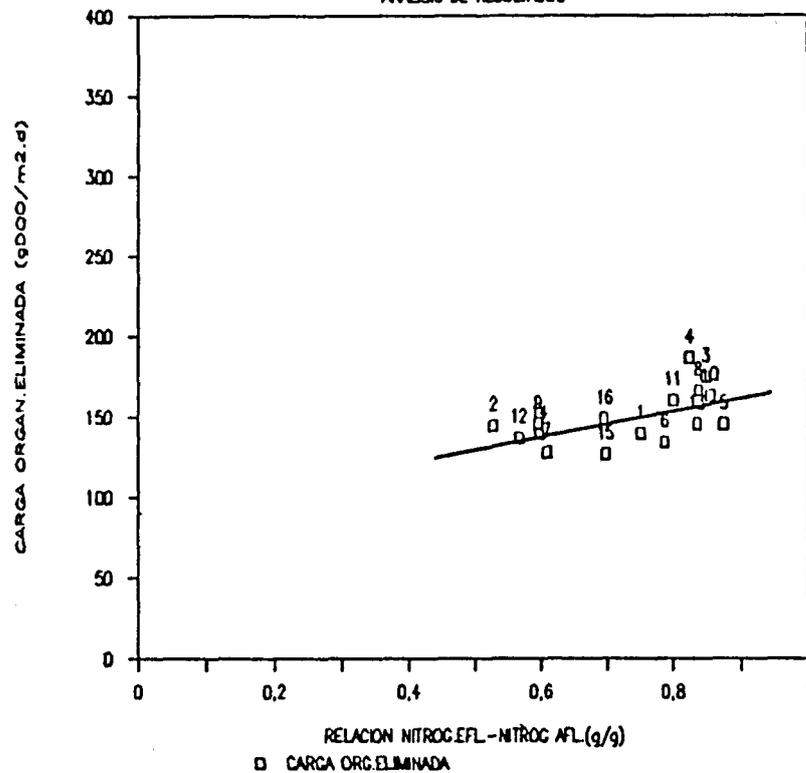
N/N_0 -COE: De la observación de los resultados de esta relación de parámetros, se deduce que: Si la COE se puede considerar como constante, por ser el rango de valores obtenido pequeño, la relación N/N_0 no parece, entonces, estar influenciada por este parámetro. (Gráfica 52).

No obstante lo anterior, se ha obtenido una relación lineal con todos los valores, cuyo coeficiente de correlación es 0,561, y la ecuación correspondiente es:

$$COE = 91,02 + 79,54.(N/N_0)$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

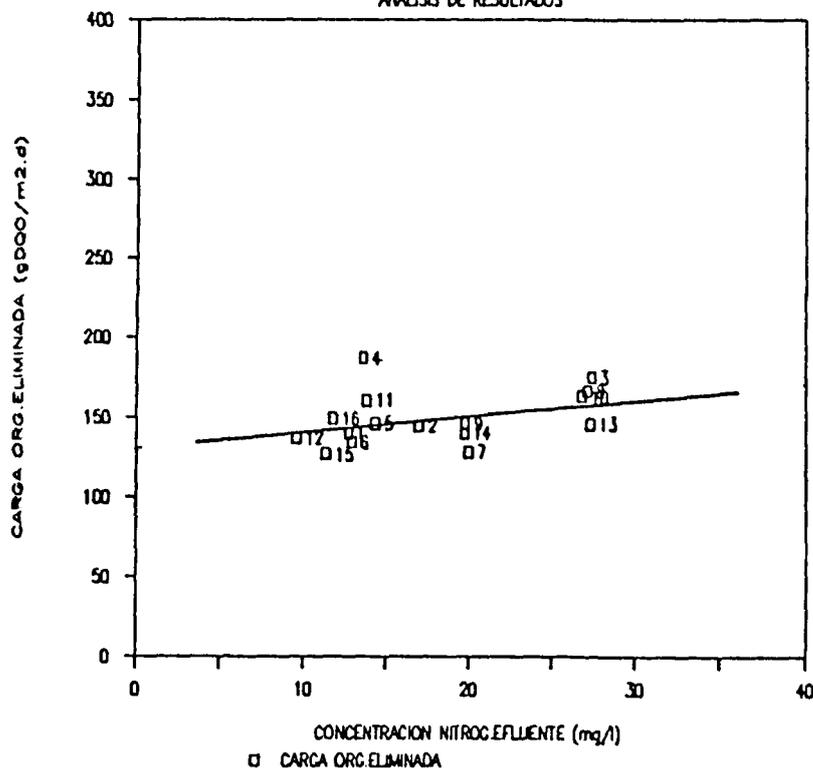
ANALISIS DE RESULTADOS



N-COE: Siguiendo con la explicación dada en la relación anterior, en esta relación se observa que: N está influenciada por S_o , pues al aumentar este parámetro, también lo hace N_o en la misma proporción ($C/N = cte.$), y esto parece reflejarse en el valor de N, según se observa por la concentración en zonas bastante definidas, de los resultados de cada conjunto de experimentos de S_o constante; (sobre todo para los experimentos de $S_o = 400 \text{ mg/l}$). (Gráfica 53).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

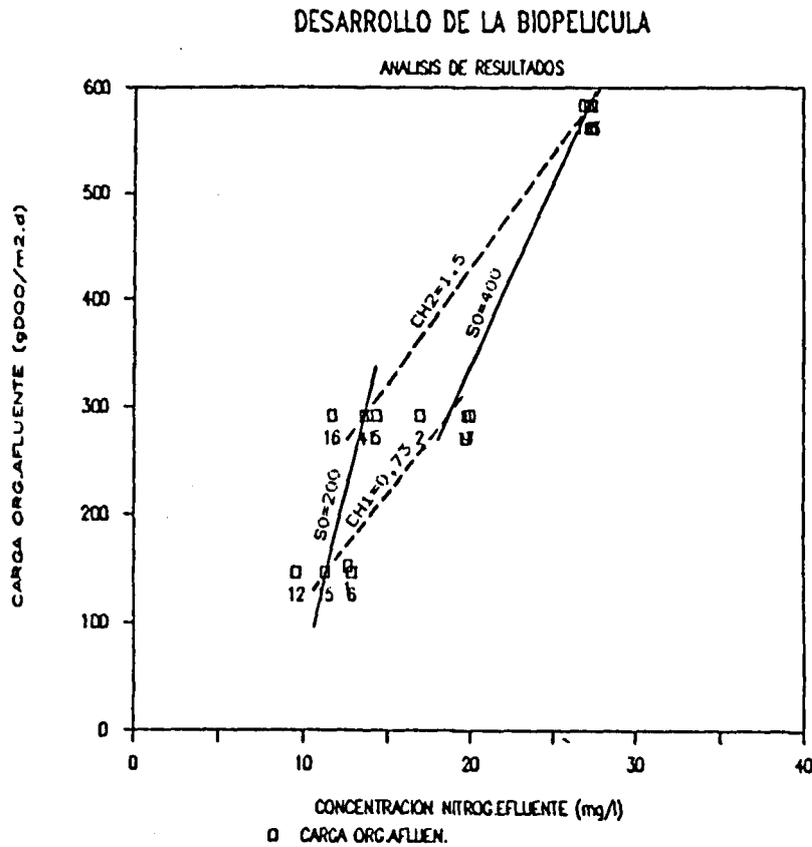
ANALISIS DE RESULTADOS



El rango menor de valores de N está comprendido entre 10-12 mg/l, correspondiendo este rango a $S_o = 200$ mg/l; $COA = 146$ g/m².d y $CH = 0,73$ m³/m².d.

N-COA: De la relación de estos parámetros, se puede observar que: a medida que crece COA, crece N. De la constancia en todo el proceso de la relación C/N, se podría deducir que el crecimiento de S_o no supondría crecimiento de N. Como se deduce de la relación en cuestión, al crecer tanto S_o como CH,

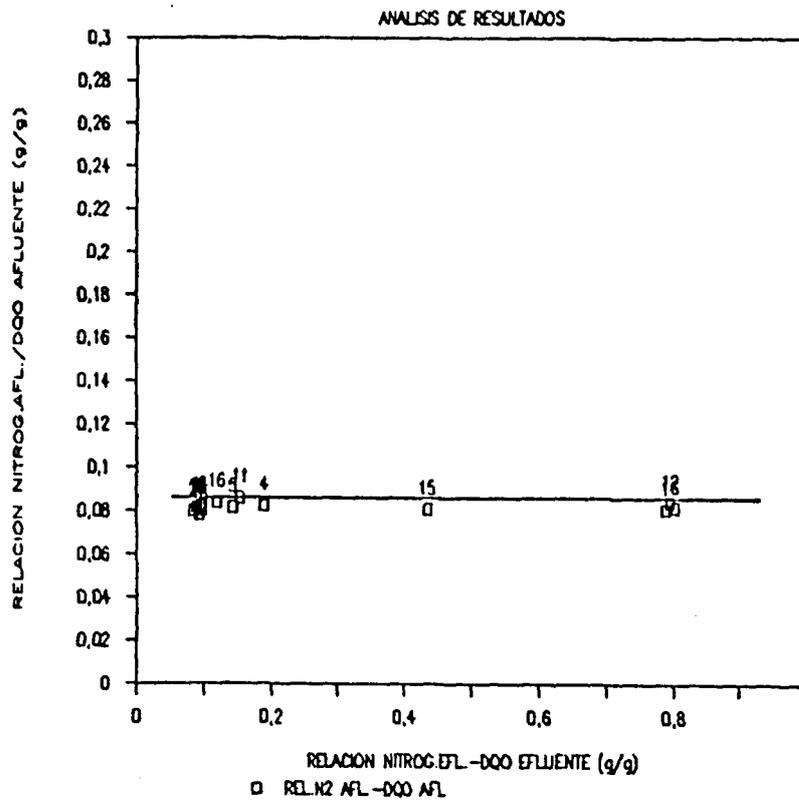
aumenta N. (Gráfica 54).



Los rangos menores de valores de N, para CH constante, corresponden a los experimentos de COA = 146 g/m².d. (10-12 mg/l).

N/S-No/So: La relación No/So no parece influir en la relación N/S (gráfica 55).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

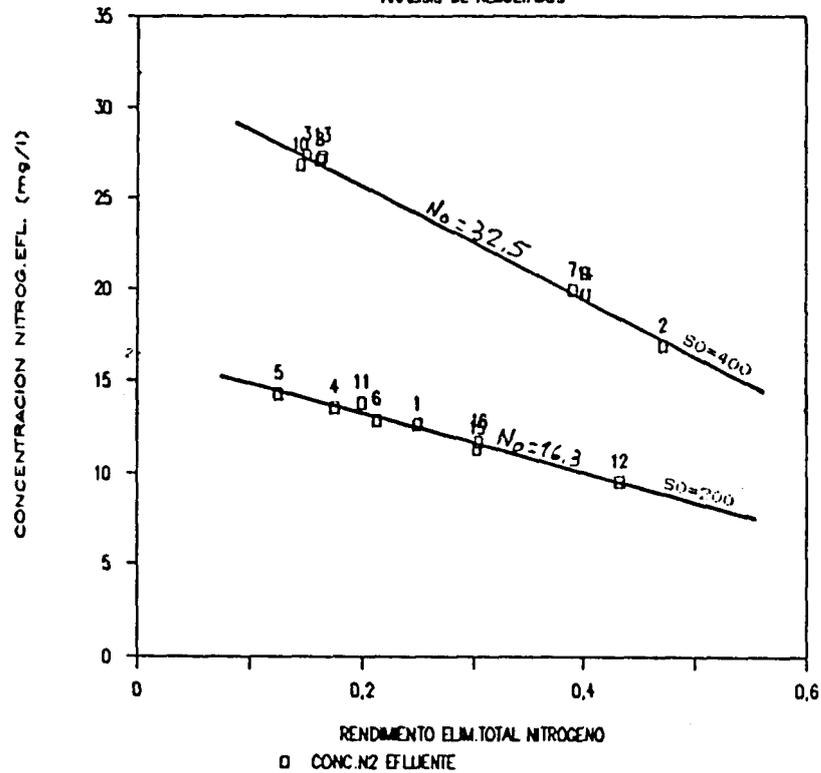


RENDET_N-N: De la relación de estos parámetros, se observa que las zonas de conjuntos de experimentos con S_0 constante, están bastante definidas. (Gráfica 56).

Los mayores rangos de valores de RENDET_N corresponden a $S_0 = 400 \text{ mg/l}$; $COA = 292 \text{ gDQO/m}^2\cdot\text{d}$ y $CH = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. (39-47%).

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



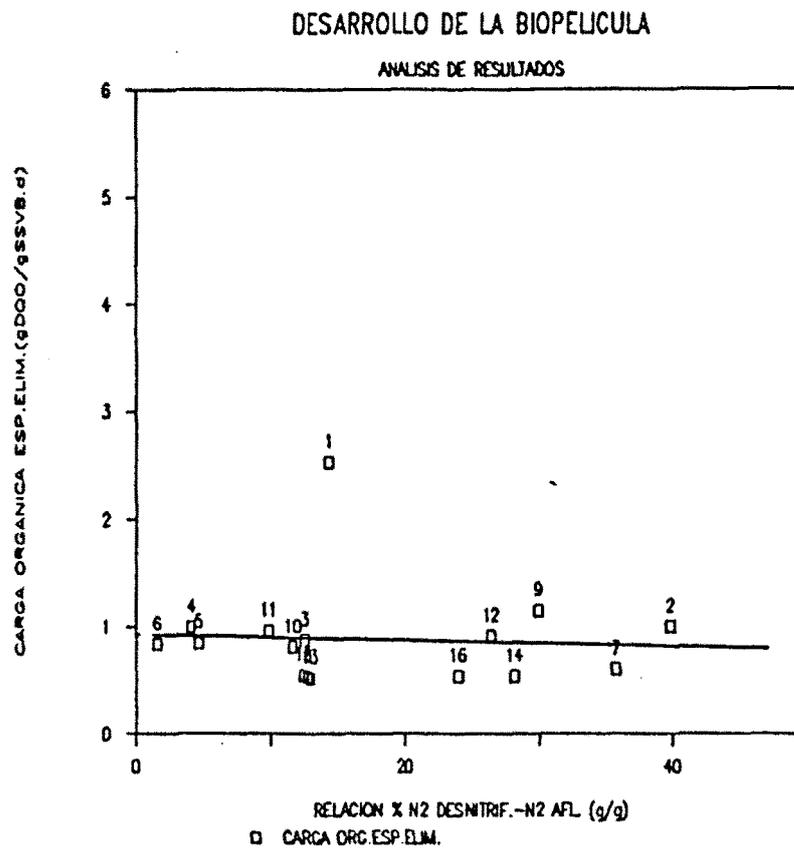
Se han ajustado 2 rectas en función de S_o constante. Los coeficientes de correlación han sido: $-0,996$ y $-0,983$. Las ecuaciones resultantes son:

$$N = 31,87 - 30,89.RENDET_N$$

$$N = 16,47 - 16,10.RENDET_N$$

Las cuales son evidentes pues pueden deducirse directamente de la definición de rendimiento, sin más que tener en cuenta que N_o ha sido proporcional a S_o .

ND/No-COXE: De la observación de esta relación, se deduce que: (excepto el experimento 1) la COXE no influye en la relación ND/No, pues prácticamente, permanece constante. (Gráfica 57).



5.3.- RESUMEN DEL ANALISIS REALIZADO.

En este apartado se trata de resumir todo lo anteriormente expuesto, por medio de una serie, lo más seleccionada y concreta posible, de conclusiones.

Dentro de este apartado es necesario decir, que no todas las conclusiones que se exponen, ofrecen el mismo grado de fiabilidad. Esto es algo evidente, pero también es cierto que lo que en este trabajo se expresa, es el resumen de una labor mucho más amplia, tanto en su concepción como en su elaboración.

Este resumen seguirá el orden establecido en el análisis de resultados. Es decir, se harán cuatro apartados en función de los cuatro grupos de parámetros-variables que se han desarrollado.

5.3.1.- Sobre el rendimiento en un RSP.

Al aumentar la Carga Orgánica Afluyente, la Concentración y el Caudal, disminuye el Rendimiento.

Al aumentar la Carga Orgánica Afluyente, aumenta la concentración en el efluente.

Al aumentar la Carga Hidráulica, crece la concentración en el efluente, y disminuye la DQO eliminada.

Para una Carga Hidráulica constante, la DQO eliminada varía en un rango tan pequeño que se puede considerar constante.

La Carga Orgánica Eliminada disminuye, a medida que disminuye la Carga Orgánica Afluyente. La tendencia indica una, cada vez, menor variación.

La Carga Orgánica Específica Eliminada no ejerce prácticamente influencia sobre el Rendimiento.

El espesor máximo alcanzado a lo largo de todo el proceso,

coincide con el máximo hallado por Hoehn y Ray.

Hay una tendencia que indica disminución de rendimiento cuando aumenta el tiempo de retención de fangos. La explicación es posible sea, la competencia de los heterótrofos por el Oxígeno.

Al aumentar la carga orgánica afluyente, crece la biomasa específica.

Al aumentar la carga orgánica afluyente, disminuye la tasa de consumo específico de oxígeno.

Al aumentar la carga orgánica afluyente, crece el espesor de la biopelícula, y su densidad.

Al aumentar la carga orgánica específica afluyente, aumenta la concentración de sustrato en el efluente y el espesor, tendiendo a mantenerse constante la densidad.

Al aumentar la carga orgánica específica afluyente, disminuye el tiempo de retención de fangos y la biomasa específica.

5.3.2.- Sobre la producción de biomasa

Al disminuir el tiempo de retención de fangos, aumenta la carga orgánica específica en el efluente.

El tiempo de retención de fangos no influye de manera manifiesta, sobre la carga orgánica eliminada.

Al disminuir la carga orgánica específica eliminada, la densidad de la biopelícula crece ligeramente.

Al aumentar el espesor, disminuye la carga orgánica específica eliminada.

Al aumentar el espesor, aumenta la densidad de la biopelícula.

Al aumentar la biomasa, disminuye la carga orgánica específica eliminada.

5.3.3.- Sobre el Oxígeno:

Se denota cierta relación entre la densidad de la biopelícula y la tasa de consumo de oxígeno. Al aumentar ésta, la densidad disminuye ligeramente.

Al aumentar la biomasa, disminuye la tasa de consumo de oxígeno.

La tasa específica de consumo de oxígeno, aumenta la carga orgánica específica eliminada.

La tasa específica de consumo de oxígeno disminuye, al aumentar la densidad.

Al aumentar la concentración afluente, disminuye la tasa de consumo de oxígeno por Kg. de DQO eliminada.

Al aumentar la densidad, disminuye la tasa de consumo de oxígeno por Kg. de DQO eliminado.

El coeficiente de respiración endógena aumenta, al aumentar el caudal de oxígeno

Sobre la influencia del nitrógeno

Al aumentar la carga orgánica afluente, aumenta la relación concentración de nitrógeno del efluente respecto al afluente.

No parece haber gran influencia para la relación concentración de nitrógeno en el efluente respecto al afluente, de la carga orgánica eliminada.

Al aumentar la carga de nitrógeno amoniacal afluente, aumenta la concentración de nitrógeno en el efluente.

La concentración de nitrógeno en el efluente aumenta, e igualmente lo hace la carga de nitrógeno total eliminado. La tendencia es a crecer esta última hasta un valor límite.

Al aumentar la carga hidráulica, aumenta el nitrógeno amoniacal en el efluente.

Al aumentar la carga orgánica en el afluente, aumenta la concentración de nitrógeno en el efluente.

No hay influencia de la carga orgánica específica eliminada

sobre la relación nitrógeno desnitrificado-nitrógeno
afluente.

El rendimiento de eliminación total de nitrógeno aumenta,
cuando la concentración de nitrógeno efluente disminuye.

6.- DISCUSSION

6.- DISCUSION

6.1.- COMPARACION CON VALORES DE LOS PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE OTROS PROCESOS.

De la bibliografía revisada sobre procesos de película fija sumergida y aireada, fangos activos con oxígeno y RBC's, se ha entresacado aquélla que puede ser comparable con el presente estudio.

El enfoque de esta parte del trabajo, hay que centrarlo, fundamentalmente, en la oxidación de la materia orgánica carbonosa, y accesoriamente, por la influencia que haya podido tener en el proceso, en la nitrificación-desnitrificación conjuntas.

6.1.1.- Procesos Seleccionados.

OXIDACION DE MATERIA ORGANICA CARBONACEA.

FANGOS ACTIVOS CON OXIGENO PURO (1)

Tiempo medio de Retención Celular: 8-20 días
Relación Alimento-Microorganismos: 0,25-1 gDBO/gSSVB
Carga Volúmica: 1,6-3,3 Kg/m³.d
Tiempo Retención Hidráulico: 1-3 horas
Rendimiento DBO: 85-95%
Carga Orgánica: 0,3-0,6 Kg/m³.d

BIODISCOS (RBCs) (2)

Carga Orgánica: 0,03-0,2 KgDBO/m².d
Carga Hidráulica: 0,2 m³/m².d
TRH = 1,5-3 horas (total)
Rendimiento DBO: 80-92% (40-65% primera etapa)
Acumulación Biopelícula: 200 g/m²
F/M: 0,12-15,14 total (0,15-2,24 en primera etapa)

FANGOS ACTIVOS CON OXIGENO PURO

(3)

Edad del fango: 4-11 días

F/M: 0,18-0,47

Carga Volúmica: 0,95-2,5 Kg/m³.d

TRH = 1-3 horas

Rendimiento DBO: 91,25-93,25%

Consumo de Oxígeno: 1,25-1,97 KgO₂/KgDBOE1

Producción de Fangos: 0,4-0,51 KgSS/KgDBOe

PELICULA FIJA, SUMERGIDA Y AIREADA.
REACTOR ASFF

(4)

Carga Orgánica: 12,6-90 gDQO/m².d

Carga Hidráulica: 0,02-0,1 m³/m².d

TRH: 6 horas total (1,5 etapa)

Rendimiento DQO: 94-97% total.(83-87% primera etapa)

SSVB: 2-37 gSSV/m²

%SSVB: >90%

Espesor Biopelícula: 2,3 mm

SSE: 17-30 mg/l

ELIMINACION MATERIA ORGANICA CARBONACEA,
NITRIFICACION Y DENITRIFICACION

BIODISCOS TOTALMENTE SUMERGIDOS (5)
CON APORTACION DE AIRE DE DIFUSOR

Carga Orgánica: 8,7-37 gDQO/m².d
Carga Hidráulica: 0,185 m³/m².d
N-NH₄ Afluente: 10-38 mg/l
Alcalinidad Afluente: 200-350 mg/l
N-NO₃ Afluente: 3 mg/l
TRH: 11 horas
Rendimiento DQO: 90%
Rendimiento N-NH₄: 90%
Rendimiento Nitrógeno total: 60%
Espesor Biopelícula: 1-1,3 mm

Reactor BSP (6)

Carga Orgánica: 4,9-13,46 gDQO/m².d
Carga Hidráulica: 0,135 m³/m².d
Rendimiento DQO: 35-50%
Rendimiento Elim.N₂ Orgánico: 55-75%
N-NO₃ Efluente: despreciable
SSE: <10 mg/l
Espesor: 1 mm
TRH: 9,6-26,4 horas

Resultados Presente Estudio

(7)

Carga Orgánica: 146-584 gDQO/m².d
Carga Hidráulica: 0,73-1,5 m³/m².d
TRH: 2,8-5,6 horas
Tiempo medio Ret.Fangos: 13 días
F/M: 0,1-2,5
Carga Volúmica: 0,8-3,43 Kg/m³.d
Rendimiento DQO: 25-94%
Rendimiento DBO5: 28-95%
Consumo Oxígeno: 1,17-1,6 Kg/KgDQO Eliminado
SSVB: 55-260 g/m²
%SSVB: >90%
Espesor Máximo de la biopelícula: 3,27 mm.
SSE: 21 mg/l
N-NO₃ Ef: Despreciable
N-NO₃ Afluente: 0,1-0,2 mg/l
N-NH₄ Afluente: 16-33 mg/l
Rendimiento ETN: 12-47%

6.1.2.- Resultados:

De la comparación de los datos expuestos, se obtienen los siguientes resultados:

-La COA máxima del proceso estudiado, está muy por encima del resto de los procesos mostrados como referencia. Respecto a los RBCs, la relación es 3:1 y 4,5:1 respectivamente para alta y baja carga.

-Para niveles de rendimientos comparables de eliminación de DQO, la COA del proceso estudiado es superior. Respecto al Reactor BSP, la relación es 11:1, para obtener rendimientos 2 veces superiores.

-La carga hidráulica del proceso estudiado, es superior en su rango inferior, de 4 a 7 veces la máxima de cualquier proceso de los comparados.

-El valor inferior del TRH en este estudio, está en el rango intermedio de los TRH comparados.

-El Tiempo medio de Retención de Fangos es comparable al

de los procesos de Fangos Activos con Oxígeno. (Tejero, 1979); (Hernández Muñoz, 1990).

-La relación F/M del estudio, es comparable a la de Fangos Activos con Oxígeno y Biodiscos (prácticamente con los mismos límites para la primera etapa).

-La Carga Volúmica es comparable a la de Fangos Activos con Oxígeno.

-El consumo de Oxígeno es similar al de Fangos Activos con Oxígeno (Tejero, 1979), aunque algo inferior.

-Los SSVB fueron 7 veces superiores a los valores en el reactor ASFF. Si se observa que también fué superior la COA del estudio, prácticamente, en 7 veces la empleada en el reactor ASFF, se puede extrapolar una situación de proporcionalidad.

-En el estudio se obtuvo una biopelícula con %SSVB > 90%, que coincide con la biopelícula del reactor ASFF. Biomasa muy rica en comparación con la de un RBC convencional.

-El espesor de la biopelícula del estudio, es el más

alto de cuantos se referencian en la comparación. No obstante, el más próximo es el del reactor ASFF (2,3 mm).

-Los SSE medidos son muy bajos, debido, fundamentalmente a las características del sistema (tipo de sustrato, tipo de biopelícula, oxígeno), e influido ligeramente por el plan de mantenimiento adoptado para la eliminación de la posibilidad de crecimiento suspendido. (limpieza diaria de todas las paredes del reactor).

-El rendimiento en la eliminación de nitrógeno, es relativamente bajo comparado con los procesos aquí referenciados.

6.2.- Comparación con relaciones entre parámetros obtenidos en otros estudios.

En esta parte, se van a comparar algunas de las gráficas obtenidas con las que aparecen en las publicaciones diversas, tanto desde la teoría general de los procesos biopelícula, plasmada en los textos actuales, como de los procesos que son comparables al estudiado.

Para seguir la misma estructura de estudio establecida en el apartado "Análisis del funcionamiento del proceso", se refieren a continuación para cada bloque tratado, las gráficas elegidas.

6.2.1.- Rendimiento DQO:

Las relaciones que se comparan son las siguientes:

So-RENDQO

CVA-RENDQO

CH-RENDQO

TRH-RENDQO

Los parámetros que afectan al rendimiento, están a su vez influenciados por otros parámetros como:

CH-S

COA-S

So-S

S-COE

So-DQO ELIMINADO

COA-COE

SO-RENDQO: Se observa la coincidencia en la tendencia apuntada en la gráfica del estudio presente con la indicada en la gráfica extraída de la teoría general de reactores biológicos de biopelícula fija.

Un incremento en la concentración del sustrato en el afluente, incrementa la tasa de eliminación, pero reduce la eficiencia o rendimiento. Cuando S_0 es bajo, el rendimiento es alto, pero a medida que crece disminuye el rendimiento.

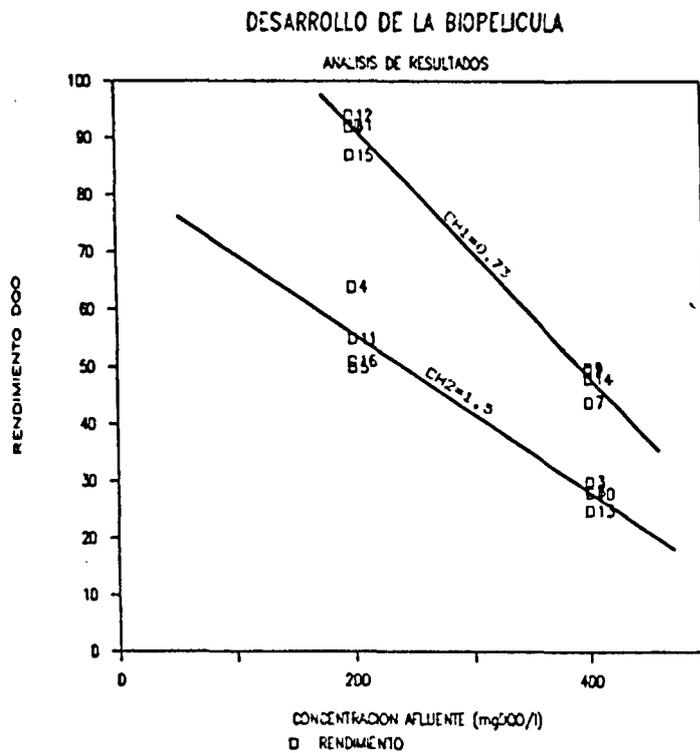


FIGURA D-1. - Relación entre la concentración afluente y rendimiento DQO. (del presente estudio).

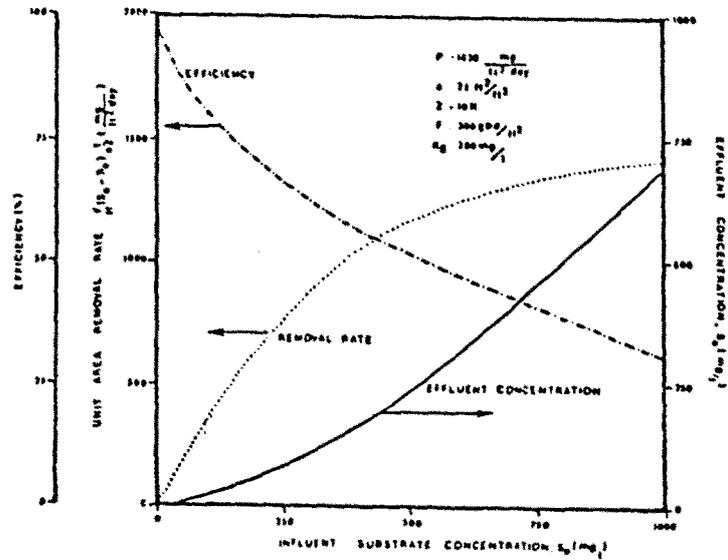


FIGURA D-2. - Efecto de la concentración afluente. (FUENTE: ECKENFELDER, 1980).

COA-RENDQO: Se ha tomado de lo plasmado por Eckenfelder sobre los Reactores Biológicos de película fija, la gráfica COA-RENDQO, que representa la variación del rendimiento para varias cargas orgánicas aplicadas. En la gráfica se pueden observar tres curvas en función de la concentración afluente. Igualmente se ha tomado una gráfica, que relaciona estos parámetros, de un trabajo de investigación sobre consideraciones de diseño para torres biológicas de medios soporte plásticos. (Richard and Kingsburg, 1973).

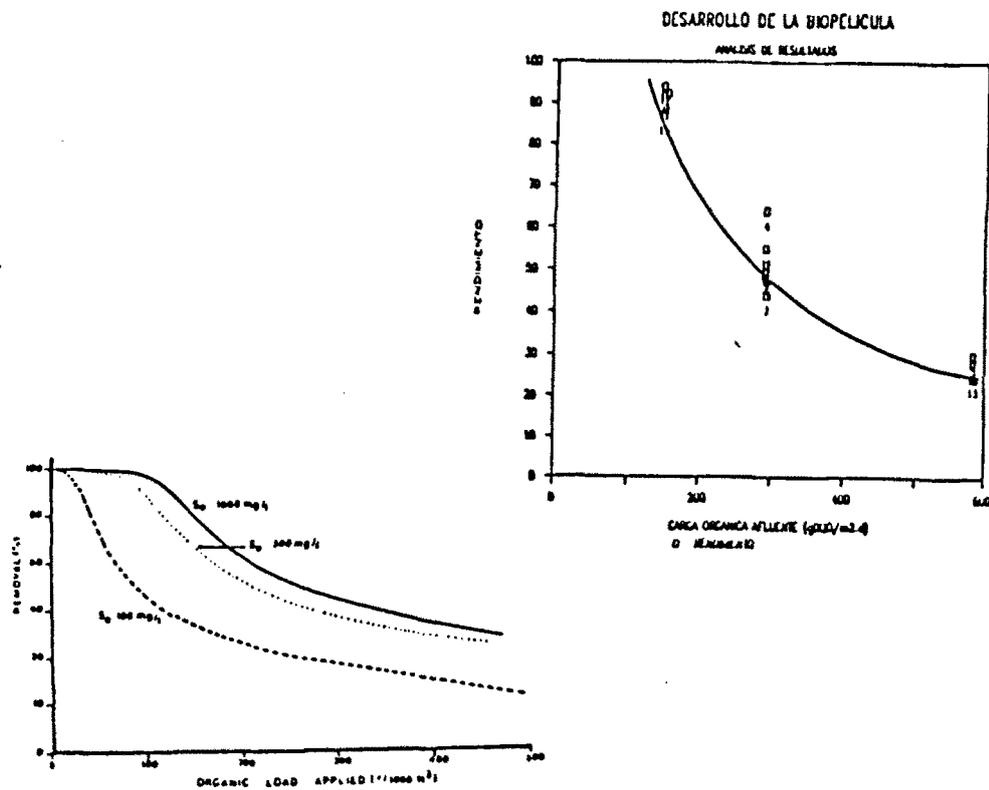


FIGURA D-3. - Relación entre la carga orgánica afluente y el rendimiento DQO. FUENTE: (A) del presente estudio (B) Eckenfelder, 1980.

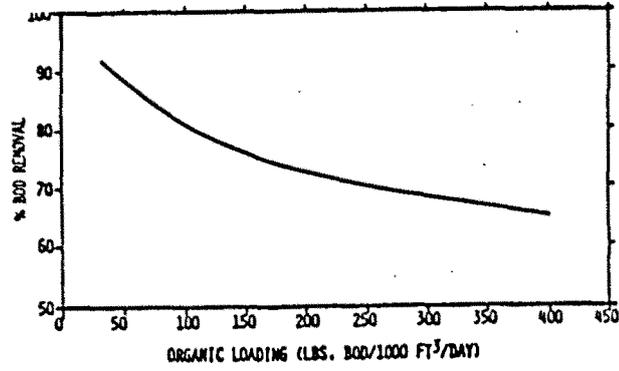


FIGURA D-4. - Relación entre Carga orgánica afluente y rendimiento. FUENTE: Richard and Kingsburg, 1973.

CH-RENDQO: De la comparación con un reactor biológico de película fija aireada (ASFF), se obtiene que para CH de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, es decir 7 veces menos que la menor de nuestro estudio, el rendimiento en la primera etapa es menor del 80%.

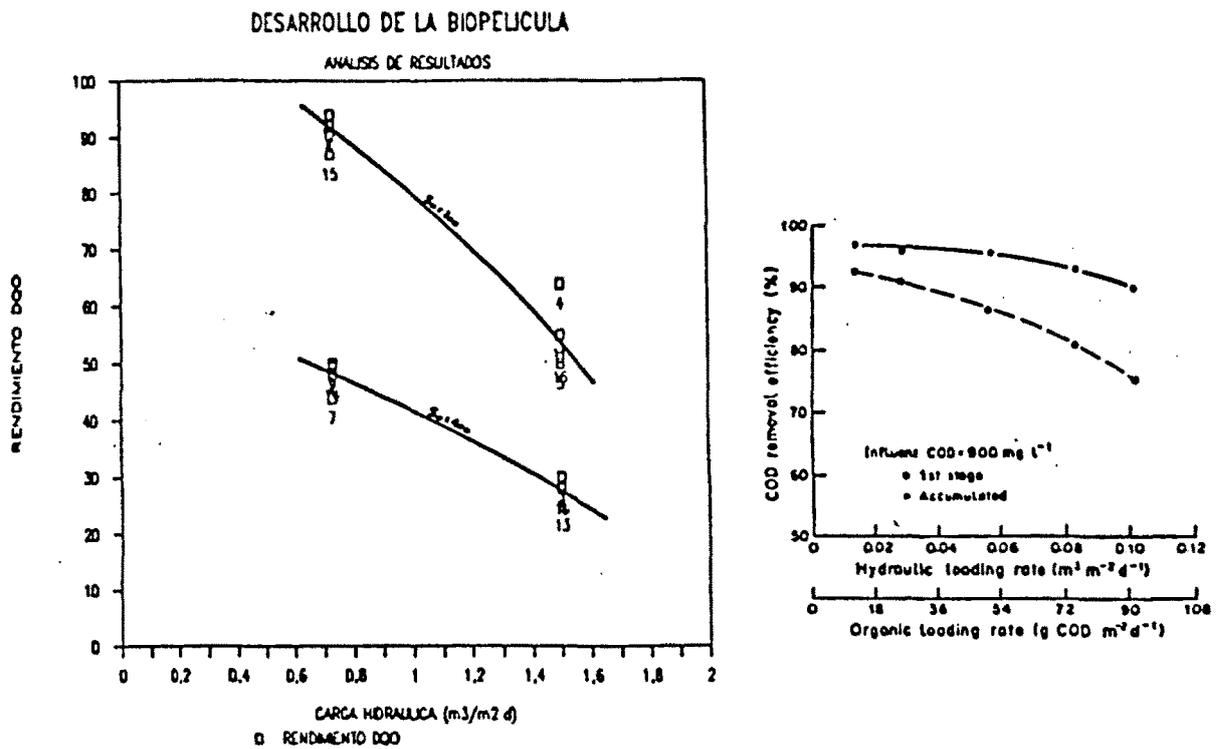


FIGURA D-5. - Relaciones entre cargas hidráulicas y rendimientos DQO, para el presente estudio y el reactor ASFF (FUENTE: Hamoda y Adb-El-Bary, 1987)

TRH-RENDQO: La figura que se ha extraído de la bibliografía pertenece a un reactor de película fija y oxígeno puro.

El efecto del Tiempo de Retención Hidráulico se investigó para tres concentraciones crecientes de sustrato.

El haber pasado de una concentración de 55 mg/l a otra doble, se traduce en que el rango de valores del rendimiento varía desde 47-92% en el primer caso, a 25-88% en el segundo. En nuestro estudio los rangos fueron 50-92% y 25-50%.

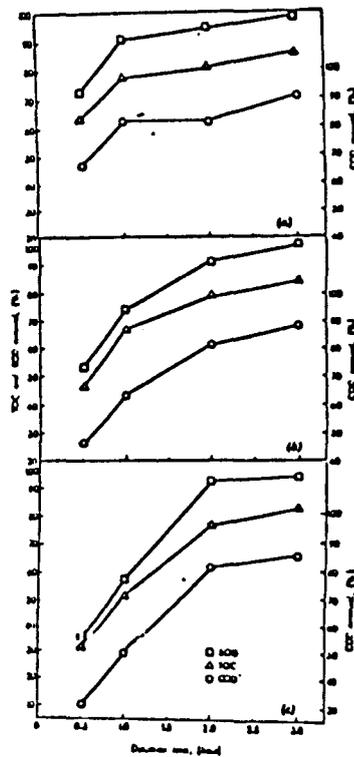


FIGURA D-6. - Relación entre el tiempo de retención hidráulico y el rendimiento. (FUENTE: By Show-Jong Yeh y Jenkins, 1978)

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

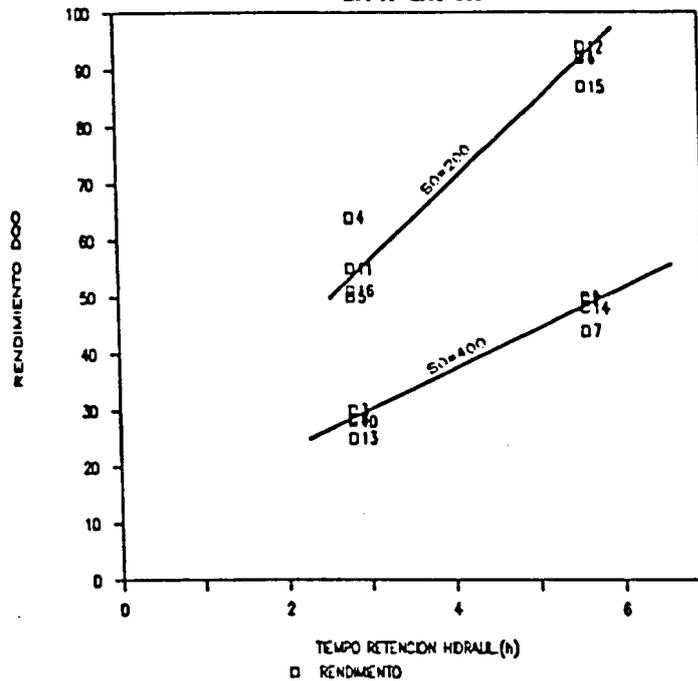


FIGURA D-7.- Relación entre el tiempo de retención hidráulico y el rendimiento DQO (del presente trabajo).

Las curvas son todas similares. El porcentaje de eliminación de materia orgánica crece con el tiempo de retención. Similares resultados obtuvo Ford et al (1967).

CH-S: Se toma como referencia la gráfica que relaciona la S y la CH de un estudio de Grady and Lim, 1980. Este estudio estuvo dirigido al diseño de un RBC.

Se observa la misma tendencia que en nuestro estudio.

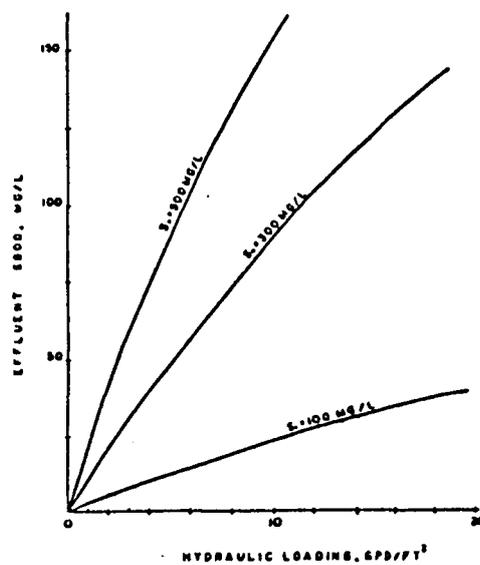


FIGURA D-8. - Relación entre la carga hidráulica y la concentración efluente. FUENTE: Ball, 1982

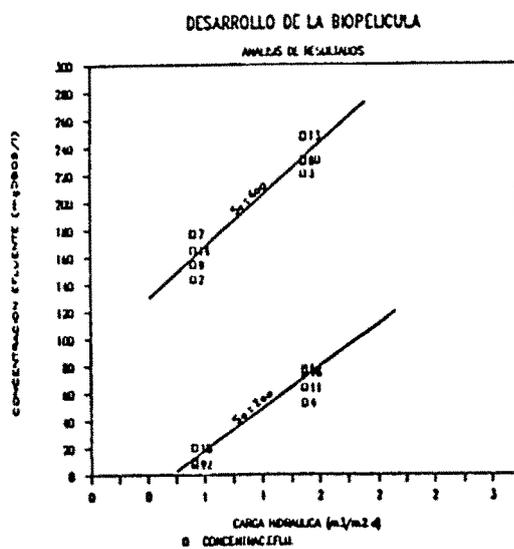


FIGURA D-9. - Relación entre la carga hidráulica y la DBO efluente. (del presente estudio)

COA-S: Se toma como referencia un RBC para eliminación de DBO. La COA es de $10 \text{ g/m}^2\text{.d}$, es decir, 14 veces más pequeña que la menor investigada en este estudio.

En el efluente se obtienen concentraciones del orden de 15 mg/l .

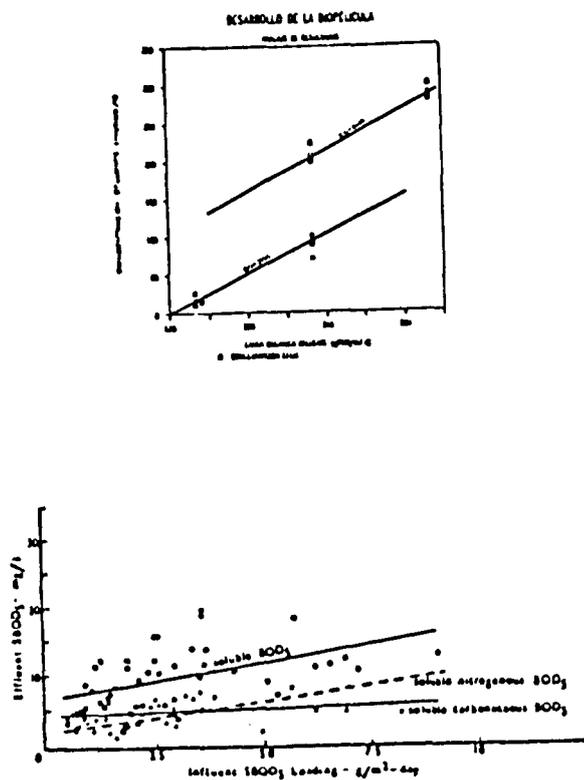


FIGURA D-10.- Relación entre las cargas orgánicas afluente y las concentraciones efluente para el estudio presente y para un RBC como sistema de tratamiento terciario (FUENTE: Poon,Chin,Smith y Mikucki, 1981)

S0-S: De la teoría general, se toma la referencia para la comparación la gráfica que muestra el efecto de la concentración del sustrato afluente respecto a, en este caso, la concentración del efluente.

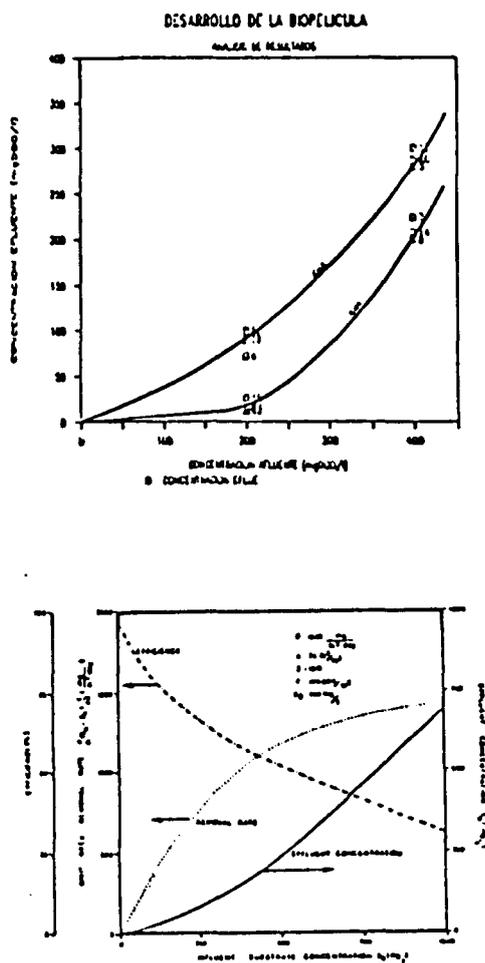


FIGURA D-11. -. Relaciones entre la concentración afluente y la concentración efluente. (FUENTES: (A) Presente estudio y (B) Eckenfelder, 1980)

COA-S: Se ha tomado una gráfica típica para diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (RBC), concretamente la que aquí se representa es para RBCs, y se referencia con la obtenida en el estudio presente.

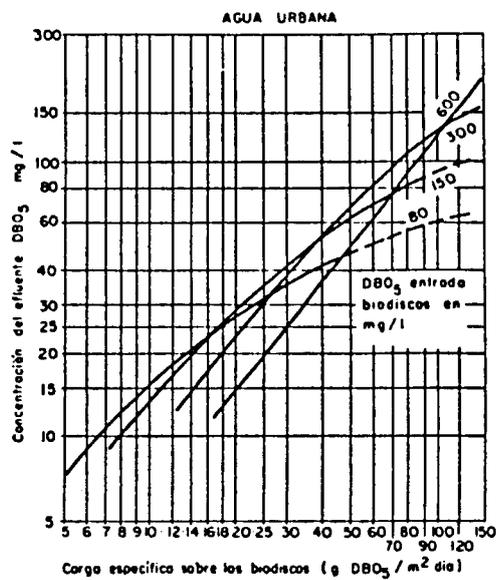


FIGURA D-12. - Relación entre la concentración efluente y la carga orgánica afluente (FUENTE: Hernández Muñoz, 1990)

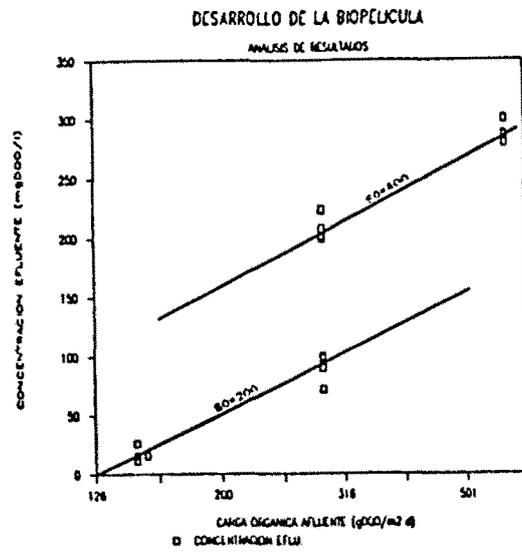


FIGURA D-13. - Relación entre la concentración efluente y la carga orgánica afluente (del presente estudio).

S0-DQOEL: Se toma como referencia la relación de estos parámetros obtenida en el reactor ASFF. La DQO eliminada aparentemente sigue aumentando para los niveles de 300 g/d en el afluente, en las condiciones de nuestro experimento.

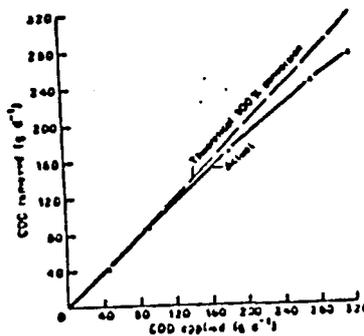
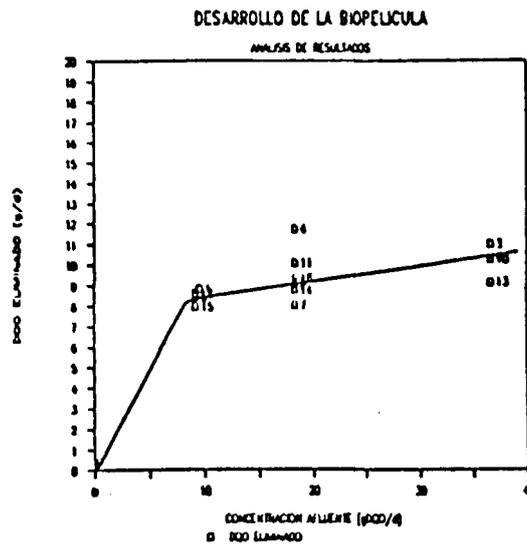


FIGURA D-14. - Relaciones entre la concentración afluente y la DQO eliminada FUENTES: (A) Presente estudio y (B) Hamoda, Abd-El-Bary, 1987)

Esta carga es considerablemente más alta que la aplicada a los RBCs (Antonie et al., 1974 y Pano Middlebrooks, 1983), que es del orden de 5-20 gDQO/m².d.

COA-COE: De Eckenfelder (1980), y de un estudio sobre RBCs para eliminación de DBO (Poon et al, 1981), se extraen las gráficas para ser comparadas con la del estudio presente.

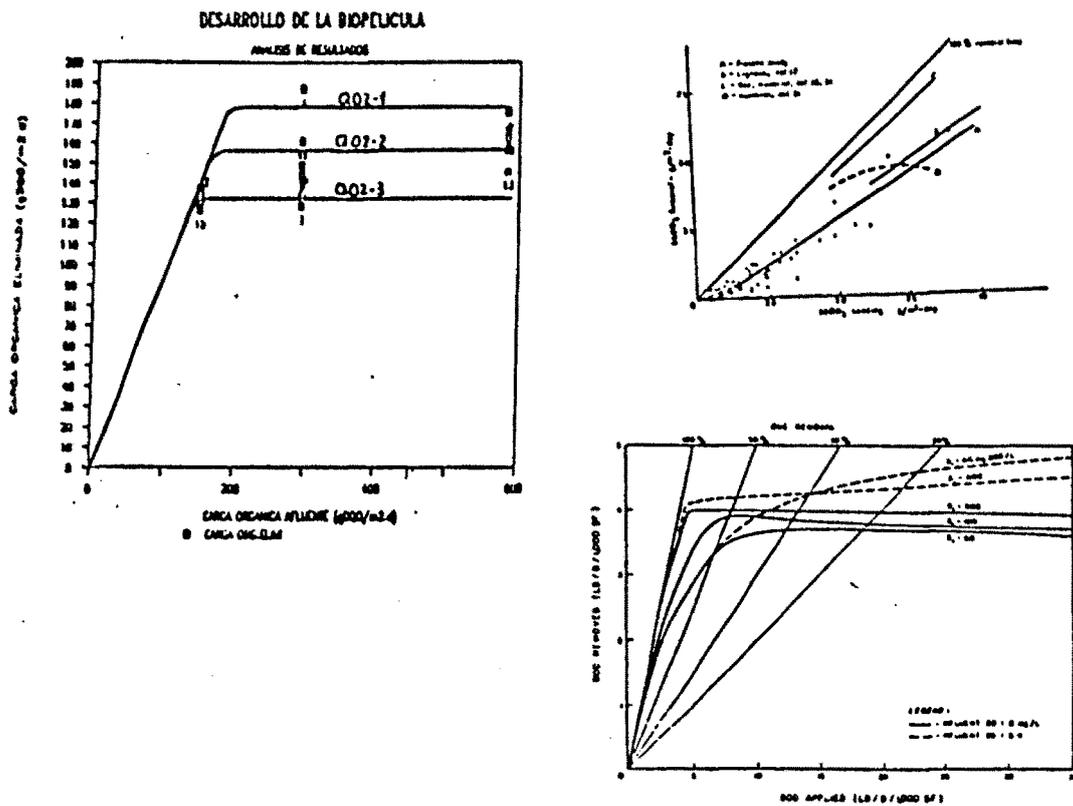


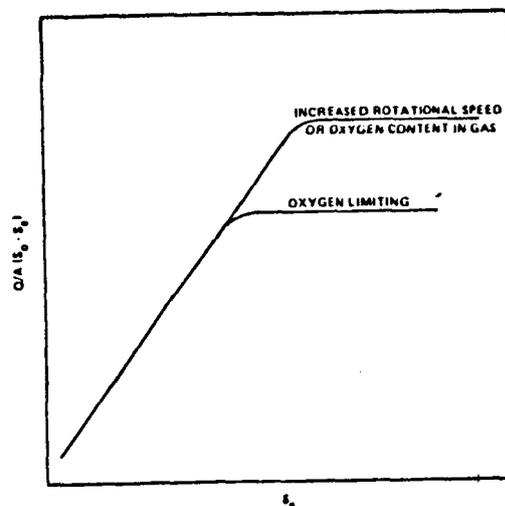
FIGURA D-15. - Relaciones entre la Carga Orgánica aplicada y la eliminada (FUENTES: (A) estudio presente. (B) Poon et al, 1981. (c) Eckenfelder, 1980)

De la primera referencia (Eckenfelder), se demuestra en esta figura que un incremento de S_0 , aumenta la Tasa de eliminación de sustrato.

Del estudio del RBC, se obtiene que, para una carga de $4,88 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ el rendimiento está en el rango del 60%.

En la gráfica de nuestro estudio, se han representado los tres caudales de oxígeno que se han empleado en el estudio, pudiendo aplicar la teoría de Busch (1958, 1965), respecto a que se alcanza una meseta para cada caudal de oxígeno, que corresponde a toda la utilización del nutriente primario por parte de un cultivo mixto de bacterias heterótrofas. En las figuras siguientes se puede apreciar dicho efecto.

6.1- Oxygen Limitation Effects on Performance of Rotating Biological Contactor



6.2.2.- Producción de Biomasa:

En este segundo bloque se comparan las relaciones siguientes:

-Espesor-Densidad.

-Espesor-Tasa de DQO Eliminado.

-Tasa de carga de sustrato-Densidad.

-Carga Volúmica Afluyente-Biomasa Adherida.

-Tasa de Dilución-Tasa específica de eliminación de sustrato.

-Masa Biopelícula-Tasa de desprendimiento.

-Masa Biopelícula-Tasa específica de desprendimiento.

ESPESOR-DENSIDAD: Los efectos del espesor sobre la densidad fueron investigados por primera vez por Hoehn y Ray, quienes postularon que la densidad depende del espesor. La gráfica que se compara es la obtenida por estos investigadores.

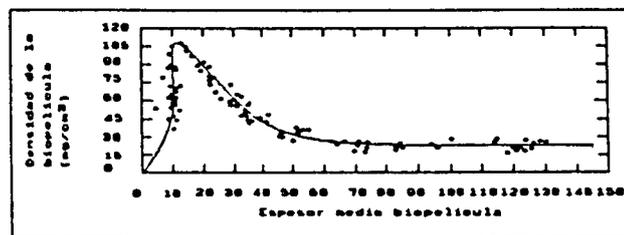
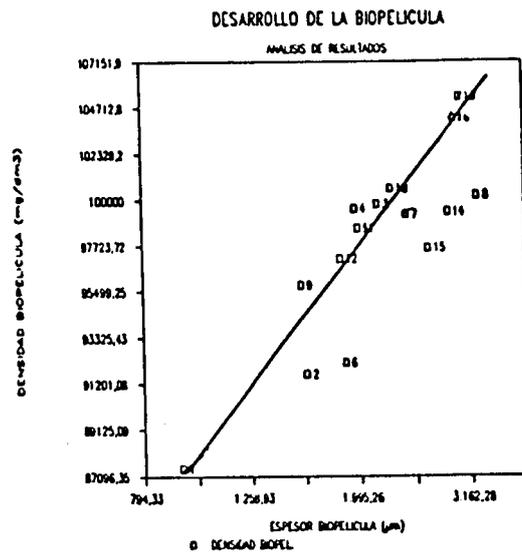


FIGURA D-16.- Efectos del espesor sobre la densidad. FUENTES:

(A) De este estudio (B) Hoehn y Ray, 1973.

Hay que hacer notar que las densidades obtenidas en nuestro estudio son equiparables al valor máximo obtenido en el estudio de Hoehn y Ray.

ESPESOR-TASA ELIMINADA DQO: La Tasa de eliminación de DQO como una función del espesor de la biopelícula, se puede observar en estas gráficas.

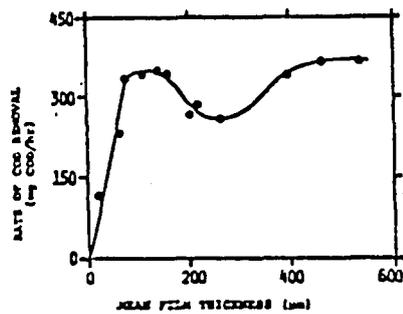
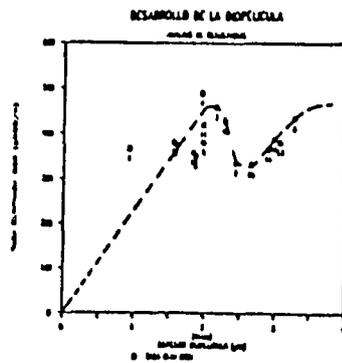


FIGURA D-17.- Relación entre el espesor medio de la película y la tasa de DQO eliminada. FUENTES: (A) Del estudio presente (B) Hoehn y Ray, 1973.

COA-DENSIDAD: La influencia de la tasa de carga de sustrato sobre la densidad de la biopelícula, se recoge en la gráfica del estudio llevado a cabo con poblaciones bacterianas mixtas en un Roto-par.

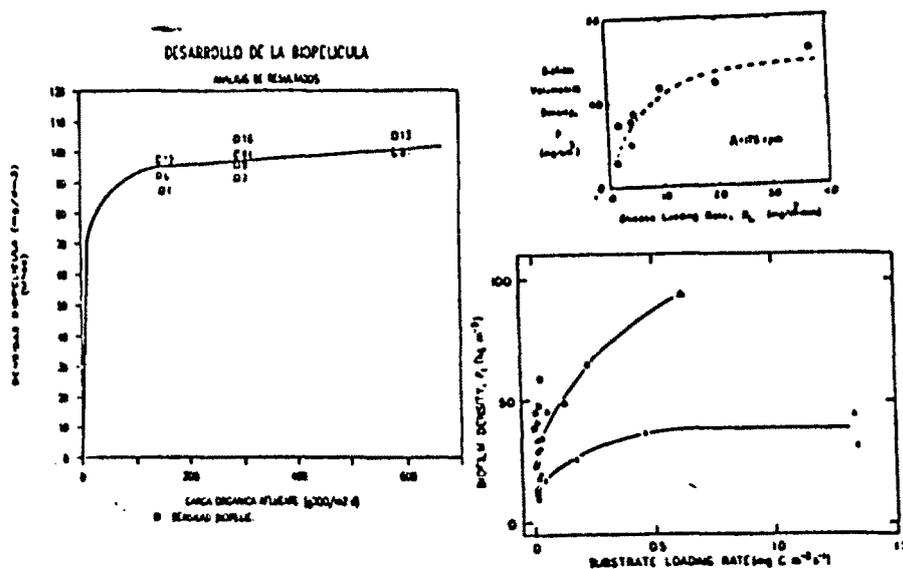


FIGURA D-18. - Relación entre la carga orgánica afluyente y la densidad de la biopelícula. FUENTES: (A) Del presente estudio (B) Trulear, 1980 y Characklis, 1980 (C) Trulear y Characklis, 1982

Igualmente se refiere la figura que corresponde a un trabajo de investigación en un reactor anular de dos cilindros concéntricos. Se estableció que la densidad de la biopelícula, crece con la COA. Al aumentar S_0 , crece la penetración del sustrato.

Es de destacar los rangos de valores de densidad obtenidos en todos estos estudios. Así, los valores obtenidos en el presente estudio se mantienen en valores del orden del doble que los obtenidos en los estudios referenciados.

COA-BIOMASA ADHERIDA: La figura de comparación está tomada del estudio del reactor ASFF. Se muestra que, a varias cargas orgánicas, la biomasa desarrollada en la primera etapa creció con la tendencia de aproximarse a un máximo. Esto indica que la cantidad de biomasa adherida es dependiente de la tasa de COA y puede ser definida con una función de saturación (Pano y Middlebrooks, 1983).

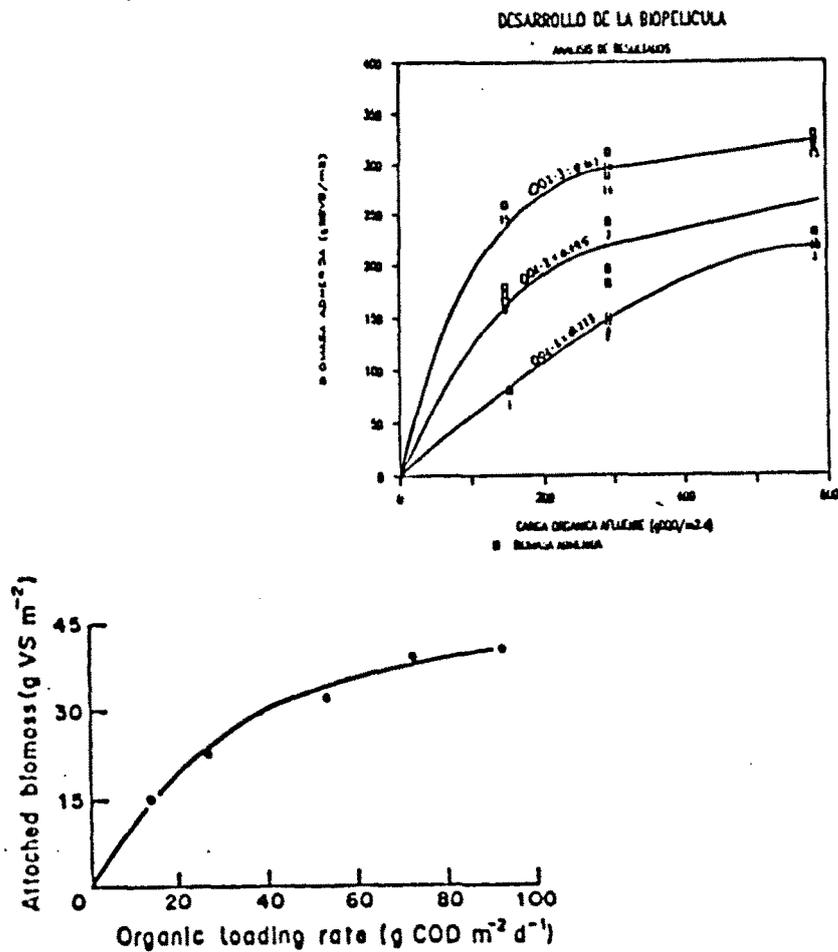


FIGURA D-19.- Relación entre la carga orgánica y la biomasa adherida. FUENTES: (A) Del presente estudio (B) Hamoda y Abd-El-Bary, 1987

Estas observaciones han revelado que el reactor ASFF puede retener una considerable cantidad de biomasa adherida con una apreciable eliminación de materia orgánica. En nuestro caso este hecho es mucho más exaferado, basta para ello observar los muy superiores valores tanto de biomasa adherida como de carga orgánica afluente.

MASA BIOPELICULA-TASA ESP.DESPREDIMIENTO: La figura de comparación, está obtenida en un reactor Roto-par con una población homogénea de bacterias (P.Aeruginosa) y flujo turbulento. Se demuestra que la masa de biopelícula no ejerce influencia sobre la tasa específica de erosión celular.

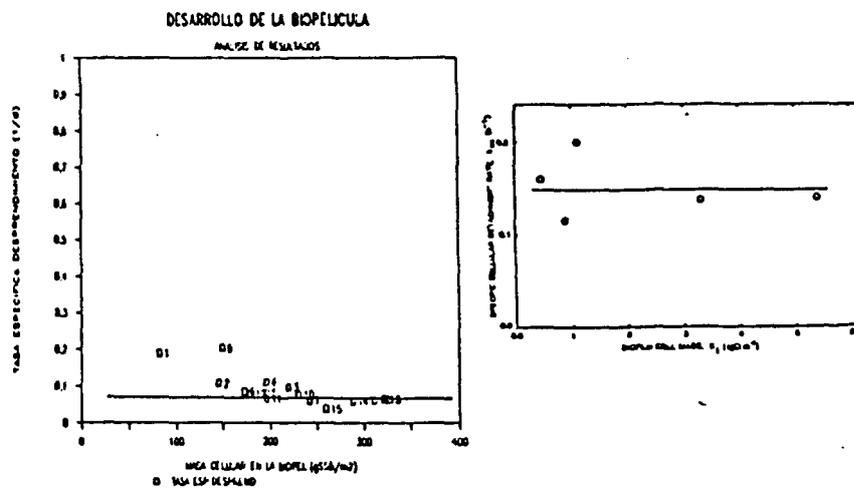


FIGURA D-21. - Relación entre la masa de biopelícula y la tasa específica de desprendimiento. FUENTES: (A) Del presente estudio (B) Bakke et al. ,1984

6.2.4.- Consumo y utilización del Oxígeno

En este apartado se va a referir una comparación entre una gráfica obtenida y otra del proceso de fangos activos con oxígeno. Esta relación es:

-Carga Volúmica-Tasa de consumo de oxígeno.

CARGA VOLUMICA-TCO(DQO): La gráfica de referencia, está obtenida del estudio de Tejero (1979), sobre fangos activos con uso de oxígeno puro.

En la gráfica de Tejero se obtiene, para cada fase de estudio, una hipérbola debido a la influencia del caudal a tratar sobre la carga volúmica y no sobre la tasa de consumo de oxígeno. En la gráfica de nuestro estudio sucede algo similar a lo apuntado.

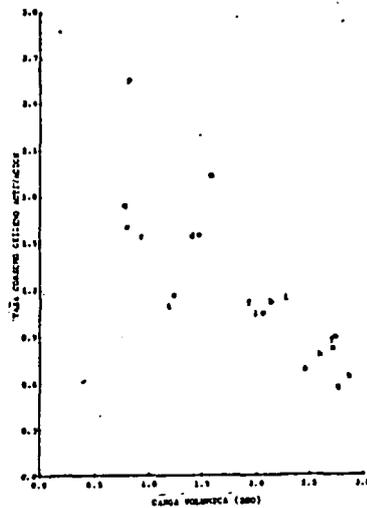


FIGURA D-22. - Relación entre la carga volúmica y la tasa de consumo de oxígeno por unidad de DBO eliminada. FUENTE: Tejero, 1979.

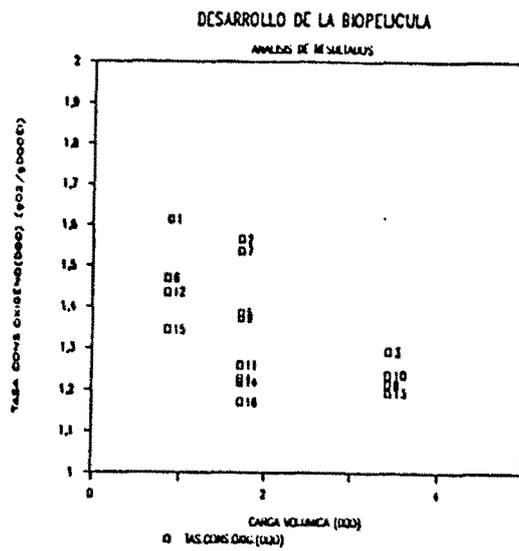


FIGURA D-29. - Relación entre la carga volúmica y la tasa de consumo de oxígeno por unidad de DQO eliminada. **FUENTE:** Del presente estudio.

6.2.4.- Influencia del Nitrógeno

En este bloque se van a referir tres comparaciones entre las gráficas obtenidas y las figuras extraídas de la bibliografía general. Estas relaciones son:

- Carga de Nitrógeno Amoniacal Afluyente-Concentración $N-NH_4$ Efluente.
- Carga Hidráulica-Concentración $N-NH_4$ Efluente.
- Concentración Efluente DQO-Carga de Nitrógeno Total Eliminado.

C.(N-NH₄) A.-(N-NH₄) Ef.: Del estudio de un RBC para la eliminación de nitrógeno amoniacal, se extrae la gráfica que relaciona los parámetros antedichos, para ser comparada con la del presente estudio.

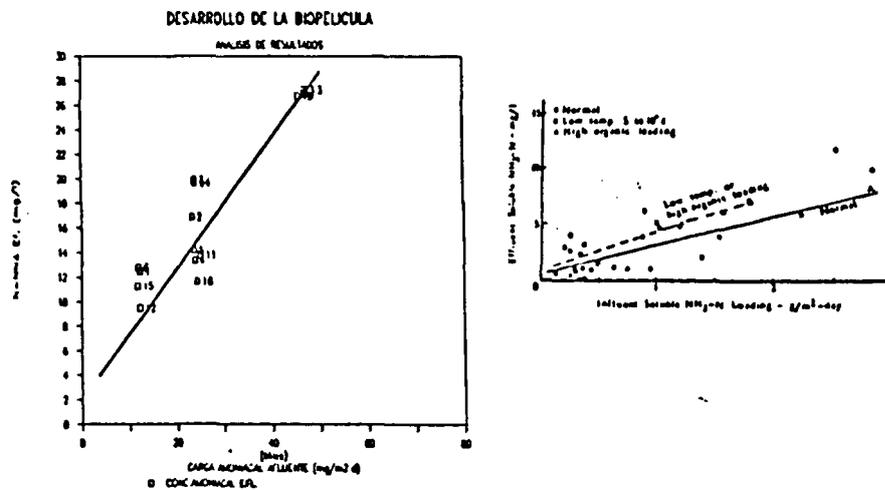


FIGURA D-24. - Relación entre la carga de nitrógeno amoniacal en el afluente y la concentración en el efluente. FUENTES: (A) Del estudio presente (B) Poon, Chin, Smith y Mikucki, 1981.

Las cargas aplicadas en el RBC, fueron 15 veces más bajas (en su límite superior), que las empleadas en el estudio presente, para obtener concentraciones semejantes en el efluente cuando la carga del RBC fué superior en 1,7 veces a la del estudio (carga más pequeña).

CH-(N-NH₄) Ef.: De estudios resumidos por Eckenfelder para RBCs, en el apartado correspondiente a la superficie necesaria para la nitrificación, se obtiene la figura que se compara con la obtenida en el estudio presente.

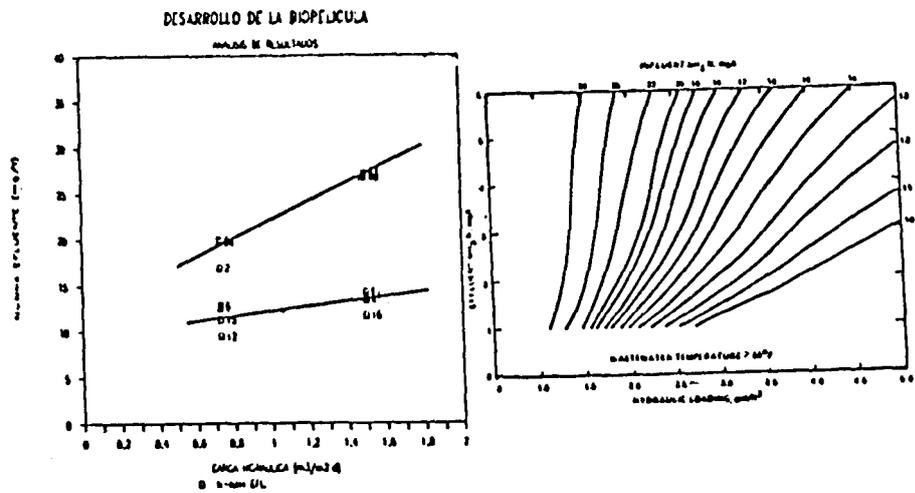


FIGURA D-25. - Relación entre la carga hidráulica y la concentración de nitrógeno amoniacal efluente. **FUENTES:** (A) Del presente estudio (B) Eckenfelder, 1979

S-CARGA N.T. ELIMINADO: De un trabajo de investigación para modelar la eliminación simultánea de sustancias orgánicas y nitrógeno en una biopelícula, se extrae la figura para ser comparada con la obtenida en el presente estudio.

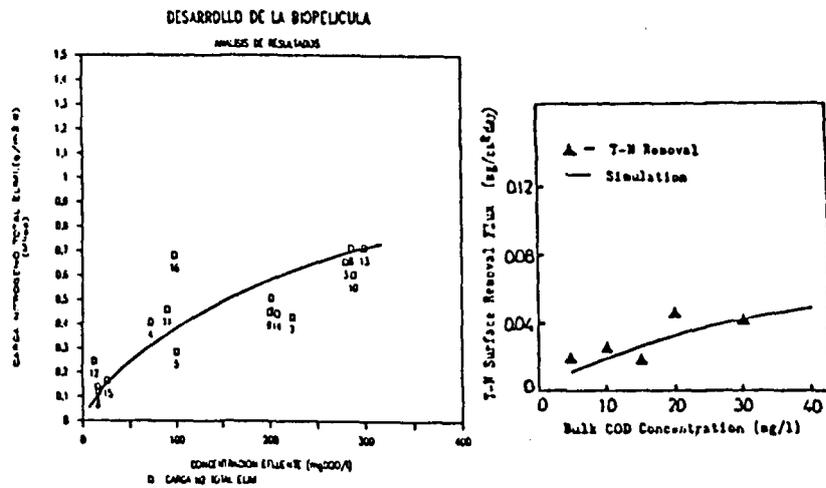


FIGURA D-26.- Relación entre la concentración en el efluente de DQO y la carga de nitrógeno total eliminado. FUENTES: (A) Del estudio presente (B) Chen, Ozaki y Terashima, 1989.

El reactor que se empleó fué un RBC con los discos totalmente sumergidos. La eliminación total de nitrógeno depende de la concentración DQO en el efluente. La oxidación orgánica compite con la nitrificación para el consumo de oxígeno.

6.3.- ANALISIS BIOCINETICO

La aplicación general de la cinética estudiada al proceso desarrollado, es el propósito de este apartado, que se dividirá en 4 puntos cuyo análisis ha de conducir al establecimiento de factores de diseño y sus efectos sobre el rendimiento y estabilidad del proceso. En este apartado de estudian las relaciones entre los parámetros bajo la perspectiva de la teoría biocinética general, y se revisan las relaciones que se obtuvieron, mediante el análisis paramétrico, en la elaboración de resultados.

Estos 4 puntos de referencia son:

Rendimiento DQO.

Crecimiento de la biomasa.

Consumo de Oxígeno.

Biomasa presente.

6.3.1.- Eliminación de Sustrato

Bajo el supuesto de estado estacionario y considerando que toda la biomasa se encuentra en contacto con la misma concentración de sustrato (que en nuestro caso corresponderá a la concentración efluente, al ser flujo de mezcla completa), y suponiendo que es aplicable la ecuación de Monod, un balance de sustrato en el sistema dará el siguiente resultado:

$$Q(S_0 - S) = A.e. \frac{dS}{dt} = A.e. \frac{K.x.S}{K_s + S} \quad (6.1)$$

De donde, dividiendo por A, y como $Q/A = CH$, y $COE = CH(S_0 - S)$, resulta:

$$COE = CH(S_0 - S) = \frac{K.e.x.S}{K_s + S} \quad (6.2)$$

En el supuesto de que $S \gg K_s$, resulta:

$$COE = CH.(S_0 - S) = K.e.x \quad (6.3)$$

Y como $X_{eB} = e.x$, resulta:

$$COE = X_e B \cdot K \quad (6.4)$$

En nuestro caso COE tiene un rango de variación muy estrecho, por lo que en primera aproximación se podría considerar constante.

$$K \cdot X_e B = COE \sim cte. \quad (6.5)$$

Dividiendo por la biomasa específica $X_e B$, se obtiene:

$$COXE = \frac{COE}{X_e B} = K \quad (6.6)$$

Por lo tanto, $COXE = K =$ Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos.

Existen dos posibles hipótesis que justificarían este resultado:

1ª Hipótesis:
$$K = \frac{K^*}{X_e B}$$

2ª Hipótesis: La biomasa "activa" presente es constante, pero diferente a la biomasa total presente, con lo que:

$$(x.e)_{ac} = \text{cte.}$$

$$\therefore \text{COE} = \text{cte}$$

$$K = \text{cte.}$$

$$\text{Pero } (XeB)_{medida} = \text{variable y } COXE = \frac{COE}{(XeB)_{medida}}$$

lo cual concuerda con lo deducido en el análisis paramétrico realizado, y haría posible que

$$K = (COXE)_{activo} = \text{cte.} \quad (6.7)$$

Esta segunda hipótesis conduciría a que todos los parámetros en los que interviene XeB , x , ó e , no representan con exactitud la biomasa activa, o espesor activo del sistema, por lo que serían parámetros ficticios. No obstante, dado que no se ha medido la biomasa activa, el análisis biocinético se realiza con los parámetros medidos, pero teniendo en cuenta esta posibilidad de cara a la obtención de resultados.

Aplicando lo ya expuesto, se obtienen los siguientes resultados:

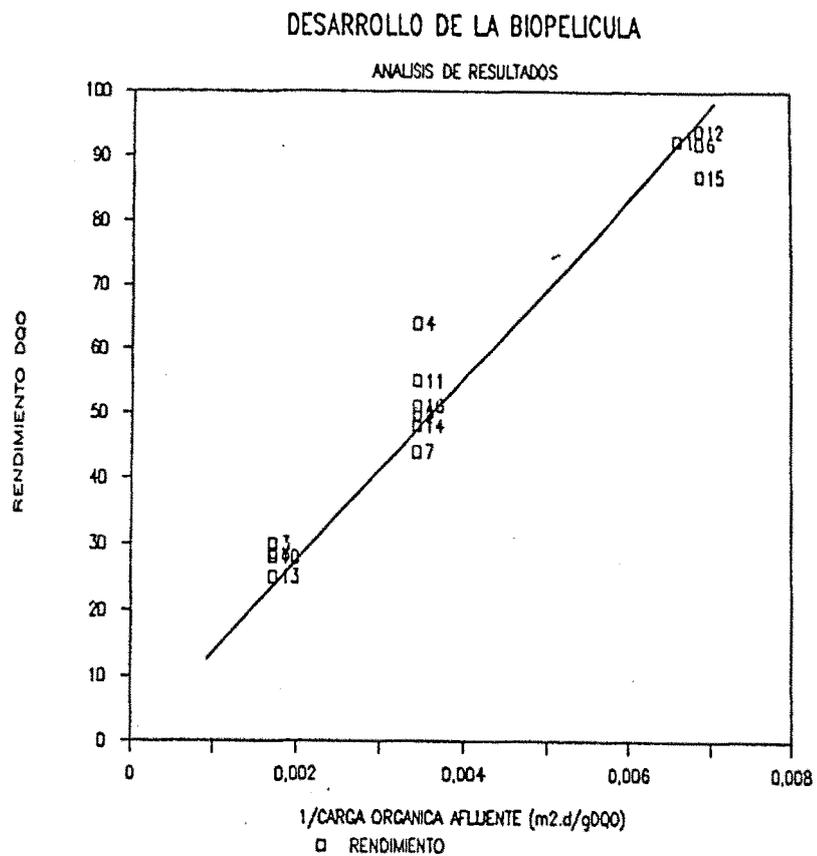
$$\text{RENDQO} = \frac{S_o - S}{S_o} = \frac{K \cdot XeB}{CH} \frac{1}{S_o} = \frac{K \cdot XeB}{COA} = \text{cte.} \quad (6.8)$$

Así, teóricamente el rendimiento es inversamente

proporcional a la COA. Del análisis paramétrico se dedujo una relación potencial con exponente -0,88, muy próximo al -1 teórico. A la vista de este resultado se ha representado el rendimiento frente al inverso de COA, gráfica BC-1, ajustándose una recta cuya expresión es:

$$\text{RENDQO} = \frac{b}{\text{COA}} \quad (6.9)$$

Con lo que se obtiene: $K.XeB = b$



Gráfica BC-1

La ecuación resultante es:

$$\text{RENDQO} = 149,38 \cdot \frac{1}{\text{COA}} \quad (6.10)$$

También se deduce teóricamente que el rendimiento de eliminación de sustrato es inversamente proporcional a la concentración de sustrato afluente para una carga hidráulica fija. Esto, en el análisis paramétrico, se ha ajustado con rectas dada la escasez de valores disponibles, pero ya se ve que en realidad correspondería a hipérbola.

Por otra parte, la carga orgánica específica eliminada (COXE), es:

$$\text{COXE} = \frac{\text{COE}}{X_e B} = K \quad (6.11)$$

Es decir, la COXE define la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos. Del análisis paramétrico se dedujo que el rendimiento era prácticamente independiente de COXE pero que sin embargo COXE parecía muy influenciado por el caudal de suministro de oxígeno.

La dependencia de la concentración de sustrato efluente, S, respecto a la carga orgánica afluente, puede

verse que es de la siguiente forma:

$$S = S_0 - \frac{K.XeB.S_0}{COA} \quad (6.12)$$

o bien,

$$S = S_0 - \frac{K.XeB}{CH} = \frac{COA}{CH} - \frac{K.XeB}{CH} \quad (6.13)$$

Dada la constancia de $K.XeB$ se puede obtener una hipérbolica de S con COA para un valor tipo de S_0 , mientras que el análisis paramétrico aproximó dicha relación por líneas rectas.

Si embargo la dependencia de S respecto a COA , para valor constante de la carga hidráulica (CH), sí es lineal, tal como quedó ajustado en el análisis paramétrico realizado.

De este análisis biocinético realizado se deduce la importancia de conocer los factores que influyen en el valor de $COE = K.XeB$, o de $COXE = K$.

En el análisis paramétrico ya se dedujo que

$$COE = 129,7 + 0,06.COA, \text{ y} \quad (6.14)$$

$$COE = 91 + 79,5.N/No \quad (6.15)$$

Y respecto a COXE se obtuvo que es más o menos constante para cada caudal de suministro de oxígeno, y que:

$$\text{COXE} = \frac{282,6}{\text{XeB}^{1,097}} \quad (6.16)$$

En el intento de estudiar los factores que inciden sobre estos parámetros, se han relacionado COE (o RENDQO.COA) con S (gráfica BC-2), So (gráfica BC-3), y QOz (gráfica BC-4), así como COXE con QOz (gráfica BC-5). Se observa la no influencia de S y So sobre COE. Por el contrario, se detecta una ligera influencia del caudal de oxígeno junto con la carga hidráulica sobre el COE. Análogamente se aprecia también una influencia pequeña del caudal de oxígeno sobre la COXE.

Las relaciones obtenidas son:

$$\text{COE} = 106,67 + 156,34.QOz; \text{CH} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

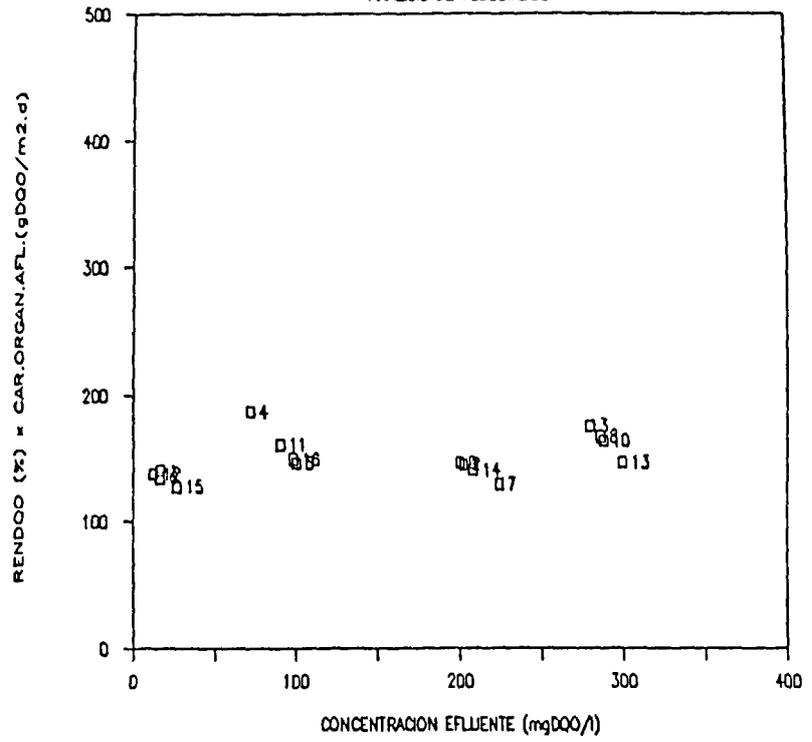
$$\text{COE} = 44,72 + 599,38.QOz; \text{CH} = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$\text{COXE} = -0,712 + 7,71.QOz$$

Con coeficientes de correlación de 0,48; 0,867 y 0,717, respectivamente. En la última expresión no se ha considerado el experimento 1.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

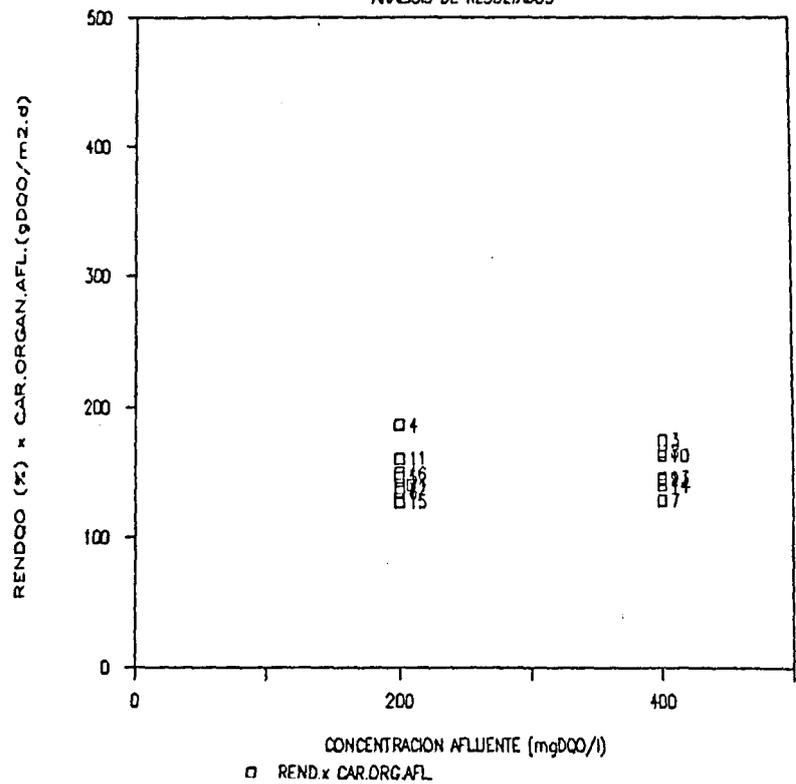


Gráfica BC-2

Gráfica BC-3

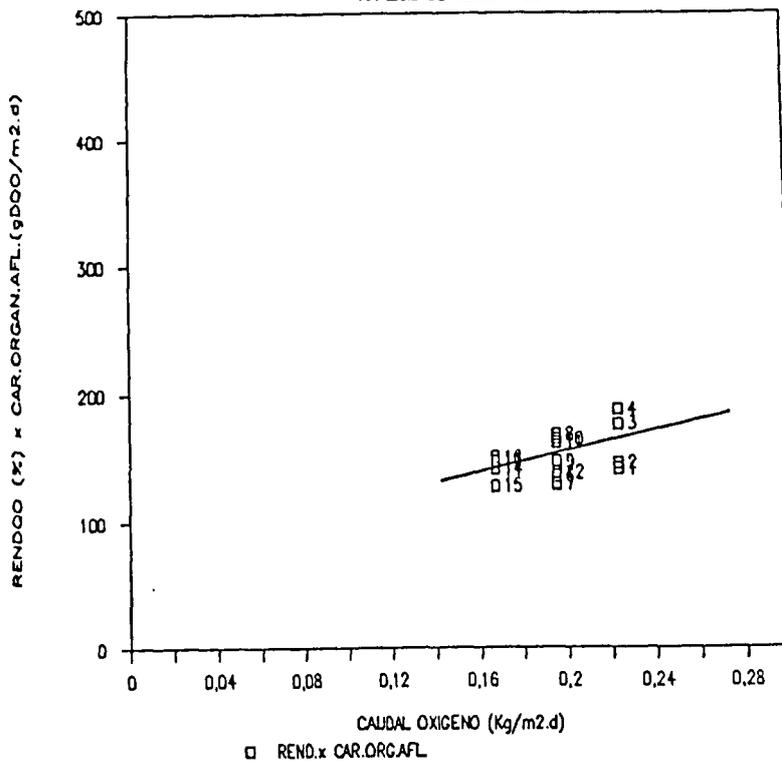
DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS

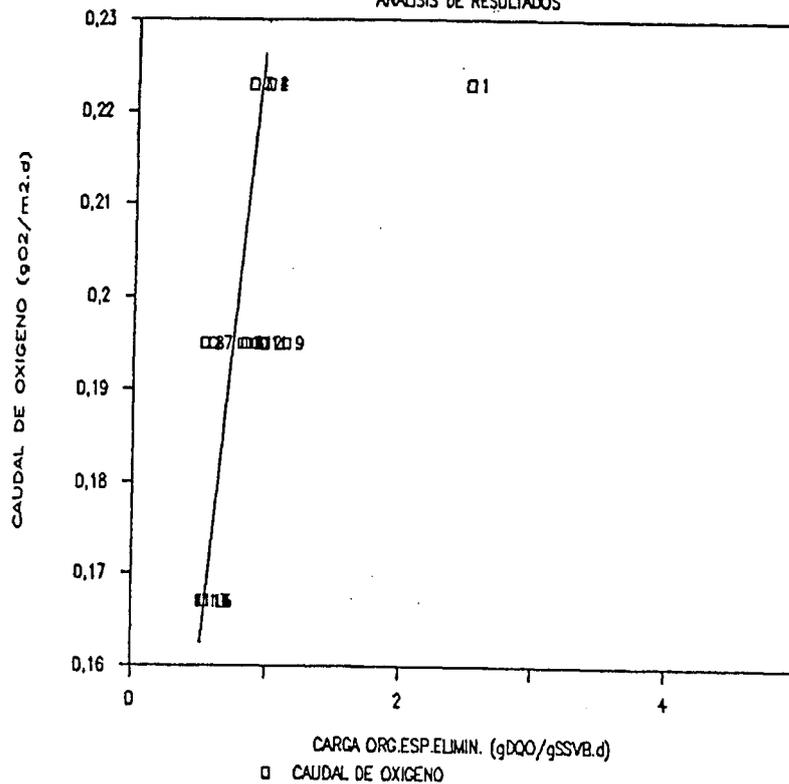


Gráfica BC-4

Gráfica BC-5

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



6.3.2.- Crecimiento de la Biomasa.

Aplicando la expresión de Heukelekian del crecimiento de la biomasa al sistema, se obtiene:

$$Pf = A.e \cdot \frac{dX}{dt} = A.e \frac{dS}{dt} - K_d \cdot X \cdot A.e \quad (6.17)$$

Que dividiendo por A, y sustituyendo por otros parámetros, queda:

$$Pf/A = Y \cdot COE - K_d \cdot X_e B \quad (6.18)$$

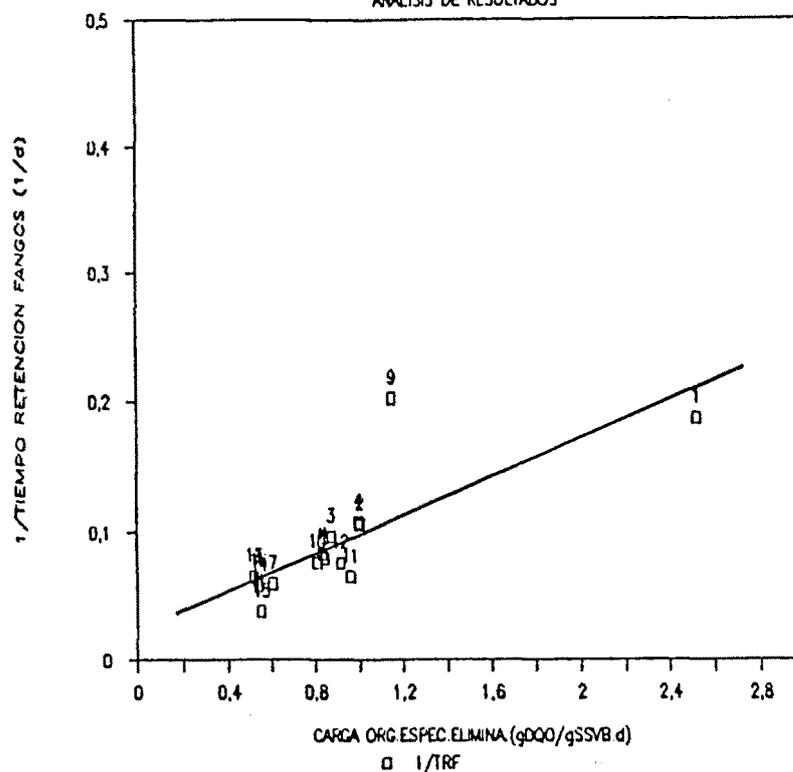
Dividiendo por $X_e B$, y considerando el concepto de tiempo de retención de fangos (TRF),

$$\frac{1}{TRF} = Y \cdot COXE - K_d \quad (6.19)$$

En el análisis paramétrico se había aproximado esta relación con una línea recta entre TRF y COXE. Ahora, representando $1/TRF$ frente a COXE se obtiene la gráfica BC-6.

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



Gráfica BC-6

La ecuación es:

$$1/TRF = 0,0219 + 0,075.COXE \quad (6.20)$$

De donde se obtienen los valores siguientes:

$Y = 0,075 \text{ (gDQO/gSSVB)} =$ Coeficiente de producción de biomasa máximo.

$K_d = - 0,0219 \text{ (d}^{-1}\text{)} =$ Coeficiente de descomposición endógena.

Como se ve, se obtiene un valor negativo para la tasa de respiración endógena, lo cual es absurdo. Esto quizás pueda ser explicado por el hecho de que no se ha llegado al régimen estacionario de crecimiento de la biopelícula en todos los experimentos. Este hecho puede verse al relacionar el incremento de biomasa en la biopelícula en todos los experimentos frente a los sólidos arrastrados por el efluente del proceso. Se puede ver que sólo en algunos experimentos se llegó al estado estacionario, es decir, incremento nulo de la biopelícula. Gráficas BC-7, BC-8 y BC-9.

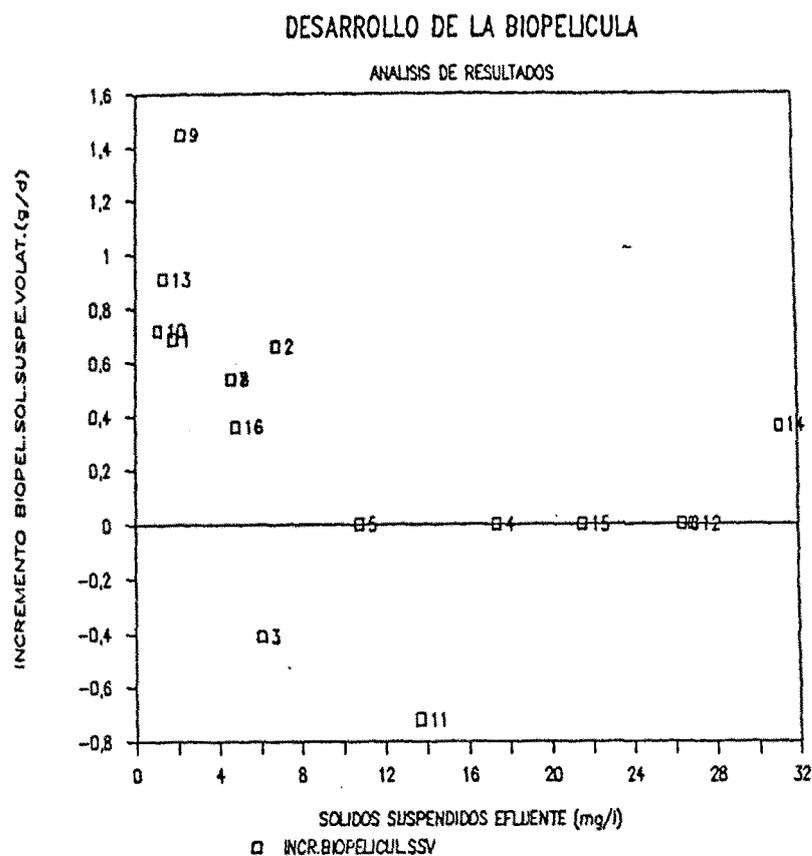
También es interesante comprobar cual fué la acumulación de biopelícula a lo largo de cada experimento. Puede verse como la historia de la biopelícula y la carga y la carga a la que se le somete incide en el sentido de la acumulación (positiva o negativa).

Para entender este fenómeno, hay que tener en cuenta que la variación de la biomasa presente en el sistema, se traduce en crecimiento de la biopelícula y en sólidos en el efluente, es decir:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{crecimiento}} + \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{Sseflu.}} \quad (6.21)$$

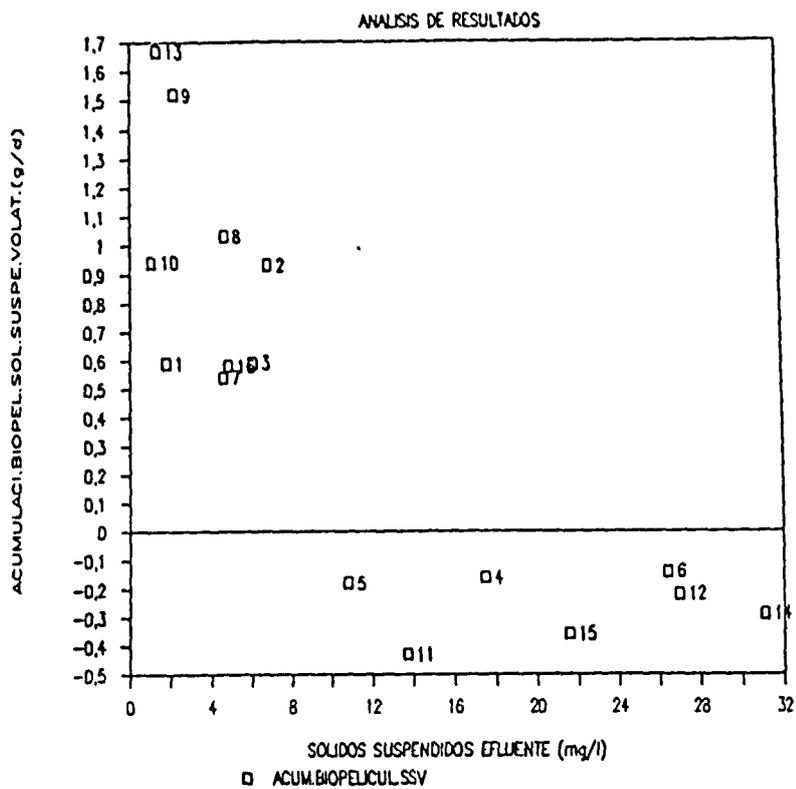
Para el estado estacionario $\left(\frac{dX}{dt}\right) = 0$, por lo tanto:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{Ssefluente}} \quad (6.22)$$



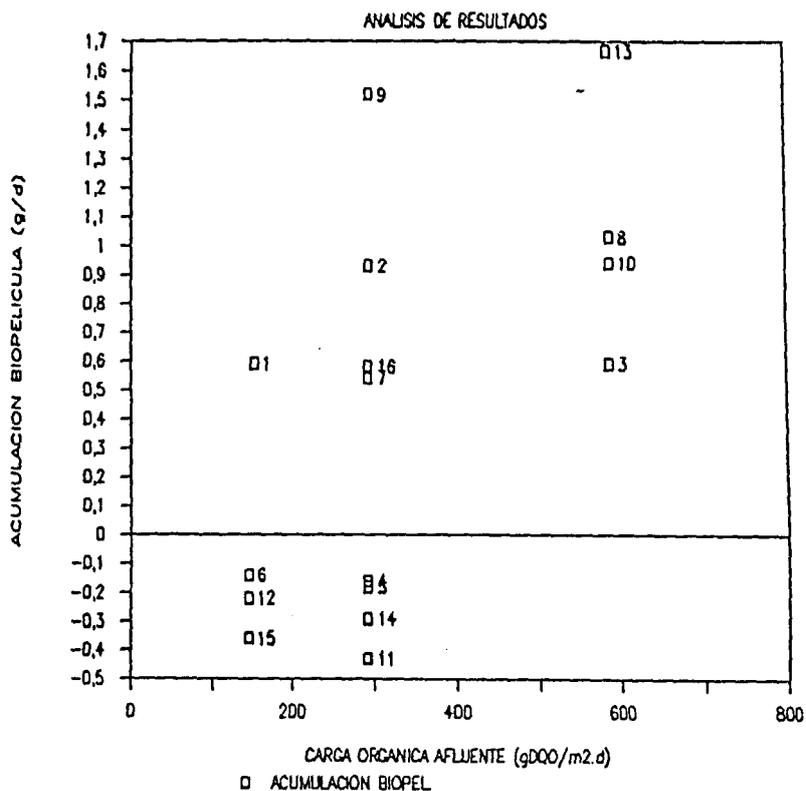
Gráfica BC-7

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA



Gráfica BC-8

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA



Gráfica BC-9

6.3.3.- Consumo de Oxígeno

El consumo de oxígeno (CO) del sistema puede ser calculado en base a la velocidad de consumo de oxígeno de la biomasa:

$$CO = e.A \frac{dO_2}{dt} = \left[a. \frac{dS}{dt} + b.x \right] e.A \quad (6.23)$$

Dividiendo por A, y sustituyendo por los correspondientes parámetros, se obtiene:

$$TCO' = a.CO_E + b.Xe_B \quad (6.24)$$

Dividiendo por Xe_B , resulta:

$$TCO(X) = a.CO_{XE} + b \quad (6.25)$$

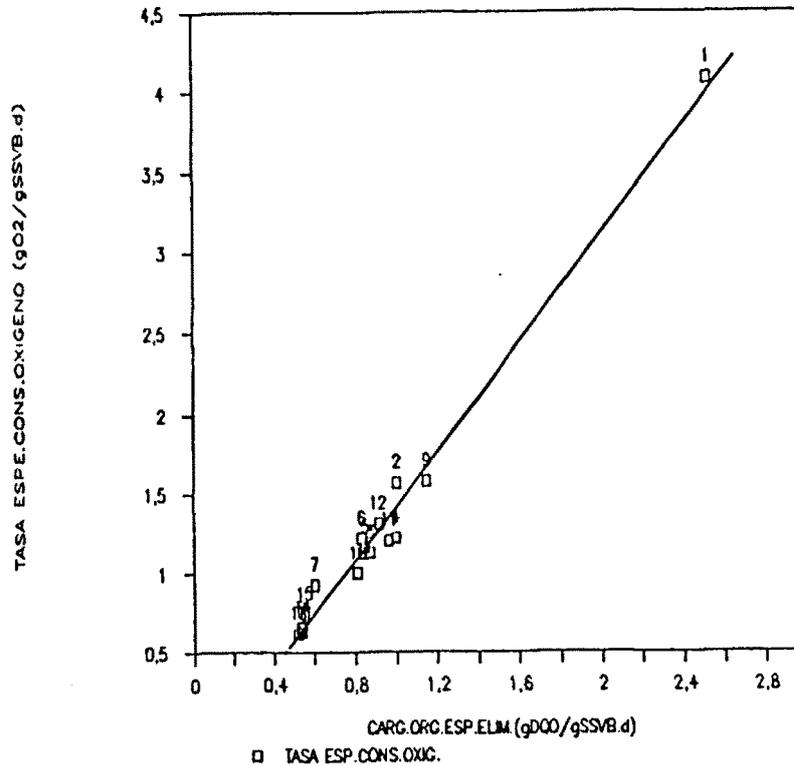
La relación de parámetros se representa en la gráfica BC-10.

La ecuación resultante es:

$$TCO(X) = -0,2628 + 1,687.CO_{XE} \quad (6.26)$$

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA

ANALISIS DE RESULTADOS



Gráfica BC-10

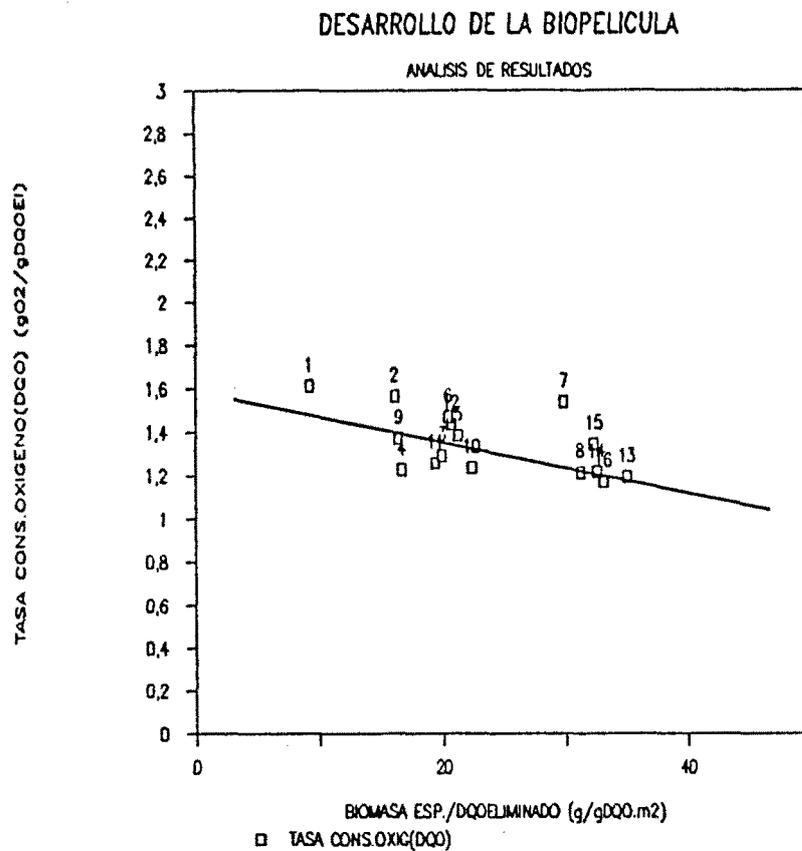
Se vuelve a obtener un valor negativo del coeficiente de consumo de oxígeno por respiración endógena (y de bajo valor absoluto), que podría quedar explicado por el hecho de no haber alcanzado el estado estacionario en todos los experimentos para el crecimiento de la biopelícula, así como por las posibles afecciones de la nitrificación - desnitrificación habidas en el sistema.

En cualquier caso, se demuestra la dependencia de

COXE respecto a la TCO(X), tal como ya se dedujo en el análisis paramétrico. Es decir,

$$\text{COXE} = 0,17 + 0,58.TCO(X) \quad (6.27)$$

Expresión que tiene importancia de cara al estudio de los factores que inciden sobre COE y COXE.



Gráfica BC-11

6.3.4.- Biomasa presente:

De la ecuación (6.27), resulta:

$$XeB = \left[\frac{1}{b} TCO(DQO) - \frac{a}{b} \right] COE \quad (6.28)$$

Como en el análisis de resultados COE fue prácticamente constante, la ecuación (6.28), se puede representar:

$$XeB = k_1 \cdot TCO(DQO) - k_2 \quad (6.29)$$

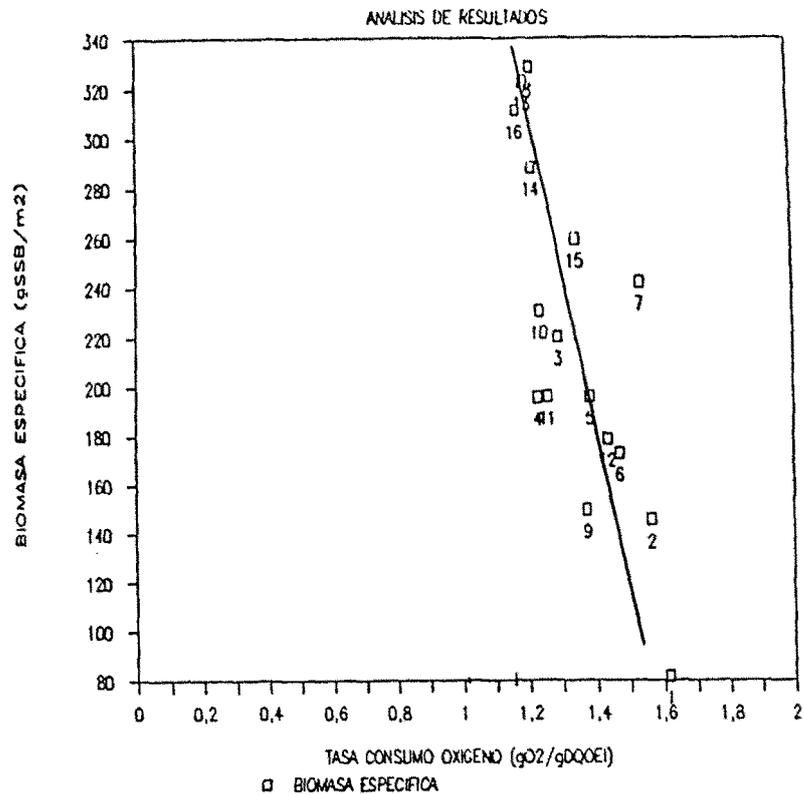
$$\text{Siendo } k_1 = \frac{COE}{b} ; \text{ y } k_2 = \frac{a \cdot COE}{b}$$

Si embargo, relacionando XeB con TCO(DQO), gráfica BC-12, se puede ajustar una recta pero con la siguiente expresión:

$$TCO(DQO) = 1,682 - 0,00152 \cdot XeB \quad (6.30)$$

Lo cual, aparentemente, está en contradicción con

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA



Gráfica BC-12..

la teoría expuesta. Según este resultado, la biomasa presente disminuye al aumentar el suministro de oxígeno, si se mantiene constante la COE.

Por otra parte, en el análisis de resultados (gráfica 42), se obtuvo:

$$XeB = 221,1.TCO(DQO)^{-0,74} \quad (6.31)$$

La biomasa específica es el producto del espesor

por la densidad de la biopelícula.. Es decir:

$$X_eB = \langle \text{ESP.BIOP} \rangle \langle \text{DENSIDAD} \rangle \quad (6.32)$$

Y considerando la relación entre espesor y densidad, se obtiene

$$X_eB = 37.197,6 \cdot \text{ESP.BIOP}^{1,1263} \quad (6.33)$$

De las relaciones conocidas por el análisis de resultados, se puede ver de qué factores dependen la densidad y el espesor de la biopelícula presente:

$$\text{DENSIDAD} = 133,637 - 26,47 \cdot \text{TCO}(\text{DQO}) \quad (6.34)$$

$$\text{DENSIDAD} = 121,278 - 116,58 \cdot \text{TCO}' \quad (6.35)$$

$$\text{DENSIDAD} = 103,33 - 4,358 \cdot \text{TCO}(X) \quad (6.36)$$

$$\text{DENSIDAD} = 100,83 - 170,88 \cdot \text{CRE} \quad (6.37)$$

$$\text{DENSIDAD} = 37197,6 \cdot \text{ESP.BIOP}^{0,1263} \quad (6.38)$$

$$\text{COXE} = 12.357 \cdot \text{ESP.BIOP}^{-1,26} \quad (6.39)$$

$$\text{COXE} = 8,84 - 0,0812 \cdot \text{DENSIDAD} \quad (6.40)$$

Desde un punto de vista teórico el espesor de la biopelícula será función del caudal de oxígeno, de la carga orgánica afluente y eliminada, y de la concentración de sustrato afluente.

Además, se observó que tanto la X_{eB} , densidad y espesor varían linealmente con la COA para cada valor fijo de QO_2 .

6.3.5.- Análisis final

A lo largo del análisis realizado se ha deducido la importancia que tiene para explicar el funcionamiento del proceso los valores de $COE = K.XeB$ y $COXE = K$.

Como resumen de todo lo visto, se puede deducir que COE, aunque ha producido valores en un rango muy estrecho, parece estar influenciado por COA (con dependencia lineal creciente), y por N/No , en el sentido de obtener mayores valores de COE para menores rendimientos de eliminación de nitrógeno.

Según esto, para la finalidad del estudio, es decir, obtención de la máxima eliminación de sustrato carbonáceo, es preferible trabajar con altas cargas orgánicas afluentes y mínimas reducciones de nitrógeno. Además, ya se vió que el rendimiento de eliminación de nitrógeno para ciertas condiciones, $So = cte$, era inversamente proporcional a la COA, lo cual englobaría en un solo factor lo expuesto anteriormente. Y también que el rendimiento de eliminación de nitrógeno era directamente proporcional a la cocentración de sustrato, bien carbonáceo o nitrogenado (dado que en nuestro

caso ha existido proporcionalidad entre los mismos).

Por lo tanto, bajo las presentes condiciones experimentales, la máxima eliminación de materia orgánica se puede obtener para los máximas valores de COA y S_0 (N_0), o bien, máxima COA con mínimo valor de la carga hidráulica, lo cual previsiblemente producirá mínimos rendimientos de eliminación de nitrógeno.

Por otra parte, $COXE = K$ (Tasa máxima de utilización del sustrato por los microorganismos), se vió que era inversamente proporcional a la biomasa presente XeB , y directamente proporcional al caudal de suministro de oxígeno QO_2 ó TCO' . Esta doble dependencia ha quedado englobada en la dependencia de COXE frente a la tasa específica de consumo de oxígeno por la biomasa $TCO(X) = TCO'/XeB$. También se ha deducido la proporcionalidad inversa de COXE frente al espesor y densidad de la biopelícula.

En resumen, COXE está influido fundamentalmente por dos factores: TCO' y XeB . Puesto que TCO' es un parámetro del sistema controlable voluntariamente, la biomasa presente se convierte en el parámetro fundamental. Así, se han estudiado los factores que inciden sobre la biomasa presente.

Se ha observado que tanto la biomasa XeB como su

espesor y densidad son inversamente proporcionales a las tasas de consumo (TCO', TCO(DQO) y TCO(X), y directamente proporcionales a la carga orgánica afluente.

En definitiva, el aumento de la aportación de oxígeno parece disminuir la densidad y espesor de la biopelícula, y en consecuencia la biomasa presente. Esto hace que la $TCO(X) = TCO'/X_eB$ aumenta al aumentar la TCO', lo que trae como consecuencia un crecimiento importante de COXE (= a + b.TCO(X)).

Teóricamente, podría deducirse el valor de COE a partir del valor de TCO', puesto que:

$$COE = COXE.X_eB = 0,17.X_eB + 0,58.TCO'; \text{ y}$$

$$X_eB = 1.106,6 - 657,9.TCO'/COE$$

6.4.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Tomando como base los resultados obtenidos en el presente estudio, en este apartado se expone una forma de determinar los elementos y parámetros necesarios para efectuar el diseño de un RSP.

El procedimiento a emplear es el empírico, y como se ha mencionado, se hace a partir de los resultados obtenidos en este estudio. Bien es cierto que este procedimiento necesita de una gran muestra de datos experimentales, y los que aquí se utilizan se pueden considerar insuficientes. No obstante, resulta interesante intentar este, más bien llamado, prediseño.

Los parámetros y elementos básicos para realizar el diseño de un RSP son:

- Superficie de las membranas.
- Volumen del tanque.
- Aportación de oxígeno.
- Producción de fangos.

6.4.1.- Superficie del Soporte y Volumen del Reactor

Es el parámetro fundamental a determinar. Además de influir en el volumen del reactor a través de la relación volumen-área, en nuestro caso tiene una gran incidencia sobre la economía del sistema. Baste decir que las membranas empleadas en este estudio, (22x22 cm.), tenían un coste de 12.000 pesetas (año 1989).

El procedimiento que aquí se describe, es empírico y utiliza la información obtenida en este estudio.

Del análisis biocinético en su apartado 6.3.1, se toma la Ec. 6.10, que refiere la relación RENDQO-COA:

$$\text{RENDQO} = 149,38 \cdot \frac{1}{\text{COA}}$$

De esta ecuación se deduce que para RENDQO = 1 la COA será de 149,38 gDQO/m².d, y que para COA mayor el rendimiento disminuye. Se puede fijar un rendimiento y determinar la COA correspondiente.

Conociendo COA, se puede conocer la superficie del

soporte a la cual se le dará la forma geométrica más adecuada.

El volumen del reactor quedará fijado por la última consideración hecha, es decir, la forma geométrica adoptada para el soporte y sus dimensiones establecerán el valor del volumen del reactor. Para los biodiscos la relación volumen-área se establece en un valor máximo de $4,9 \text{ l/m}^2$, a partir del cual se considera no se obtiene ninguna mejora en el tratamiento.

6.4.2.- Aportación de Oxígeno

Del análisis biocinético en su apartado 6.3.1, y de las relaciones obtenidas entre COE-QO₂, se pueden determinar los dos caudales de oxígeno para las dos cargas hidráulicas experimentadas. Las relaciones antedichas responden a las ecuaciones:

$$\text{COE} = 106,67 + 156,34.QO_2; \text{CH} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$\text{COE} = 44,72 + 599,38.QO_2; \text{CH} = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

El uso de estas ecuaciones nos permitirá tener un rango de valores de los cuales se puede elegir el más conveniente para el caso práctico planteado.

No obstante, hay que decir que el TCO' tiene en este proceso una limitación física debida al punto de burbuja de la membrana empleada. Por otra parte, la limitación biológica se fija por la estequiometría.

Del apartado 6.3.3, se toma la ecuación 6.26, y de esta forma se puede conocer el TCO(X).

$$\text{TCO}(X) = -0,2628 + 1,687.\text{COXE}$$

6.4.3.- Producción de Fangos

En este apartado se diferenciará entre "crecimiento de biomasa" y "biomasa presente".

El proceso estudiado introduce la novedad de poder conocer aproximadamente el espesor de la biopelícula para la carga orgánica aplicada.

6.4.3.1.- Crecimiento de la biomasa.

Del análisis biocinético en su apartado 6.3.1, se extrae la relación entre COXE y QO₂, cuya ecuación es:

$$\text{COXE} = -0,712 + 7,71 \cdot \text{QO}_2$$

Conocido el valor de COXE, se puede aplicar la ecuación 6.16 para conocer la biomasa específica:

$$\text{COXE} = \frac{282,6}{\text{XeB}^{1,097}}$$

Conocida la biomasa específica se puede, por medio de la ecuación 6.30 determinar TCO(DQO) que, por otra parte, ya se podía haber conocido por el análisis hecho, y en ese caso ser la incógnita XeB.

Del apartado 6.3.2, Ec. 6.20, se determina el tiempo de retención de fangos y de la Ec. 6.18, la producción de fangos.

$$\frac{1}{TRF} = 0,0219 + 0,075.COXE$$

$$\frac{1}{TRF} = \frac{Pf/A}{XeB}$$

6.4.3.2.- Biomasa presente.

Del análisis biocinético en su apartado 6.3.4, se toman las ecuaciones que nos permiten conocer de forma aproximada el espesor y la densidad de la biopelícula presente.

Se cuenta con un buen número de ecuaciones que permiten dicha deducción. Aquí elegiremos algunas, teniendo

en cuenta que el uso de las demás no está condicionado por ningún criterio distinto al que ahora se aplica.

La Ec. 6.36 nos permite conocer la densidad de la biopelícula, y la 6.32, el espesor:

$$\text{DENSIDAD} = 103,33 - 4,358.TCO(X)$$

$$XeB = \text{ESP.BIOP.} \times \text{DENSIDAD}$$

6.4.4.- Caso Práctico:

Para este ejemplo se fijan las condiciones del afluente y efluente, en función de los resultados obtenidos en el estudio presente.

Determinar el área de la superficie soporte necesaria para obtener un efluente con las siguientes características de calidad:

15 mg/l DQO durante todo el año.

El caudal medio de aguas a tratar es de 10 l/s (864 m³/d), y su DQO es 200 mg/l.

Rendimiento DQO = 94%

Aplicaremos sucesivamente las ecuaciones elegidas en los apartados anteriores.

$$\text{COA} = 158,9 \text{ gDQO/m}^2\cdot\text{d}$$

$$A = 1087,5 \text{ m}^2$$

$$\text{COE} = 147 \text{ gDQO/m}^2\cdot\text{d}$$

Si la forma geométrica adoptada es cilíndrica,

entonces en función de la relación diámetro/longitud, se adaptaría al terreno de la forma más conveniente, y aplicando:

$d.l = 1.087,5/\pi.n$; siendo n: el número de cilindros, horizontales o verticales. Por ejemplo: 693 tubos cilíndricos de 50 m. de longitud, y 0,01 m. de diámetro:

El volumen ocupado por los tubos desnudos es de 2,7 m³. Si se supone un espesor máximo de biopelícula de 5 mm. y una distancia entre tubos de 1 cm, el volumen ocupado por los tubos con la biopelícula y la distancia entre tubos, es de 25 m³. Aplicando un 30% de margen que abarque el volumen ocupado por los tirantes de las baterías de tubos, la distancia entre éstas y las paredes del reactor, y un sobredimensionamiento por un factor de corrección, el volumen total del reactor es de 34,4 m³.

La relación Volumen total/Area es: 31,6 l/m².

Se cree conveniente investigar la mejor relación Volumen/Superficie para un RSP.

Continuando con el caso práctico planteado, se deduce a continuación el QO₂.

$$QO_2-1 = 0,258 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

$$QO_2-2 = 0,171 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{d}$$

A partir de este momento, se continua deduciendo el resto de parámetros con la consideración 1 ó 2.

$$COXE-1 = 1,277 \text{ gDQOEl/gSSVB} \cdot \text{d}$$

$$COXE-2 = 0,606 \text{ gDQOEl/gSSVB} \cdot \text{d}$$

$$XeB-1 = 137,288 \text{ gSSB/m}^2$$

$$XeB-2 = 270,85 \text{ gSSB/m}^2$$

$$TRF-1 = 8,5 \text{ d}$$

$$TRF-2 = 15 \text{ d}$$

$$Pf-1 = 17,564 \text{ Kg/d}$$

$$Pf-2 = 19,637 \text{ Kg/d}$$

$$TCO(X)-1 = 1,89 \text{ gO}_2/\text{gSSVB} \cdot \text{d}$$

$$TCO(X)-2 = 0,759 \text{ gO}_2/\text{gSSVB} \cdot \text{d}$$

$$TCO(DQO)-1 = 1,47 \text{ gO}_2/\text{gDQOEl}$$

$$TCO(DQO)-2 = 1,27 \text{ gO}_2/\text{gDQOEl}$$

$$\text{DENSIDAD-1} = 95,1 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{DENSIDAD-2} = 100 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{ESP.BIOP.-1} = 1,44 \text{ mm}$$

$$\text{ESP.BIOP.-2} = 2,7 \text{ mm}$$

6.4.5.- Eliminación del Nitrógeno

Como se puede observar en el caso práctico planteado, no se ha pensado en el posible requerimiento de la nitrificación-desnitrificación. La explicación está dada en el apartado 6.3.5, cuando se dice que se pueden obtener mayores valores de COE para menores rendimientos de eliminación de nitrógeno. Es decir, el reactor podría funcionar con valores adecuados a la demanda conjunta: oxidación de la materia orgánica carbonácea, nitrificación y desnitrificación, y con valores de diseño óptimos para la eliminación de la DQO. .

No obstante, siempre se puede recurrir a la ecuación 6.15, para tener en cuenta el fenómeno de la eliminación del nitrógeno.

7.- C O N C L U S I O N E S

7.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en esta investigación, bajo las condiciones experimentales descritas, se pueden resumir en las siguientes:

En una misma biopelícula, sobre el soporte permeable al oxígeno, se ha obtenido eliminación de materia orgánica carbonácea junto con nitrificación del nitrógeno amoniacal y desnitrificación de los nitratos, bien producidos o bien aportados por el afluente.

El proceso estudiado, ha funcionado eliminando una cantidad más o menos constante de sustrato carbonáceo, obteniéndose mayores eliminaciones para mayores valores de la carga orgánica afluente. Pero, a pesar de este hecho, el rendimiento ha resultado inversamente proporcional a la carga orgánica afluente.

Se pueden obtener rendimientos en la eliminación de materia orgánica carbonácea superiores al 90%, para cargas orgánicas afluentes inferiores a $166 \text{ gDQO/m}^2\text{.d.}$, lo cual es cinco veces superior a la carga orgánica máxima de diseño

para la primera etapa de un RBC.

Dentro de los limitados datos obtenidos en el presente trabajo, el rendimiento en eliminación total de nitrógeno, que ha llegado a alcanzar el 47%, parece estar influido directamente por la concentración de materia orgánica carbonácea o nitrógeno amoniacal en el afluente, e inversamente por la carga orgánica afluente y por la carga hidráulica.

La biopelícula desarrollada en el soporte permeable con suministro de oxígeno, ha tenido un alto porcentaje de volátiles (68%-98%), una densidad muy elevada ($87-105 \text{ Kg/m}^3$) similar a los valores máximos alcanzados por Hoehn y Ray (1973) para espesores de biopelícula de 50 a 150 μm , y muy elevados espesores (900-3300 μm) lo cual queda explicado parcialmente por la diferente fuente de aportación de oxígeno. (Aire-oxígeno puro).

La producción de fangos del sistema ha resultado muy baja (0,17 KgSS/KgDQO Eliminado), lo cual ha producido bajos valores de SS en el efluente no decantado del sistema. (25 mg/l).

El caudal suministrado de oxígeno (o TCO'), que

puede ser regulado en el sistema, tiene el efecto al aumentarlo, de disminuir la densidad y espesor de la biopelícula, y por lo tanto, disminuir la biomasa presente. Este hecho tiene el efecto de aumentar la carga orgánica específica eliminada por unidad de microorganismos (COXE), o relación alimento /microorganismos (F/M); aunque este puede ser un resultado aparente, dada la no distinción entre biomasa presente y biomasa activa.

La cantidad de materia orgánica eliminada por el sistema, depende directamente de la carga orgánica afluente y de la tasa de consumo de oxígeno, e inversamente del rendimiento de eliminación de nitrógeno.

Las tasas de consumo de oxígeno han resultado comparables a las de otros procesos con oxígeno (TCO(X) $0,62 \pm 1,58$; TCO(DQO) $1,17 \pm 1,61$), pero este proceso consigue maximizar el rendimiento de utilización de oxígeno (100%), frente al proceso de fangos activos con oxígeno (80-90%). Tejero, 1979.

Se han detectado anomalías en la determinación de las constantes biocinéticas relativas al crecimiento de la biomasa y al consumo de oxígeno, que pueden ser debidas a la no consecución en todos los experimentos del estado

estacionario del crecimiento de la biopelícula; a la posible constancia de la biomasa activa frente a la variabilidad de los sólidos de la biopelícula; a los fenómenos de nitrificación-desnitrificación existentes en la biopelícula; a la posible existencia de fenómenos anaerobios de degradación de la materia orgánica en la capa exterior de la biopelícula; y a las pérdidas de sólidos en el mantenimiento del sistema.

Del análisis biocinético y paramétrico realizado, se ha obtenido un procedimiento de diseño aplicable al reactor de soporte permeable (RSP).

Aunque el Q_{O_2} influye en la COE (muy ligeramente), parece más económico hacer funcionar el sistema con bajos valores de Q_{O_2} para obtener rendimientos prácticamente iguales. Quizás el peligro reside en crear biopelículas de gran espesor que pudieran llegar a dar problemas de funcionamiento. Estos problemas podrían controlarse aumentando el caudal de oxígeno como medida de explotación.

Se han dado las condiciones para que se haya producido el efecto de desprendimiento masivo de la biopelícula descrito por Pano y Middlebrooks (1983), pero con carga afluente de $34 \text{ gDQO/m}^2 \cdot \text{d}$, que quedará explicado por la

diferente fuente de suministro de oxígeno.

La biopelícula tiene una capacidad de recuperación muy alta. Después de haber sufrido el desprendimiento masivo y con el aporte de la carga orgánica y oxígeno necesarios, en 24 horas se había desarrollado una consistente y homogénea biopelícula.

8.- BIBLIOGRAFIA

8.- BIBLIOGRAFIA

Absolom, D.F., Lamberty, F.V., Policora ,Z., Zingg, W., Van Oss, C.J. and Neuman, A.W., (1983). Surface thermodynamics of bacterial adhesion. *Appl. Env. Microbiol.*, 46,90.

Amieva, J.J., (1988). "Diseño de una planta piloto para depuración de aguas residuales por el sistema RBC". Tesina de Magister en Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.

Amory, D.E., Genet, M.J. and Rouxhet, P.G., (1988). Application of XPS to the surface analysis of yeast cells. Surface Interface Analysis, 11, 478.

Amory, D.E., Mozes,N., Hermesse, M.P., Léonmard, A.J. and Rouxhet, P.G., (1988). Chemical analysis of the surface of microorganisms by X-ray photoelectron spectroscopy. FEMS Microbiol Letters, 49, 107.

Amory, D.E., Rouxhet, P.G., (1988). Surface properties of *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces carlsbergensis*: chemical composition, electrostatic charge and

hydrophobicity. Biochim. Biophys Acta, 938,61.

Amory, D.E., Rouxhet, P.G. and Dufour, J.P., (1988). Flocculence of howery yeasts and their surface properties: chemical composition, electrostatic charge and hydrophobility. J. Inst. Brew., 94-79.

Andrews, G.F. and Tien, C., (1981). Bacterial Film Gorowth in Adsorbent Surfaces, AICHE Journal, Vol. 27, 396-403.

APHA-AWWA-WPCF; (1985). "Standard Methods for the examination of water and wastewater" Edición 16.

Atkinson, B., (1981). (Editor): "Biological fluidised bed treatment of water and waste-water". Ellis Horwood L^{td}, Chichester.

Atkinson, B. and Ali M.E.A.R., (1976). Wetted Area, Slime Thickness, and Liquid Phase Mass Transfer in Packet Bed Biological Film Reactors (Trickling Filters), Trans Inst. Chem. Engr. 54: 239-250.

Atkinson, B. and Daund, I.S., (1968). The analogy between microbiological "reactions" and heterogeneous catalysts Trans. Instn chem Engrs. 46,19.

Atkinson, B. and Davies, I.J., (1974). The overall rate of substrate uptake (reaction) by microbialfilms Part I(a). Biological reaction rate equation. Trans. Insth Chem. Engrs. 52,248.

Atkinson, B. and Fowler, H.W., (1974). "The Significance of Microbial Films in Fermenters". Chap. 6. Advances in Biochemical Engineering. Vol. 3. Ghose., T.K. et al. (eds.) Springer-Verlag. NY. pp. 221-277.

Atkinson, B. and Howell, J.A.,(1975). Slime Holdup, Influent BOD, and Mass Transfer in Trickle Filters, Journal of the Environmental Engineering. Division, ASCE. Vol. 101, 585-605.

Baier, R.E., (1970). "Surface Properties Influencing Biological Adhesion". In Adhesion in Biological Systems, R. Manly ad, Academic Press, New York.

Bakke, R., (1986). "Biofilm detachment", unpublished doctoral dissertation, Montana State University, Bozeman, M.T.

Bakke, R., M.G. Trulear, J.A. Robinson, and W.G. Characklis., (1984). Biotech. Bioeng., 26, 1418-1424.

Beachy, E.H., (1981). Bacterial adherence. The Journal of

Infectious Diseases, 143 (3). 325-345.

Belkhadir, R., (1986). Stude fondamentale des biomasses fixeès. Description et modélisation des films biologiques anaérobies. Thèse de T.D. no. 18, INSA. Toulouse.

Benjes, H.H., (1980). Handbook of Biological Waste-Water Treatment, Garland STPM Press, N.York y Londres.

Bruce, A.M., (1969). Percolating filters, Process Biochem, 4(4) 19-23.

Bryes, J.D. and W.G. Characklis., (1982). Biotech. Bioeng., 24, 2451-2476.

Büchs, J., Mozes, N., Wandrey, C. and Rouxhet, P.G., (1988). Cell adsorption control by culture conditions: Influence of phosphate on surface properties, flocculation and adsorption behaviour of *Corynebacterium glutamicum*. Appl. Microbiol. Biotechnol., 29 119.

Bungay, H.R., W.J. Whalen, and W.M. Saunders., (1969). Biothech. Bioeng. 11, 765.

Busscher, H.J., Weerkamp, A.J., Van der Mei, H.C., Van Pelt,

A.W.J., Dejong, H.P. and Arends, J.,(1984). Measurements of the surface free energy of bacterial cells surfaces and its relevance for adhesion. Appl. env. Microbiol., 48, 980-983.

Cálvez, V., (1988). Etude des phénomènes d'adhésion de micro-organismes sur différents types de membranes modifiées. Dea Ingénierie du Traitement et de l'Épuration des Eaux, INSA Toulouse.

Camilleri, C., (1988). "Startup of fixed film stationary bed anaerobic reactors" in *Anaerobic Digestion 1988*. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna , Pergamon Press. pp.407-412.

Changui, C., Doren, A., Stone, W.E.E., Mozes, N. and Rouxhet, P.G., (1987). Surface properties of polycarbonate and promotion of yeasts cells adhesion. *J. Chim. Phys.*, 84, 275-281.

Characklis, W.G., (1980). *Biofilm Development and Destruction*, Final Report. EPRI CS-1554, Project RP902-1 Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

Characklis, W.G., M.J. Nimmons, and B.F. Picologlou., (1981). *Heat. Transfer. Eng.*, 3,23.

Characklis, W.G., Trulear, H.G., Bryers, J.D., Zolver, N., (1982). Dynamics of biofilm process: methods. Wat. Res. 16, 7, 1207-1216.

Characklis, W.G., N.Zolver, C.H. Nelson, R.O. Lewis, D.E. Dobb, and G.K. Pagenkopf., (1983). "Influence of biofouling and biofouling control techniques on corrosion of copper-nickel tubes", presented at CORROSION/83. Symposium: Corrosion Induced by Bacteria Anaheim, CA.

Chen, Y.S. and Bungay, H.R., (1981). Microelectrode Studies of Oxygen Transfer in Trickle Filter Slimes, Biotechnology and Bioengineering, Vol.23, 781-792.

Christensen, B.E., J. Kjosbakken, and O. Smidsrød., (1985). Appl. Environ Microbiol., 50,837.

Christensen, F.R., Kristensen, G.H. Jansen, J.L.C., (1988). Biofilm structure, an important and neglected parameter in wastewater treatment. Wat. Sci. Tech., Vol. 21, 805-814.

Constantinides, A., Specer, J.L., Gaden, E.L., (1970). Optimization of batch fermentation processes. I. Development of mathematical models for batch penicillin fermentation, Biotechnol. bioengng., 12 803-830.

Cooper, P.F. and B. Atkinson (eds.), (1981). Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater, Ellis-Horwood, Chichester.

Corpe, W.A., (1970). "An Acidic Polysaccharide Produced by a Primari Film Forming Marine Bacterium". Dev. in Micro., Vol. II, 402-412.

Corpe, W.A., (1970). "Attachment of marine bacteria to solid surfaces", in R.S. Manley (ed.) Adhesion in Biological Systems, Academic Press, New York. pp. 73-87.

Damrongsri, M., (1984). Contribution à la modelisation des processus de traitement biologique des effluents. Modèle à effet inhibiteur de YUE. Thèse T.D. n.141. INSA Toulouse.

Daniels, S.L., (1971). "The Adsorption of Microorganisms Onto Solid Surfaces: A. Review". Dev. Ind Microbiol. 13:211-253.

De Souza Melo, H., (1984). Contribution à la modélisation des processus de traitement biologique des effluents. Isolement et identification des métabolites inhibiteurs de la croissance bactérienne, II. Etude des inhibiteurs. Thèse de T.D. n.139, INSA. Toulouse.

De Souza Melo, J.L., (1984). Contribution à la modélisation

des processus de traitement biologique des effluents.
Isolement et identification des métabolites inhibiteurs de la
croissance bactérienne: I. Isolement des inhibiteurs. Thèse
de T.D. n.140, INSA. Toulouse.

Dexter, S.C., J.Coll., (1979). Int. Sci., 70, 346.

Dexter, S.C., Sullivan, J.D., Williams III, J. and Walson,
S.W., (1975). "Influence of Substrate Wettability on the
Attachment of Marine Bacteria to Various Surfaces". Appl.
Microbiol 30:29 8-308.

Eckenfelder, W., (1980). "Principles of water quality
management". Ed. CBI Publishing Company, Inc.

Fletcher, M., (1977). Attachement of marine bacteria to
surfaces. Microbiology, 407-410.

Fletcher, M., (1980). Adherence of marine micro-organisms to
smooth surfaces. Bacterial Adherence, Beachy E.H. (ed.)
Chapman et Hall. London.

Fletcher, M., in E.H. Beeachey, (ed.). (1980). Bacterial
Adherence, Chapman & Hall, pp. 347-374. London.

Fletcher, M. and Floodgate, G.D., (1976). "An Electron

Microscope Demonstration of an Acidic Polysaccharide Involved in the adhesion of a Marine Bacterium to Solid Surfaces". J. Gen. Microbiology, 74:325-334.

Fletcher, M. and Floodgate, G.D., (1976). "The Adhesion of Bacteria to Solid Surfaces". In Microbial Ultrastructure, R. Fuller and D.W. Fuller and D.W. Loveluck (eds.), Academic Press, New York.

Fletcher, M. and Poringle, J.H., (1985). The effect of surface free energy and medium surface tension on bacterial attachment to solid surfaces. J. Colloid Interface Sci.,104, 5-14.

Ford, D.L., Gloyna, E.F., and Yang, Y.T., (1967). "Development of Biological Treatment Data for Chemical Wastes", Proceedings of the 22 nd Industrial Waste Conference, Purdue University, Lafayette, Indiana, Ext. Series 129, pp292-309.

Gerson, D.F.,(1981). Methods in surface physics for immunology. Immunological methods, Vol.II, 105. Academic Press.

Good, R.J., (1979). Contact angles and the surface free energy

of solids, in: R.J. Good and R.R. Stromberg (eds.), Surfaces and Colloid Science, Vol.11, Plenum, pp.1-30.

Hamoda, M.F., Abd-El-Bary, M.F., (1987). Operating characteristics of the aerated submerged fixed-film (ASFF) bioreactor. Wat. Res. 21 (8), 939-947.

Harremoës, P., (1978). Biofilm Kinetics. In: Mitchell R. (ed): Water Pollution Microbiology, Vol.2, 82-109, John Wiley & Sons, New York.

Harris, N.P. and Hansford, G.S., (1976). A study of substrate removal in a microbial film reactor, Water Res. 10, 935-943.

Hattori, R. and Hattori, T., (1985). Adsorptive phenomena involving bacterial cells and an anion exchange resin. J. Gen. Appl. Microbiol., 31,147.

Hattori, R. and Hattori, T., (1987). Interactions of microorganisms with a charged surface: a model experiment. Report. Inst. Agricultural Research, Tohoku University, Sendai, Japan, 36,21.

Heijnen, J.J., et al. ,(1986). Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in anaerobic treatment. A

Grown-up Technology Water Treatment Conference, 15 papers, pp. 159-173.

Hendricks, C.W., (1975). "Sorption of Heterotrophic and Enteric Bacteria to Glass Surfaces in the Continuous Culture of River Water". *Appl. Microbiol.* 25:572-528.

Hermesse, M.P., Deveppe, C., Bartholome, Y. and Rouxhet, P.G., (1988). Immobilization of *Acetobacter aceti* by adhesion. *Can. J. Microbiol.*, 34, 638.

Hernández, M., (1987). Caractérisation physico-chimique de membranes UF. Application à la filtration d'eau résiduaire urbaine. DFA Ingénierie du Traitement et de d'Épuration des Eaux, INSA Toulouse.

Hernández Muñoz, A., (1990). Depuración de aguas residuales. *Colec. Señor*, pag. 667-676.

Hernández, M., Calvez, V., Capdeville, B., Aurelle, Y., Vidard, V., (1989). Fundamental study of the interactions between micro-organisms and plastic support. Poster presented at the Congress IAWPRC-CFRP-AGHTM. Technical Advances in Biofilm Reactors, 4-6, Avril, Nice. France.

Hoehn, R.G. and A.D. Ray, J., (1973). *Wat. Poll. Cont. Fed.*

46, 2302.

Howell, J.A. and Atkinson, B., (1976). "Sloughing of Microbial Film in Trickling Filters". Water Research, No.4.

Howell, J.A. and Atkinson, B., (1976). Influence of Oxygen and Substrate Concentrations on the Ideal Film Thickness and the Maximum Overall Substrate Uptake Rate in Microbial Film Fermenters, Biotechnology and Bioengineering. Vol.18, 15-35.

Huang, J.Ch. and Bates V.T., (1980). Comparative performance of rotating biological contactors using air and pure oxygen. Journal WPCF, vol.52, no. 11, 2686, 2703.

Itamunoala, G.F., (1987). Biotechnology Prog., 3, 115-120.

Jacome Burgos, Juan Alfredo., (1990). Evaluación Preliminar del Funcionamiento de la Biopelícula en un Reactor de Soporte Permeable.(RSP). (Tesina para obtener el grado de Magister en Ciencias y Tecnicas del agua y del Medio Ambiente).

James, A.M., (1982). The electrical properties and topochemistry of bacterial cells. Adv. Colloid and Interface Sci. 15. 171.

Jann, K. and Jann, B., (1977). "Bacterial polysaccharide

antigens, in I.W. Sutherland (ed.), Surface carbohydrates of the Procaryotic Cell". Academic Press, New York, p.247.

Jenkins, D., (1963). Sewage treatment. Cap. 15 en Biochemistry of Industrial Micro-organisms. Eds. Rainbow, C. y Rose, A.H., Academic Press, 508-536.

Jensen, R.H. and C.A. Woolfolk., (1985). Appl. Env. Microbiol. 50,364.

Jerris, J.S., Owens, R.W. and Hickey, R.F., (1977). "Biological Fluidized Bed Treatment for BOD and Nitrogen Removal". Jour. Water Pol Control Fed 49:816.

Kenne, L. and B.Lindberg., (1983). "Bacterial polysaccharides", in G.O.Aspinall (ed.) The Polysaccherides, Vol. 2 Academic Press, New York. p.287.

Keshavan, K., Behn, V.C., Ames, W.F., (1964). Kinetics of aerobic removal of organic waste. J.Sanit, Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 90 107-113.

Kornegay, B.H. and J.F. Andrews., (1967). "Characteristics and kinetics of Biological Film Reactors". FWPCA Final Rep. Res. Grant W.P-01181, Dept. Environ. Systems Eng., Clemson

Univ., Clemson S.C.

Kornegay, B.H. and Andrews, J.F., (1968). Kinetics of fixed film biological reactors, J.W.P.C. Fed. 40, 460-468.

Lamblin, G., M. Lhermitte, P. Degard, P. Roussel, and H. Slayter., (1979). Biochimie, 61, 23.

LaMotta, E.J., (1976). Kinetics of growth and substrate uptake in a biological film system. Applied and Environmental Microbiol, 31, 2, 286-293.

LaMotta, E.J., (1976). External Mass Transfer in a Biological Film Reactor, Biotechnology and Bioengineering. Vol.18, 1359-1370.

LaMotta, E.J., (1976). Internal diffusion and reaction in biological films, , Env. Sci. and Technol., 10(8), 765-769.

LaMotta, E.J., and Hickey, R.F., (1980). Factors Affecting Attachment and Development of Biological Films on Solid Media". Proc. First National Symposium/Workshop on Rotating Biological Contactor Technology, II : 803-827.

Li, G.H., (1985). Intrilition des cultures bactériennes par

les acides humiques. DEA Ingénierie du Traitement et de l'Épuration des Eaux, INSA Toulouse.

Loeb, G.I., (1985). The properties of nonbiological surfaces and their characterization. Bacterial Adhesion (Savage, D.C. and Fletcher, M., eds.), Plenum Press, N.Y. and London; Ch. 5, pp 11-129.

Maignan, C., Navarro, J.L. Durand, G., (1974). Activité métabolique de micro-organismes retenus par des supports solides. Oecol Plant. 9 (4). 365-382

Marshall, K.C. (ed.), (1984). Microbial Adhesion and Aggregation, Springer-Verlag, Berlin.

Marshall, K.C., (1985). Mechanisms of bacterial adhesion at solid-water interfaces. Bacterial Adhesion (Savage, D.C. and Fletcher, M. eds.) Plenum Press, N.Y. and London, ch. 6, pp 133-161.

Marshall, K.C., and R.H. Cruickshank., (1973). Arch. Mikrobiol, 91,29.

Marshall, K.C., R.Stout and R. Mitchell, J., (1971). Gen Microbiol, 68, 337-348.

- Matson, J.V. and W.G. Characklis. (1976). *Wat. Res.*, 10, 877.
- McCoy, W.F. and J.W. Costerton. (1982). *Dev. Ind. Microbiol.* 23,441.
- Meadows, P.S., (1971). "The Attachment of Bacteria to Solid Surfaces". *Arch Mikrobiol*, 75:374-381.
- Meadows, P.S., (1971). *Arch Microbiol.* 75, 374-381.
- Metcalf & Eddy., (1986). "Tratamiento y depuración de aguas residuales". Ed. Labor S.A.; 3 Edición.
- Mikkelsen, A., B.T. Stokke, B.E. Chistensen, and A. Elgsaeter., (1985). *Biopolymers*, 24,1983.
- Mozes, N., Léonard, A.J. and Rouxhet, P.G., (1988). On the relations between the elemental surface composition of yeasts and bacteria and their charge and hydrophobicity. *Biochim. Biophys. Acta*, 945, 324-334.
- Mozes, N., Marchal, F., Hermese, M.P., Van Haecht, J.L., Reuliaux, L., Léonard, A.J. and Rouxhet, P.G., (1987). Immobilization of microorganisms interactions. *Biotechnol.*

Bioeng., 30, 439.

Mulcahy, L.T., Shieh, W.K. and LaMotta, E.J., (1981).
Simplified Mathematical Models for Fluidized Bed Biofilm
Reactor, Water - 1980, AICHE Symposium Series, Vol. 77, No.
209, 273-285.

Neumann, A.W., Good, R.J., Hope, C.J. and Sejpal, M., (1974).
An equation of state approach to determine surface tensions
of low energy solids from contact angle. J. Colloid Interface
Sci. 49, 291.

Owens, D.K. and Wendt, R.C., (1969). Estimation of surface
energy of polymers. J. Appl. Pol. Science 13, 1741.

Pano, A., Middlebrooks, E.J. (1983). Kinetics of carbon and
ammonia nitrogen removal in RBC's, Journal Water Pollution
Control Federation, Vol 55, no.7, 956,965.

Paul, J.H. and W.H. Jeffrey., (1985). Appl. Environ.
Microbiol., 50, 431.

Picologlou, B.F., N. Zilver, and Characklis, J., (1980).
"Biofilms Growth and Hydraulic Performance". J. Hydraul. Div.
Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 106-733.

Pipes, D.M., (1974). Variations in Glucose Diffusion Coefficients Through Biological Floc, M.S. Thesis, Rice University Houston, T X.

Poon, C.P.C., Mikucki, M.J., (1979). Factors controlling rotating biological contactor performance. Journal WPCF, Vol. 51, No. 3, 601, 611.

Poon, C.P.C., Chin H.K., Smith, E.D., Mikucki, W.J., (1981). Upgrading with rotating biological contactors for BOD removal. Journal WPCF, Vol.53, No.4, 474, 481.

Poon, C.P.C., Chin H.K., Smith, e.d., Mikucki, M.J., (1981). Upgrading with rotating biological contactors for ammonia nitrogen removal. Journal WPCF, Vol. 53, No. 7, 1158, 1165.

Pringle, J.H. and M. Fletcher., (1983). Appl. Env. Microbiol., 45, 811.

Reumann, G., (1982). Geotextiles: Construction materials in evolution. Proceedings of the second International Conference on geotextiles. Vol. IV. Las Vegas, 10-15.

Richard, J.G., and Kingsburg, R.P., (1973). "Design Considerations Plastic Media Biological Towers", Proceedings

of the 1973 meeting of the West Virginia Water Pollution Control Association, Pipestem, West Virginia, April 26.

Rittmann, B.E., (1982). The effect of shear stress on biofilm loss rate. Biotechnology and Bioengineering, 24, 501-506.

Rittmann, B.E. and McCarty, P.L., (1980). Evaluation of Steady state Biofilm Kinetics, Biotechnology and bioengineering, Vol.22, 2359-2373.

Rittmann, B.E. and McCarty, P.L. (1980). Model of Steady-State-Biofilm Kinetics, Biotechnology and Bioengineering. Vol. 2343-2357.

Rittmann, B.E. and McCarty, P.L., (1980). Design of Fixed-Film Processes with Steady-State Biofilm Model, Progress in Water Technology, Vol.12. (Toronto). 271-281.

Rittmann, B.E. and McCarty., (1981). Substrate Flux into Biofilms of any Thickness, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE. Vol.107, 831-849.

Rittmann, B.E. and McCARTY, P.L., (1981). "Substrate Flux into Biofilms of Any thickness". J. Environ. Eng. Div. (ASCE), 107 (EE4): 831-849.

Rodier, J., (1989). "Análisis de las aguas". Ed. Omega.

Ronzano, E., Gómez Poncela, J.M., (1985). La eliminación del nitrógeno en el tratamiento de aguas residuales por procesos biológicos. T.D.

Rouxhet, P.G., Mozes, N., Hermesse, M.P. and Matta-Ammouri,(1987). Immobilization of microorganisms by adhesion to a support: Influence of physicochemical factors. Proc. 4th European Congress on Biotechnology. (O.M. neijssel, R.R. Van der Meer and K.Ch.A. Luyben, eds.) Elsevier science Publishers b.v., Amsterdam, Vol.2, 193.

Rutter, P.R. and Vicent, B., (1980). The adhesion of microorganisms to surfaces: physico-chemical aspects. In: Microbial adhesion to surfaces (R.C.W. Berkeley, J.M. Lynch, J. Melling, P.R. Rutter and B. Vincent, eds.). Soc. of Chemical Industry-Ellis Horwood Ltd., pp79-92.

Sáez, Muñoz y Celedón., (1985). Department of Hydraulic Engineering Catholic University of Chile, Santiago, Chile.

Sanders, W.M., (1966). 3rd, Int. J. Air Wat. Poll. 10, 253.

Sandford, P.A. and J.Baird., (1983). "Industrial utilization

of polysaccharides", in G.O. Aspinall (ed.). The Polysaccharides, Vol.2. Academic Press, New York, p.24.

Siegrist, H. and W.Gujer., (1985). Water Research, 19, 1369.

Sotton, M., (1981). Différents types de geotextiles Mat riaux et Construction, Vol.14 No.82.

Suidan, M.J., (1986). Perfomance of deep biofilm reactors, J. envir. Engng Div. Am. Soc. civ. Engrs 112, 78.

Suidan, M.T. and Wang, Y.T., (1985). Unified analysis of biofilm Kinetics. J. envir. Engng. Div. Am. Soc. civ. Engrs. 111,634.

Switzenbaum, M.S. and W.J. Jewel, J., (1980). WPCF, 52, 1953.

Symes, K.C., (1982). Carbohydr. Polymers. 2,276.

Szwerinski, H., Arvin, E., Harremoes, P., (1985). pH-decrease in nitrifying biofilms. Wat.Res. Vol. 20, No. 8, 971, 976.

Tadros, T.F., (1980). Particle-surface adhesion. In: Microbial adhesion to surfaces (R.C.W. Berkeley, J.M. Lynch, J. Melling, P.R. Rutter and B. Vincent, eds.). Soc. of

Chemical Industry-Ellis Horwood Ltd. pp.93-116.

Tejero, I., (1979). Incidencia sobre la digestión de lodos de procesos de fangos activos con uso oxígeno puro. T.D. (no publicado).

Timberlake, D.L., Strand, S.E. and Williamson, K.J., (1988). Combined aerobic heterotrophic oxidation, nitrification and denitrification in a permeable-support biofilm. *Wat.Res.* Vol. 22, No. 12, 1513, 1517.

Tomlinson, T.G. and Snaddon, D.H.M., (1966). Biological oxidation of sewage by films of micro-organisms, *Int. J. Air and Water Polln.* 10, 865-881.

Trulear, M.G.,(1983). "Cellular reproduction and extracellular polymer formation in the development of biofilms", unpublished doctoral Thesis, Montana State University, Bozeman. M.T.

Trulear, M.G. and Characklis, W.G., (1980). Dynamics of Biofilm Processes, Presented at the 53 rd Annual Conference of the Water Pollution Control Federation. Las Vegas, Nev., and accepted for publication in the Journal.

Trulear, M.G. and Characklis, W.G., (1980). Dynamics of

Microbial Film Process. Proc. First. natn. Symp. Rotating Biol. Contactor Technol. 365-408.

Trulear, M.G., and W.G. Characklis, J., (1982). Wat. Poll.Contr. Fed., 54, 1288.

Trulear, M.G., and W.G. Characklis., (1982). Dynamics of biofilm processes. JWPCF, 54 (a). 1288-1300.

Turakhia, M.H. and W.G. Characklis., (1983). Can. J. Chem. Eng. 61, 873-875.

Turakhia, M.H. and W.G. Characklis., (1988). Bioeng. 33, 406-414.

Uhlinger, D.J. and D.C. White., (1983). Appl. Env. Microbiol.

Van der Mei, H.C., Léonard, A.J., Weerkamp, A.J., Rouxhet P.G. and Busscher, H.J., (1988). Properties of oral streptococci relevant for adhesion; Zeta potential, surface free energy and elemental composition. Colloids and Surfaces, 32, 297.

Van der Mei, H.C., Léonard, A.J., Weerkamp, A.J., Rouxhet, P.G. and Busscher, H.J., (1988). Study of the surface of

Streptococcus salivarius HB and non-filvilar mutants: Zeta potencial and elemental composition using x-ray, photoelectron spectroscopy. *J. Bacteriology*, 170-2462.

Van Loodrecht, M.C.M., (1988). Bacterial adhesion, Doctorate Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Vavilin, J.A., Vasiliev., V.G., (1983). Dependence of biological treatment rate on species composition in activitated sludge or biofilm. I Biological treatment model with ecosystem adaptation. *Biotechnol. Bioengng.* 25, 1521-1538.

Verrier, D. et al., (1988). "Adhesion of anaerobic bacteria to inert supports and development of methanogenic biofilms" in *Anaerobic Digestion 1988. 5th*. International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Pergamon Press, pp.61-69.

Vidard, V., (1987). Etude des phenomènes d'adhesion des microorganismes sur des membranes d'ultrafiltration. DEA Ingénierie du Traitement et de l'Épuration des Eux. INSA Toulouse.

Visser, J., (1976). Adhesion of colloid particles, ni: E. Matifevic (ed.). *Surface and colloid science*, J.Wiley & Sons.

New York, Vol.8, pp.3-84.

Weiland, P. and Wulfert K., (1988). "Anaerobic treatment of stillage using different pilot -scale fixed bed reactors in up- and downflow mode of operation" in Anaerobic Digestion 1988. 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Pergamon Press, pp 147-154.

Weiss, L., (1968). "Studies on Cellular Adhesion in Tissue-Culture". Exper. Cell. Res. 53:603-614.

Weiss, L. and Blumenson, L.E., (1967). J. Cellular Physiology, 70:23.

Willianson, K. and P.L. McCarty, (1976). "A Modell of substrate utilization by bacterial films". J. Water Pollut. Control Fed. 48,9-24.

Willianson, K. and McCarty,(1976). Verification studies of the biofilm model for bacterial substrate utilization J.Wat. Pollut. Fed. 48, 281.

Wood, B.J., (1950). Investigations of underwater fouling. I. The role of bacteria in the early stages of fouling. Aust. Jour. Mar. Freshwat. Res.(1) 85-91.

Zobell, C.E., (1943). J. Bacteriol., 46, 39-50.

Zobell, C.E. and Anderson, D.Q., (1936). "Observations on the Multiplication of Bacteria in Different Volumes of Seawater and Solid Surfaces". Biol. Bull., 71:324-342.

INDICE DE FIGURAS

Figura.	Página
2.1.- Adsorción y degradación de la materia orgánica.	15
2.2.- Reacciones de oxidación de la materia orgánica durante la depuración biológica aerobia.	26
2.3.(a).- Líquido conteniendo: Nutrientes, donadores de electrones (D) y aceptadores de electrones (A).	30
2.3.(b).- Diagrama esquemático de la biopelícula.	31
2.4.- Perfiles de la concentración de oxígeno	34
2.5.- Caracterización de la biopelícula: Interfase líquida.	36
2.6.- Biopelícula idealizada que ilustra los perfiles de la concentración de los donadores (D) y aceptadores (A) de electrones.	37
2.7.- Formas básicas de polímeros.	44
2.8.- Perfiles de la concentración de oxígeno.	53
2.9.- Efecto de la velocidad de rotación sobre la tasa de desprendimiento.	54
2.10.- Efecto de la masa de biopelícula, a	

velocidad constante, en la tasa de desprendimiento de la biopelícula.	55
2.11.- Efecto del espesor de la biopelícula sobre la densidad.	58
2.12.- Modelos de cinéticas de Blackman y Monod para crecimiento por sustrato limitante.	71
2.13.- Fases de la progresión de la biopelícula.	91
2.14.- Fases de la progresión de la biopelícula.	91
2.15.- Fases del crecimiento de la biopelícula.	104
2.16.- Concepto básico para el modelo de biopelícula.	121
2.17.- Perfiles característicos de sustrato dentro de la biopelícula.	122
2.18.- Adherencia inicial.	157
2.19.- Adherencia inicial.	161
2.20.- Adhesión de "moniliella pollinis" en varios soportes.	170
2.21.- Distribuciones de energía potencial neta.	171
2.22.- Adhesión de "Saccharomyces cerevisae" en soportes con carga en superficie.	173
2.23.- Composición de todos los procesos que contribuyen a la acumulación de biopelícula.	179
4.1.- Explicación gráfica del proceso a controlar.	215
4.2.- Reactor RSP.	219
4.3.- Sistema soporte de la biopelícula.	221

4.4.-	Reductora de presión y regulador de caudal.	224
4.5.-	Alimentación del agua residual afluyente.	227
4.6.-	Esquema general del sistema RSP.	228
4.7.-	Plan experimental.	241
4.8.-	Agrupación de experimentos según las variables experimentales básicas.	244
4.9.-	Determinación del espesor de la biopelícula con microscopía óptica.	252
4.10.-	Sistema de extracción de la biopelícula.	253
4.11.-	Aplicando la técnica de microscopía óptica.	254
4.12.-	Biopelícula extraída del soporte.	255
5.1.-	Estructura de la biopelícula.	329
6.1.-	Efectos de la limitación de oxígeno en el funcionamiento de un RBC.	409
D-1.-	Relación So-RENDQO	393
D-2.-	Efecto de la concentración afluyente	394
D-3.-	Relación COA-RENDQO (a) y (b)	395
D-4.-	Relación COA-RENDQO (c)	396
D-5.-	Relación CH-RENDQO	397
D-6.-	Relación TRH-RENDQO	398
D-7.-	Relación TRH-RENDQO	399
D-8.-	Relación CH-S	400
D-9.-	Relación CH-S	401
D-10.-	Relación COA-S	402
D-11.-	Relación So-S (a) y (b)	403
D-12.-	Relación COA-S	404

D-13.- Relación COA-S	405
D-14.- Relación So-DQOEI	406
D-15.- Relación COA-COE (a), (b) y (c)	408
D-16.- Efectos del espesor sobre la densidad	411
D-17.- Relación entre el espesor medio y la tasa de DQO eliminada.	413
D-18.- Relación COA-DENSIDAD (a), (b) y (c)	414
D-19.- Relación COA-XeB	416
D-20.- Relación entre la masa de la biopelícula y la tasa específica de desprendimiento. (A) y (B)	418
D-22.- Relación Carga Volúmica y TCO(DBO)	420
D-23.- Relación CVA-TCO(DQO)	421
D-24.- Relación entre la carga de nitrógeno amoniacal afluente y S.	423
D-25.- Relación CH-(N-NH ₄) _E	425
D-26.- Relación S-Carga nitrógeno total eliminada	426

Gráficas	Página
1.- Relación COA-RENDQO	293
2.- So-RENDQO	295
3.- S-RENDQO	297
4.- RENDQO-COE	298
5.- RENDQO-COXE	300
6.- ESPESOR-RENDQO	302

7.-	TRF(SS)-RENDQO	303
8.-	COA-S	305
9.-	COA-XeB	307
10.-	COA-TCO(DQO)	308
11.-	COA-ESPESOR	310
12.-	COA-DENSIDAD	311
13.-	COA-N	312
14.-	COA-COE	313
15.-	S-COXA	314
16.-	TCO(X)-COXA	316
17.-	ESPESOR-COXA	318
18.-	DENSIDAD-COXA	319
19.-	%SSVB/SSB-COXA	320
20.-	TRF(SSV)-COXA	322
21.-	CRE-COXA	323
22.-	XeB-COXA	324
23.-	TCO(DQO)-COE	325
24.-	S-COE	328
25.-	S*-S	330
26.-	COE*-COE	331
27.-	TRF(SS)-COXE	334
28.-	TRF(SS)-COE	336
29.-	XeB-COA	337
30.-	XeB-COXE	339
31.-	ESPESOR-COXE	340
32.-	ESPESOR-DENSIDAD	341

33.-	DENSIDAD-COXE	343
34.-	DENSIDAD-TRF(SS)	344
35.-	%SSV/SS-COXE	345
36.-	CH-S	346
37.-	TCO(X)-COXE	349
38.-	TCO(X)-S	350
39.-	TCO(X)-S/So	352
40.-	TCO(X)-DENSIDAD	353
41.-	TCO(DQO)-S	354
42.-	TCO(DQO)-XeB	355
43.-	TCO(DQO)-DENSIDAD	356
44.-	TCO'-S	358
45.-	TCO'-S/So	359
46.-	TCO'-DENSIDAD	360
47.-	CRE-COE	361
48.-	CRE-DENSIDAD	363
49.-	CRE-TCO(DQO)	365
50.-	N/No-No/So	367
51.-	N/No-COE	369
52.-	N-COE	370
53.-	N-COA	371
54.-	N/S-No/So	372
55.-	RENDETN-N	373
56.-	%ND/N-COXE	374
BC-1	1/COA-RENDQO	432
BC-2	S-RENDQOxCOA	436

BC-3	So-RENDQOxCOA	436
BC-4	QO ₂ -RENDQOxCOA	437
BC-5	COXE-QO ₂	437
BC-6	COXE-1/TRF	439
BC-7	SS-ΔBSSV	441
BC-8	SS-ABSSV	442
BC-9	COA-ABSS	442
BC-10	COXE-TCO(X)	444
BC-11	XeB/COE-TCO(DQO)	445
BC-12	TCO(DQO)-XeB	447

TABLAS

2.1.- Inmovilización de microorganismos por modificación superficial de las células o de los soportes.

162

NOTACIONES Y SIMBOLOS

A = Energía de atracción, velocidad de cambio de concentración del reaccionante, aceptador, velocidad total, superficie.

A_p = Agrupación de parámetros de la biopelícula,
 $\mu_m \rho_s / D_o \cdot Y \cdot K_{sv}$ (m^2).

AB = Acumulación de biopelícula en el soporte (g/cm^2).

ΔBSS = Incremento en la biopelícula de sólidos suspendidos.
 (g/d).

$\Delta BSSV$ = Incremento en la biopelícula de sólidos suspendidos volátiles (g/d).

b = Envejecimiento, tasa específica de decaimiento de la biopelícula o la biomasa, (d^{-1}), tasa específica de descomposición.

C = Concentración de oxígeno disuelto, (g/m^3).

C^* = Concentración de saturación del oxígeno disuelto, (g/m^3), concentración de oxígeno disuelto en saturación en la interfase gas-líquido.

C_A = Concentración molar del componente A, concentración en masa del reactivo A.

C_{A1} = Concentración molar del componente A en el instante inicial.

C_I = Concentración de oxígeno disuelto en la interfase gas-líquido.

C_L = Concentración de oxígeno disuelto en la fase líquida.

CARG.NAf. = Carga nitrógeno afluente. ($g/m^2.d$).

CARG.NEf. = Carga nitrógeno efluente. ($g/m^2.d$).

CHA = Carga hidráulica afluente. ($m^3/m^2.d$).

CN = Constante de nitrificación.

CNA = Carga nitrógeno afluente. ($g/m^2.d$).

CNAAf = Carga nitrógeno amoniacal afluente. ($g/m^2.d$)

CNE = Carga nitrógeno efluente ($g/m^2.d$).

CN' = Carga nitrógeno eliminada ($g/m^2.d$).

CO* = Carga orgánica en la superficie externa de la biopelícula aerobia. ($g/m^2.d$).

COA = Carga orgánica afluente ($g/m^2 d$).

COE = Carga orgánica eliminada ($g/m^2 d$).

COE* = Carga orgánica en la superficie externa de la biopelícula aerobia ($g/m^2.d$).

COEf(DBO) = Carga orgánica efluente (DBO). ($g/m^2.d$).

COEf(DQO) = Carga orgánica efluente (DQO). ($g/m^2.d$).

CO(X) = Carga orgánica específica eliminada. ($gDQO/gSSVB.d$).

CO(X1) = Carga orgánica específica afluente. ($gDQO/gSSVB.d$).

CO(X2) = Carga orgánica específica eliminada. ($gDBO5/gSSVB.d$).

CO(X3) = Carga orgánica específica afluente. ($gDBO5/gSSVB.d$).

COXA = Carga orgánica específica afluente (g de DQO o DBO/ g de SSVB d).

COXE= Carga orgánica específica eliminada (g de DQO O DBO/g de SSVB d).

CRE = Coeficiente de respiración endógena (gO_{2r}/gO_{2t}).

D = Parámetros de difusión, donador de electrones.

D_A = Coeficiente efectivo de difusión del componente A a través de un sólido poroso.

D_{AB} = Difusividad del componente A en su mezcla binaria con el componente B.

D_C = Difusividad del oxígeno disuelto en el líquido, (m²/unidad de tiempo).

D_e , D_f = Difusión efectiva.

D_L = Difusividad del sustrato en el líquido, (m²/unidad de tiempo).

D_S = Difusividad efectiva del sustrato en la biopelícula, (m²/ unidad de tiempo).

DBO5Af = Concentración afluente DBO5 (mg/l).

DBO5Ef = Concentración efluente. (mg/l).

(DBO5)_A = Concentración en el afluente expresada en DBO (mg/l).

DENS. BIOP.= Densidad de la biopelícula (Kg/m³).

DENSB = Densidad biopelícula (Kg/m³).

DENSBIOP. = Densidad biopelícula (Kg/m³).

DO = Oxígeno disuelto.

(DQO)_A = Concentración en el afluente expresada en DQO. (mg/l).

$(DQO)_E$ = Concentración DQO eliminada. (mg/l).

$(DBO5)_E$ = Concentración DBO5 eliminada. (mg/l).

DQO_{Af} = Concentración DQO afluente (mg/l).

DQO_{Ef} = Concentración DQO efluente (mg/l).

d = Espesor de la biopelícula. (μm).

E = Rendimiento del proceso.

E_T = Eficiencia de eliminación de DBO, a $T^\circ\text{C}$.

E_{20} = Eficiencia de eliminación de DBO, a 20°C .

Espe s or = Espesor de la biopelícula húmeda (cm).

ESP. BIO. = Espesor biopelícula (μm).

ESPESOR = Espesor biopelícula (mm).

F = Sustrato.

f_1 = Factor de proporcionalidad.

f_2 = Producto de la fracción degradable de los sólidos por el requerimiento de oxígeno.

G_A = Energías debidas a las fuerzas de atracción o de Van der Waals.

G_E = Interacciones electrostáticas.

G_T = Energía de interacción.

h = Distancia.

I = Concentración del inhibidor.

K = Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos, relación entre la difusividad y el espesor de la película.

K_c = Coeficiente de saturación para el oxígeno y el

sustrato, (g/m^3).

K_d = Coeficiente de descomposición endógena.

K_m = Constante de saturación o media velocidad.

K_s = Coeficientes de saturación, para el oxígeno y el sustrato, (g/m^3).

K_1 = Coeficiente que mide la densidad microbiana y cinética, constante de inhibición, constante de velocidad de reacción referida a la unidad de volumen del sistema.

K_2 = Coeficiente de velocidad, coeficiente de difusión del sustrato en la película.

$K_2 X$ = Tasa global de eliminación.

K_3 = Coeficiente cinético.

k, k_n = Constantes de reacción intrínseca.

L_f = Espesor de la biopelícula. (μm).

L_v = Cargas hidráulicas por unidad de longitud del perímetro mojado, sin recirculación y con recirculación, ($\text{kg}/\text{m-tiempo}$).

l = Espesor.

M = Repulsión entre las células, microorganismos.

M_a = Masa activa respecto a la unidad de superficie geométrica del soporte A_0 (ML^{-2}), densidad celular.

M_d = Masa de bacterias inertes.

N_A = Flujo molar del componente A respecto a una superficie estacionaria.

N_m = Flujo de sustratos, máximo o límite, en la interfase

entre la biopelícula y el líquido, kg o g/m^2 -unidad de tiempo.

N_s = Flujo de masa del sustrato, kg. o g/m^2 unidad de tiempo.

N-DESN = Nitrógeno desnitrificado (g/d).

N-NH₄t = Nitrógeno amoniacal nitrificado teóricamente (g/d).

N-NH₄r = Nitrógeno amoniacal realmente nitrificado (g/d).

N-NH₄ Af = Nitrógeno amoniacal afluente. (g/d).

N = Concentración de nitrógeno efluente (mg/l).

N_o = Concentración nitrógeno afluente (mg/l).

N-SSVB = Nitrógeno asimilado por la biopelícula (g/d).

N-SSVE = Nitrógeno en los sólidos suspendidos volátiles del efluente (g/d).

NA = Nitrógeno afluente (g/d).

NAFLU = Concentración nitrógeno afluente (mg/l).

NAf = Nitrógeno afluente (g/d).

ND = Nitrógeno desnitrificado (g/d).

NEFLU = Concentración nitrógeno efluente (mg/l).

NEf = Nitrógeno efluente (g/d).

$N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ = Concentraciones de nitrógeno. (mg/l).

O₂ = Caudal de oxígeno (g/d).

ODA = Oxígeno disuelto afluente (g/d).

ODE = Oxígeno disuelto efluente (g/d).

ON = Oxígeno necesario para la nitrificación (g/d).

ORD = Oxígeno recuperado desnitrificación (g/d).

OREr = Oxígeno respiración endógena real. (g/d).

$OREt$ = Oxígeno respiración endógena teórico (g/d).
 OSM = Oxígeno para síntesis y mantenimiento. (g/d).
 P_A = Presión parcial del componente A. (Kg/cm²).
 PBH = Peso de la biopelícula húmeda. (g).
 PBS = Peso de la biopelícula seca (g).
 Pf = Producción específica de fangos (g de sólidos suspendidos/g DQO o DBO eliminadas).
 Q = Caudal. (l/d).
 Q_i = Tasa de flujo del líquido afluente.
 QO_2 = Caudal específico de oxígeno (kg/m² d).
 q = Tasa específica de eliminación de sustrato.
 R = Constante de los gases perfectos.
 R_A = Velocidad de reacción, moles del componente A generados por reacción química por unidad de volumen y unidad de tiempo.
 R_1 = Radio interno de un cilindro.
 R_2 = Radio externo de un cilindro.
 R_1, R_2, R_3 = Energías repulsivas.
 $REN. DBO5$ = Rendimiento DBO5.
 $REND.DQO$ = Rendimiento DQO.
 $RENDETN$ = Rendimiento eliminación total nitrógeno.
 $RENDNO_3$ = Rendimiento eliminación de nitratos.
 $RENDQO$ = Rendimiento DQO.
 $RETN$ = Rendimiento eliminación nitrógeno total.
 r = Radio, velocidad de reacción, coordenada radial de

posición.

r_a = Tasa de utilización del aceptador de electrones.

r_m = Relación de los pesos moleculares de los reactivos.

r_n = Relación de los coeficientes estequiométricos de los reactivos.

r_M = Relación de los pesos moleculares de los reactivos.

r_N = Relación de los coeficientes estequiométricos de los reactivos.

r_{ND} = Tasa de inhibición.

r_R = Relación de recirculación, $Q_R:Q_i$

r_d = Descomposición endógena

r_g = Tasa de crecimiento bacteriano.

r_{su} = Tasa de utilización del sustrato.

r_x = Expresión del crecimiento neto de las células.

S = Concentración de DBO biopelícula, de sustrato.

S = Concentración sustrato efluente (mg/l).

S^* = Concentración interfacial del sustrato.

S_1 = Concentración de sustratos en el afluente. (g/m^3).

S_e = Concentración residual o efluente del sustrato, superficie específica (1,227 y 0,1735 cm^2).

S_o = Concentración de sustrato inicial, concentración de sustratos del afluente, (g/m^3), (mg/l).

S_s = Concentración superficial.

$S.El.Ox.$ = DQO eliminada por oxidación carbonácea (mg/l).

SS = Sólidos suspendidos (mg/l).

SSB = Sólidos suspendidos en la biopelícula (g).

SSE = Sólidos suspendidos efluente (mg/l).

SST = Sólidos suspendidos totales (g).

SSV = Sólidos suspendidos volátiles. (mg/l).

SSVB* = Sólidos suspendidos volátiles en la biopelícula,
tomados en la última medida del experimento en la
fase estabilizada. (g).

SSVE = Sólidos suspendidos volátiles efluente (mg/l).

SSVT = Sólidos suspendidos volátiles totales (g).

T = Temperatura °C.

T_o = Temperatura absoluta.

TCO' = Tasa de consumo de oxígeno (g/m².d).

TCO(DQO) = Tasa de consumo de oxígeno (gO₂/DQOEI.d).

TCO(X) = Tasa específica de consumo de oxígeno (gO₂/gSSVB.d).

TCOX = Tasa específica de consumo de oxígeno (g/gSSVB.d).

TD = Tasa de dilución. (d⁻¹).

TEMP. = Temperatura.(°C).

TP = Tasa de producción de fangos. (g/d).

TP' = Tasa de producción de fangos (sólidos suspendidos
volátiles). (g/d).

TRH = Tiempo de retención hidráulico. (d).

TRF(SS) = Tiempo de retención fangos (SS) (d).

TRF(SSVT) = Tiempo retención fangos (SSV) (d).

TRF-SST ó SSVT = Tiempo de retención de fangos (d).

t = Tiempo.

t_r = Tiempo de retención hidráulica (V_a/Q_i).

t^{-1} = Tasa neta de crecimiento

U = Tasa específica de toma de nutrientes, g de DBO/g (sólidos de la biopelícula)-unidad de tiempo.

U_m = Valor máximo o límite de U , g de DBO/g (sólidos de la biopelícula)-unidad de tiempo.

V = Tasa específica de toma de sustrato, volumen del reactor, volumen.

V_m = Tasa específica máxima.

VBH = Volumen de biopelícula húmeda (cm^3).

v = Velocidad de la corriente.

X = Concentración de microorganismos, concentración en el reactor (masa de SSV/unidad de volumen).

X_B = Masa de sólidos de biopelícula por unidad de volumen de lecho, g/m^3 .

$X_E B$ = Biomasa específica de la biopelícula ($gSSB/m^2$).

$X_o B$ = Biomasa específica de la biopelícula ($gSSB/m^2$).

X_f = Densidad dentro de la biopelícula.

X_o = Concentración en el efluente.

x = Valor medio del espesor, dirección axial paralela al flujo, coordenada de posición.

Y = Fase de crecimiento, coeficiente de rendimiento del crecimiento de la biomasa, kg (sólidos secos)/de DBO.

Y_b = Masa celular perdida por envejecimiento.

$Y_{\xi A}$ = Aceptor de electrones.

Y_{OBS} = Producción neta de bacterias.

Y_s = Coeficiente de producción máximo.

y = Dimensión lineal normal al área considerada, distancia dentro de la biopelícula, m.

Z_T = Coeficiente de temperatura para la eficiencia de eliminación.

z = Dimensión lineal vertical, altura de una sección del lecho, m.

δ = Densidad del agua (g/cm^3).

λ = Factor de efectividad.

μ = Tasa específica de crecimiento microbiano de la biopelícula, tiempo $^{-1}$.

μ_m = Tasa específica de crecimiento microbiano, máximo o asintótico, tiempo $^{-1}$.

ρ = Densidad del líquido, kg/m^3 .

ρ_s = Densidad de la biopelícula, kg o g (sólidos secos)/ m^3 .

ϕ_s = Parámetro en la "ecuación de la tasa biológica".

θ = Tiempo de retención hidráulico.