

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

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE LA BIOPELICULA EN MEDIO SOPORTE PERMEABLE

AUTOR

EMILIO EGUIA LOPEZ

DIRECTOR DE TESIS

JUAN IGNACIO TEJERO MONZON

TRIBUNAL CALIFICADOR

PRESIDENTE:

VOCALES:

Acuerda otorgar la calificación de:

Santander,

de

de 1991

III

DEDICATORIA

A los que rodean mi vida, y en especial a mi mujer, Asun, y mis hijas Virginia y María.

IV

RESUMEN

El objetivo más general de la presente investigación ha sido la posibilidad de desarrollar un proceso biopelícula sobre membranas porosas en general, e incluso sobre membranas permeables a gases, e hidrófilas.

La observación del desarrollo de la biopelícula en el medio soporte permeable al oxígeno, se constituyó en el objetivo principal de esta Tesis.

El campo de investigación se delimitó al caso de la eliminación de la materia orgánica carbonácea del agua residual.

Para realizar dichos objetivos, se diseñó una planta piloto (RSP), en la que se llevó a cabo una experimentación lo más amplia y completa posible.

Se empleó un dispositivo para extraer la biopelícula del soporte, ideado para tal fin.

La carga orgánica afluyente (COA), varió desde 146 gDQO/m<sup>2</sup>.d, hasta 584 gDQO/m<sup>2</sup>.d. El caudal de oxígeno empleado fué de 0,167 Kg/m<sup>2</sup>.d; 0,195 Kg/m<sup>2</sup>.d y 0,223 Kg/m<sup>2</sup>.d.. Se emplaron dos medios soporte (MS), de tamaño de poro de 0,5 y 0,2 µm.

## VI

Se han realizado balances de sustrato, oxígeno, nitrógeno y sólidos. También se ha hecho un análisis paramétrico y biocinético, así como las comparaciones de resultados con otros procesos.

Como resultados más importantes que definen el proceso estudiado se citan los siguientes: El rendimiento alcanzado superior al 90%, lo es para cargas orgánicas comprendidas entre 130 y 160 gDQO/m<sup>2</sup>.d.

La biopelícula desarrollada en el soporte permeable al oxígeno, tuvo un porcentaje muy alto de volátiles (>90%), una densidad muy elevada (90-105 Kg/m<sup>3</sup>), y muy elevado espesor (>3 mm).

La producción de fangos ha resultado muy baja. Los sólidos suspendidos en el efluente estuvieron en valores máximos de 27 mg/l.

Las tasas de consumo de oxígeno son comparables a las de otros procesos con oxígeno. (TCO(DQO) 1,2÷1,6 KgO<sub>2</sub>/KgDQO El.).

VII

AGRADECIMIENTOS

## VIII

Temo no poder ser justo con todas aquellas personas o instituciones que me han ayudado a ó en la realización de este trabajo de investigación, pero serían muchos folios los que tendría que dedicar, y aún estoy seguro se me olvidaría alguien. A todos los que se puedan sentir ofendidos por no aparecer aquí su nombre, les pido humildemente disculpas.

A Juan Ignacio Tejero Monzón, todo mi reconocimiento como profesor, investigador y amigo. No hay palabras para expresar mis sentimientos hacia él. Como Director de esta Tesis, ha demostrado y me ha enseñado lo que cualquier alumno debe poder alcanzar de un maestro.

A todo el "equipo biopelícula", Jose Antonio, Juanjo, Tomás, Alfredo ... A éste último mis más sinceras gracias por la ayuda prestada en el Laboratorio de Química de la Escuela Superior de la Marina Civil, donde se desarrolló toda la investigación, en la determinación diaria de una parte importante de resultados experimentales. Aunque no pertenece a este grupo, no puedo olvidar a Marcel Szanto, que me ayudó en la ejecución de las diapositivas para la exposición.

A Jose María Navarro, que me ha ayudado poniendo a

## IX

mi disposición sus conocimientos, material informático y alentándome constantemente.

A Manuel Fernández, que hizo realidad el proyecto del RSP, aportando sus grandes ideas en dicho cometido.

A Juan y Elena Tenreiro que me han ayudado a la realización de las figuras.

A Cesar Pombo, que hizo las fotografías a la hora que fué necesario.

A Juan Hurlé por su interés en solucionar el problema de poder disponer del microscopio para toda la fase de investigación.

A todo el personal de la Escuela Superior de la Marina Civil por su aliento constante.

A todos ellos mi agradecimiento.

x

Este trabajo de investigación ha sido posible, gracias a la subvención aportada por la Universidad de Cantabria y la Diputación Reginal a través de la convocatoria conjunta de ayudas a la investigación.

Esta Tesis ha generado durante su desarrollo una Tesina de Magister en Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, titulada "Evaluación preliminar del funcionamiento de la Biopelícula en un Reactor de Soporte Permeable (RSP)", desarrollada por D. Juan Alfredo Jácome Burgos, bajo la dirección de D. Juan Ignacio Tejero Monzón.



### XIII

#### TESIS DOCTORAL

##### "Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable"

INDICE:	Página
1.- Introducción.	1
2.- Estado actual de los conocimientos.	11
3.- Objetivos.	210
4.- Metodología.	213
5.- Resultados.	258
6.- Discusión.	382
7.- Conclusiones.	464
8.- Bibliografía.	470
Indice de figuras y tablas	497
Notaciones y símbolos.	504
ANEJOS:	
A1.- Resultados experimentales. Tablas.	A1.01
A2.- Resultados experimentales. Gráficos descriptivos.	A2.01
A3.- Parámetros, Tasas y Rendimientos. Tablas.	A3.01
A4.- Relaciones entre variables y parámetros.	

Gráficas.	A4.01
A5.- Población microbiana de la biopelícula desarrollada.	A5.01



2.2.- La biopelícula o película biológica.	28
2.2.1.- Análisis funcional de la biopelícula. Modelo general.	28
2.2.2.- Transporte de materiales en la fase líquida.	34
2.2.3.- Características de la biopelícula.	40
2.2.3.1.- Composición básica de la biopelícula.	41
2.2.3.2.- Composición elemental de la biopelícula.	46
2.2.3.3.- Composición biológica de la biopelícula	48
2.2.3.4.- Espesor de la biopelícula.	49
2.2.3.5.- Densidad de la biopelícula	58
2.2.3.6.- Reología de la biopelícula.	62
2.2.4.- Transporte y reacción dentro de la biopelícula.	63
2.2.4.1.- Coeficiente de difusión efectiva.	65
2.2.4.2.- Biocinética básica.	68
2.2.4.3.- Análisis estequiométrico.	79
2.2.4.4.- Eliminación conjunta del nitrógeno y del carbono orgánico.	85
2.2.5.- Fases del crecimiento de la biopelícula.	91

## XVII

2.2.6.- Modelos de la biopelícula.	105
2.2.6.1.- Modelo de Williamson y McCarty.	106
2.2.6.2.- Modelo de Atkinson et al., o de la Ecuación de la Tasa Biológica.	113
2.2.6.3.- Modelo de Rittmann y McCarty, soluciones propuestas por Suidan, Rittmann y Traegner.	120
2.2.6.4.- Modelo de Rittmann y McCarty aplicado por Sáez, Muñoz y Celedón.	132
2.3.- El medio soporte de la biopelícula.	141
2.3.1.- Planteamiento general.	141
2.3.2.- Adherencia de la biopelícula al medio soporte.	145
2.3.2.1.-Análisis general.	145
2.3.2.2.- Efecto de las propiedades del soporte.	149
2.3.2.3.- Teoría básica de la adhesión inicial.	152
2.3.3.- El material soporte.	180
2.3.3.1.- Materiales utilizados.	180
2.3.3.2.- Tipos y características de membranas.	183

## XVIII

2.4.- La transferencia de oxígeno.	191
2.4.1.- Fundamentos de la transferencia de materia difusión.	191
2.4.2.- Modelos teóricos de transferencia de oxígeno.	196
2.4.3.- Transferencia de oxígeno en procesos biológicos.	205
3.- Objetivos.	210
4.- Metodología.	213
4.1.- Materiales.	216
4.1.1.- Reactor experimental.	217
4.1.2.- Medio soporte.	220
4.1.3.- Sistema de aportación de oxígeno.	222
4.1.4.- Agua residual afluyente.	225
4.2.- Plan experimental.	229
4.2.1.- Desarrollo de la investigación.	229
4.2.2.- Fase experimental previa.	231
4.2.2.1.- Obtención de las características hidráulicas del reactor.	231
4.2.2.1.a.- Experimentación realizada.	231
4.2.2.1.b.- Reactor de mezcla completa.	233
4.2.2.1.c.- Análisis de los datos.	235
4.2.2.2.- Siembra inicial.	236
4.2.2.3.- Periodo de adaptación y	

XIX

estabilización.	238
4.2.2.4.- Puesta a punto del reactor.	238
4.2.3.- Diseño de los experimentos.	240
4.2.4.- Medición de variables.	247
4.2.4.1.- Plan de muestreos y análisis.	247
4.2.4.2.- Métodos de medida de espesores, acumulación de biopelícula seca, agua y sólidos de la biopelícula. (SS y SSV).	252
5.- Resultados.	258
5.1.- Elaboración de resultados.	259
5.1.1.- Resultados obtenidos.	259
5.1.2.- Obtención de parámetros, rendimientos y tasas.	262
5.1.2.1.- Relación de variables y parámetros.	262
5.1.2.2.- Cálculo de los parámetros.	265
5.1.3.- Balances de Materia	271
5.1.3.1.- Balance de Oxígeno.	272
5.1.3.1.a.- Cálculo de parámetros del balance.	274
5.1.3.2.- Balance de Nitrógeno.	277
5.1.3.2.a.- Cálculo de parámetros del balance.	279
5.1.3.3.- Balance de Sustrato.	282

5.1.3.4.-	Balance de sólidos.	283
5.1.3.4.a.-	Cálculo de parámetros del balance.	284
5.1.4.-	Parámetros modificados por balances.	286
5.2.-	Análisis del funcionamiento del proceso.	288
5.2.1.-	Rendimiento del proceso.	290
5.2.1.1.-	Rendimiento de eliminación de sustrato..	293
5.2.1.2.-	Influencia de la COA.	305
5.2.1.3.-	Influencia de la COXA.	314
5.2.1.4.-	Influencia de COE.	326
5.2.1.5.-	Parámetros modificados por Balances.	329
5.2.2.-	Producción de Biomasa.	332
5.2.2.1.-	Influencia del TRF.	334
5.2.2.2.-	Influencia sobre la biomasa.	337
5.2.2.3.-	Influencias sobre el espesor.	340
5.2.2.4.-	Influencia sobre la densidad.	342
5.2.2.5.-	Otros factores.	344
5.2.3.-	Consumo de Oxígeno: Utilización del Oxígeno.	347
5.2.3.1.-	Influencia sobre la TCO(X).	349
5.2.3.2.-	Influencia sobre la	

TCO(DQO).	354
5.2.3.3.- Influencias sobre la TCO'.	357
5.2.3.4.- Influencia del CRE.	361
5.2.4.- Influencia del Nitrógeno:	366
5.2.4.1.- Eliminación del Nitrógeno.	367
5.3.- Resumen del análisis realizado	375
5.3.1.- Sobre el rendimiento en un RSP.	376
5.3.2.- Sobre la producción de Biomasa.	378
5.3.3.- Sobre el Oxígeno.	379
5.3.4.- Sobre la influencia del Nitrógeno.	380
6.- Discusión.	382
6.1.- Comparación con valores de los parámetros de funcionamiento de otros procesos.	383
6.1.1.- Procesos seleccionados.	384
6.1.2.- Resultados.	388
6.2.- Comparación con relaciones entre parámetros obtenidos en otros estudios.	391
6.2.1.- Rendimiento DQO	392
6.2.2.- Producción de Biomasa	410
6.2.3.- Consumo y utilización del oxígeno.	419
6.2.4.- Influencia del Nitrógeno.	422
6.3.- Análisis Biocinético	428
6.3.1.- Eliminación de Sustrato	429
6.3.2.- Crecimiento de la Biomasa	438
6.3.3.- Consumo de Oxígeno	443

## XXII

6.3.4.- Biomasa presente	446
6.3.5.- Análisis Final	450
6.4.- Procedimiento de diseño.	453
6.4.1.- Superficie del soporte y volumen del reactor.	454
6.4.2.- Aportación de Oxígeno	456
6.4.3.- Producción de Fangos	457
6.4.3.1.- Crecimiento de la biomasa	457
6.4.3.2.- Biomasa presente	458
6.4.4.- Caso práctico	460
6.4.5.- Eliminación del Nitrógeno	463
7.- Conclusiones.	464
8.- Bibliografía.	470
Indice de figuras y tablas.	497
Notaciones y símbolos.	504
ANEXOS:	
A1.- Resultados experimentales. Tablas.	A1.01
A2.- Resultados experimentales. Gráficos descriptivos.	A2.01
A3.- Parámetros Tasas y Rendimientos. Tablas.	A3.01

XXIII

A4.- Relaciones entre variables y parámetros. Gráficas.	A4.01
A5.- Población microbiana de la biopelícula desarrollada.	A5.01

## 1.- INTRODUCCION

## 1.-INTRODUCCION

### 1.1.- ANTECEDENTES

Los procesos de tratamiento biológico aerobios, se usan ampliamente para la eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales.

En particular, los procesos biológicos de película fija, han tenido un gran desarrollo recientemente (Metcalf & Eddy, 1979).

El desarrollo de la película fija viable, es fundamental para cualquiera de estos procesos (Kornegay y Andrews, 1968; La Motta, 1976). Según el agua residual entra en contacto con la película microbiana adherida, en un medio aerobio, los microorganismos crecen en términos de número y de masa, aumentando el espesor de la biopelícula.

Estudios realizados por Kornegay y Andrews (1968), Atkinson y Davies (1974), Hoehn y Ray (1973), Williamson y McCarty (1976), Rittmann y McCarty (1980), y Characklis et

al. (1982), han descrito los aspectos físicos, químicos y biológicos del desarrollo de la película biológica.

En varios de estos estudios, la difusión del oxígeno fué considerada como un factor de tasa limitante.

Quizás el proceso aerobio de película fija más comunmente usado en la depuración de las aguas residuales, sea el lecho bacteriano, aunque los Biodiscos han desplazado la atención hacia ellos en los últimos años (Lumbers, 1983).

Un objetivo de cualquier proceso es, conseguir una óptima relación entre la economía general de un sistema y el rendimiento total de la instalación. Por esta causa, se han desarrollado en los últimos años, en laboratorio, experimentos sobre las posibles alternativas a los denominados sistemas clásicos de depuración de aguas residuales. Así, por ejemplo, Hamoda y Abd-El Bary (1987), han desarrollado un reactor de película fija, adherida a un soporte cerámico sumergido, con un sistema de aireación por difusores entre los soportes. También Chen, Ozaki y Terashima (1989) desarrollaron un reactor de biodiscos, sumergidos totalmente, con difusores de aire comprimido. En ambos sistemas, la difusión del oxígeno se favorece con el

movimiento, en el primer caso, del sistema de aireación, y del propio biodisco, en el segundo. Asimismo, en los biodiscos sumergidos totalmente, se persiguió la eliminación simultánea, tanto de las sustancias orgánicas, como la del nitrógeno.

## 1.2.- OBJETIVO GENERAL

En esta línea de procesos innovadores, nos habíamos planteado el objetivo general de la presente Tesis, la posibilidad de desarrollar un proceso biopelícula sobre membranas porosas en general, e incluso, sobre membranas permeables selectivamente a gases (oxígeno), y no a líquidos.

Posteriormente, el estudio de Timberlake, Strand y Williamson (1988), sobre un reactor de biopelícula en soporte permeable, nos ratificó en nuestra idea y se constituyó en la base para el trabajo de investigación presente.

A priori, de los estudios que hemos realizado hasta el momento, se pueden destacar las siguientes ventajas que comporta este proceso:

- Pueden ocurrir, simultáneamente, la oxidación heterótrofa, nitrificación y desnitrificación.
- Los SS totales en el efluente, se reducen considerablemente.

Entre las desventajas, se pueden citar:

- Costo elevado del material soporte (actualmente).
- Necesidad de plantas productoras de oxígeno o aire comprimido, así como de recipientes para su almacenamiento.
- Mayor complejidad tecnológica, que repercutirá en los costos de explotación y mantenimiento.

### 1.3.- CRONOLOGIA DE LA PRESENTE INVESTIGACION

En septiembre de 1.987, se realizó una primera recopilación bibliográfica de estudios realizados sobre la biopelícula en general. Ya se tenía la idea de la investigación a desarrollar, aunque ésta no se concretaba, porque no se conocía el comportamiento de los materiales a emplear, y lo más importante en ese momento, no se disponía de medios materiales específicos para su realización.

De la primera revisión bibliográfica, no se obtuvo dato alguno sobre experimentos similares, a nivel de artículos publicados en las revistas de mayor difusión mundial, por este motivo, y con el ánimo de conocer a fondo la situación real, imprescindible para cualquier trabajo de este tipo, se recurrió al Servicio de Teledocumentación de la Universidad de Cantabria, para poder entrar en las bases de datos más importantes a nivel mundial. Conocida la utilización más correcta de este servicio, se consiguió una selección muy importante de lo publicado.

En diciembre de 1.988, se publicó el primer

artículo relacionado con el tema concreto de investigación, en el cual no se abordaba la línea principal del trabajo presente, referida al estudio del proceso de desarrollo de la biopelícula sobre un medio soporte permeable y enfocado, esencialmente, a la eliminación de la materia orgánica carbonácea.

En el mes de febrero de 1.989, el Profesor D. Juan Ignacio Tejero Monzón, Catedrático de esta Universidad, consiguió, como Investigador Principal, una dotación económica de 850.000 pesetas para el Proyecto "Desarrollo de la Biopelícula en un medio Soporte Permeable", que es el trabajo presente.

La planta piloto se instaló, en marzo de 1.990, en el Laboratorio de Química de la Escuela Superior de la Marina Civil de la Universidad de Cantabria.

De los contactos mantenidos con empresas multinacionales, Millipore suministró, en diciembre de 1.989, 30 membranas de diversos tipos, (hidrófilas e hidrófobas), en un primer envío de material. El costo tan elevado de dichas membranas, hizo que, en posteriores pedidos, una parte ya considerable tuviera que ser asumida por el Proyecto

subvencionado.

Desde el 4 de marzo hasta el día 10 de Junio, se procedió a la puesta a punto de los métodos de análisis y técnicas de medición de los parámetros a determinar y, fundamentalmente, a la elección de las membranas a utilizar.

Sobre esta elección, hay que decir que los problemas fueron varios, desde la falta de resistencia mecánica de las membranas, hasta la consecución de la estanqueidad en el sistema adoptado.

Se hicieron unas pruebas generales en el mes de mayo, y el día 10 de Junio se comenzó con el experimento número 1 del plan de experimentación previsto, bajo la Dirección de D. Juan Ignacio Tejero Monzón, de la Tesis Doctoral sobre el "Desarrollo de la Biopelícula en Medio Soporte Permeable".

La experimentación queda finalizada el 29 de Septiembre de 1990. A continuación se comienza con el proceso de datos, cálculo de parámetros, balances, obtención de resultados y redacción propiamente dicha, sin dejar de seguir procesando información desde las bases de datos

mencionadas.

En Febrero de 1.991, se da por finalizada la presente investigación.

2.- ESTADO ACTUAL  
DE LOS  
CONOCIMIENTOS

## 2.- ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS.

### 2.1.- INTRODUCCION

Para enmarcar el planteamiento teórico, primeramente se exponen en esta introducción, los procesos biopelícula aerobios y la oxidación bacteriana del carbono orgánico.

Después de esta exposición inicial, este capítulo se divide en tres partes. La parte primera desarrolla el estudio de la biopelícula o película biológica por medio de su análisis funcional, en el cual se enumeran las características esenciales de la biopelícula. Precisamente estas características requieren el conocimiento de ciertas áreas tales como: el transporte de materiales en la fase líquida, las propiedades físico-químicas de la biopelícula, sus fases de crecimiento y las diversas soluciones matemáticas propuestas por algunos investigadores para resolver los diferentes planteamientos específicos de la cinética de la biopelícula.

En la segunda parte, se plantea el proceso de la

transferencia entre fases, con la exposición de la teoría de la adherencia de la biopelícula al soporte, y por lo tanto, los requerimientos generales y específicos de los materiales empleados como medio soporte de la biopelícula. Termina esta parte con el estudio sobre membranas. La tercera parte es un estudio sobre la transferencia de oxígeno.

Esta disposición del capítulo, responde a la demanda de conocimientos en los fenómenos que inciden en el desarrollo de la biopelícula, para poder abordar el objetivo general de esta Tesis.

## 2.1.1.- Los Procesos Biopelícula Aerobios.

### 2.1.1.1.- Lechos Bacterianos o Filtros Percoladores.

Algunos autores prefieren no usar el término filtro por no ajustarse, entre otros motivos, con la operación unitaria de ingeniería química.

Prácticamente tienen un siglo de antigüedad y han adquirido en este periodo reputación de estabilidad de operación, sencillez de diseño e infalibilidad con respecto al personal de operación.

Las dimensiones del lecho en el que se dispone el medio sólido de soporte, depende de la naturaleza del medio y de la concentración y tipo del agua residual por tratar.

Se puede decir que desde los dos hasta los cuarenta metros de diámetro se encuentran la mayoría de los lechos usados en la industria en general. El lecho es sumamente permeable, a él se adhieren los microorganismos pasando el agua residual a su través. Consiste generalmente en piedras

que oscilan entre los 2 y 10 centímetros de diámetro, y últimamente son de material plástico de sección cuadrada u otra cualquiera. En cualquier caso deben presentar un área de contacto entre la capa de líquido y el aire lo mayor posible, a fin de aumentar la absorción del oxígeno por la capa líquida presentando de manera análoga una gran área de contacto entre el líquido y la biopelícula.

El agua se distribuye sobre la parte superior del lecho por medio de conjuntos móviles de aspersores o rociadores fijos y gotea a través del lecho para caer a un colector situado en la parte inferior.

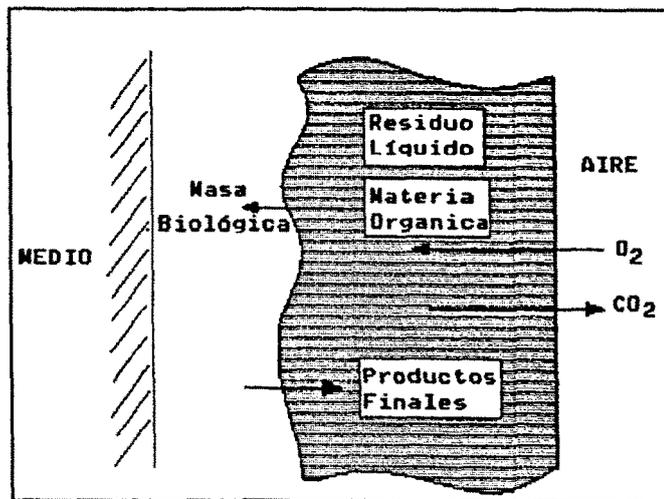


FIG. 2.1.

La materia orgánica es adsorbida sobre la película biológica, en cuyas capas exteriores es degradada por los microorganismos adheridos al medio. Figura 2.1. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de alcanzar las capas más profundas de la película. Por lo tanto se establece un ambiente anaerobio cerca de la superficie del medio soporte.

La materia orgánica, entonces, se metaboliza antes de llegar a alcanzar a los microorganismos situados en las capas más próximas al soporte, y estos microorganismos se encuentran en la fase endógena de crecimiento, en la que pierden su capacidad de adherencia al medio soporte. El líquido a su paso a través del medio, arrastra la película y comienza un nuevo ciclo de crecimiento.

Este fenómeno de desprendimiento de la película es función de:

1.- La carga hidráulica del sistema.

2.- La carga orgánica.

La primera origina las velocidades de arrastre y la segunda la velocidad del metabolismo en la biopelícula. Estos

factores serán fundamentales a la hora de predecir el funcionamiento de los lechos bacterianos.

El crecimiento inicial de la película podrá necesitar varias semanas para alcanzar su desarrollo sobre el medio soporte. Esta película se desarrolla a partir de los microorganismos presentes en las aguas o inoculados a ellas.

La eficiencia de la depuración alcanza un máximo cuando hay una delgada película completamente aerobia, y baja ligeramente según aumenta el espesor de la misma. Las regiones más profundas se vuelven inactivas o anaeróbicas. De una película de varios milímetros, sólo una capa de 0,05 a 0,15 milímetros de espesor podrá ser aerobia. El espesor de la película que proporciona máxima eficiencia ha sido citado como de 0,25 milímetros (Jenkins, 1963). Algunos investigadores han demostrado que la remoción del sustrato por película biológica aumenta linealmente con el incremento del espesor de la película hasta un máximo donde permanece constante con los aumentos adicionales de espesor (Tomlinson y Snaddon, 1966; Kornegay y Andrews, 1968; La Motta, 1976). La profundidad de la zona aeróbica ha sido estimada entre 0,06 y 0,2 milímetros, con la profundidad crítica de una película predominantemente bacteriana alrededor de 0,2 milímetros (Bruce, 1969), y entre 0,05 y 0,1 milímetros de

profundidad aeróbica activa en un espesor total de 0,1 a 2 milímetros (Harris y Hansford, 1976). Dependiendo de la concentración del sustrato Kornegay y Andrews, 1968, y La Motta, 1976, entre 0,07 - 0,15 y 0,012 - 0,065, respectivamente.

Atkinson y Fowler, 1974, correlacionaron los resultados de Tomlinson y Snaddon, Kornegay y Andrews y otros, para relacionar la profundidad de penetración y la concentración de sustrato.

Con muy altas concentraciones de sustrato en la fase líquida, la tasa de difusión de los nutrientes orgánicos en la biopelícula puede ser más rápida que la del oxígeno necesario para un metabolismo aerobio, de modo que la profundidad de la capa activa estará determinada por la profundidad de penetración del oxígeno. Resulta entonces que la disponibilidad del oxígeno resulta ser un factor limitante de la tasa.

Las aguas residuales con DBO mayor que la de una solución de glucosa de 88 gramos/m<sup>3</sup>, a 20 grados centígrados, es probable que experimente una limitación de flujo de oxígeno en un sistema de película biológica.

Cuando la concentración de nutrientes en la capa

liquida sea baja y los nutrientes orgánicos penetran sólo una corta distancia dentro de la película antes de ser consumidos, el sistema está controlado por la disponibilidad de los nutrientes orgánicos y se dice que está "controlada por los sustratos".

Benjes (1980) sugiere que el resto de película más allá de la capa activa actúa como moderador proporcionando al sistema la capacidad de autorregula los efectos de los cambios en la temperatura o las cargas de choque.

### 2.1.1.2.- Biodiscos o RBC.

Entre los procesos aerobios de cultivo fijo están los sistemas de medio soporte en movimiento denominados "Contactores biológicos rotativos", biodiscos o RBC<sub>s</sub>. Un reactor de este tipo consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo situados sobre un eje que gira movido por un sistema mecánico.

La biomasa crece en la superficie giratoria o biodisco, montado en un eje central horizontal que gira con una velocidad angular constante. Varios biodiscos montados en paralelo en el eje y separados por una pequeña distancia, componen el sistema que se instala en un depósito por el que se hace circular el agua residual a depurar.

La depuración se realiza mediante la aportación intermitente del oxígeno del aire y el alimento. Al pasar el agua residual a través de los biodiscos, los microorganismos que contiene sintetizan o biofloculan, eliminando del agua residual la materia orgánica. Esto trae como consecuencia un aumento gradual de la biopelícula en los discos.

El flujo del líquido dentro del reactor, combinado

con la rotación del medio, produce alto grado de cortante hidráulico sobre la película biológica. Por otra parte, a medida que la capa aumenta en espesor, la materia orgánica del agua residual se metaboliza antes de alcanzar las capas próximas a la superficie del soporte sólido, por esta causa estos microorganismos quedan sin alimento y pasan a la fase de respiración endógena, perdiendo su capacidad de adherencia al medio soporte y desprendiéndose de éste en función de la carga hidráulica y de la tasa de carga de nutrientes del agua residual.

#### 2.1.1.3.- Lecho Sumergido Aireado.

El reactor de lecho sumergido aireado, se aplica como fase independiente para la eliminación de la DBO carbonosa y para la nitrificación. Consiste en un depósito en el que existe un medio al que se adhieren los microorganismos, introduciéndose el agua residual por la parte inferior del reactor a través de un sistema de distribución apropiado o una cámara de alimentación. El oxígeno del aire o puro se introduce conjuntamente con el agua a tratar.

#### 2.1.1.4.- Lechos Expandidos y Fluidizados

Una biopelícula se desarrolla sobre un medio sólido de soporte que está formado por partículas tan pequeñas que permiten ser mantenidas en suspensión por medio del flujo ascendente del agua residual.

Estos medios de soporte, junto con el sistema de oxigenación y el sistema de recuperación de masa, constituyen el conjunto de variables que establecen las diversas variantes de los sistemas en uso.

El medio usado para soportar la película biológica puede ser mineral o de un material especialmente diseñado. Entre los correspondientes al primer grupo están la arena, el carbón o el vidrio en un rango de 0,2 a 3 milímetros. Las pequeñas partículas tienen una mayor área específica y una menor velocidad de asentamiento que las grandes. Entre las del segundo grupo se encuentran los toroides tejidos de propileno, la espuma reticulada de poliéster y, en general, medios plásticos o incluso metálicos (esferas de alambre de acero inoxidable).

El empleo de estos medios especialmente fabricados

es debido, principalmente, al criterio de conseguir la mayor área específica de contacto entre el medio soporte y el agua residual. De esta forma, los medios fabricados permiten el crecimiento de la película dentro de la estructura porosa interna llegándose a porosidades comprendidas entre el 92 y el 97%.

El aumento de la película biológica sobre las partículas aumenta su tamaño cambiando su forma y su densidad global. Por lo tanto expande el volumen total del lecho, lo que hace variar la velocidad del fluido que efectúa la fluidización.

El oxígeno se puede suministrar de dos formas: bien disolviendo el oxígeno de alta pureza dentro de la corriente del líquido antes de entrar en el reactor, o bien rociando con aire el propio lecho.

Para la estabilización y recuperación de la biomasa del reactor se usan fundamentalmente dos métodos. El primero permite la atracción mutua entre las partículas cubiertas de biomasa, e incluso, con las paredes del reactor para mantener un nivel uniforme de biopelícula en las partículas, y el segundo que permite el rebose de las partículas soporte a un dispositivo que separa la biomasa de las partículas.

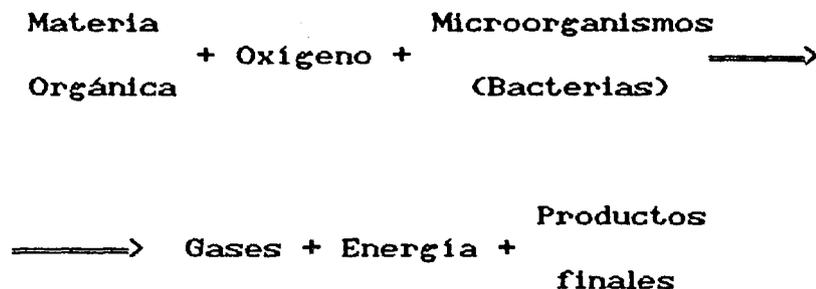
Cuando esté limitada la superficie de terreno disponible para instalar una planta de tratamiento de aguas residuales, los sistemas de lecho fluidizado poseen un considerable potencial de expansión, sobretodo para procesos que no requieran oxígeno como, por ejemplo, la desnitrificación anóxica.

### 2.1.2.- Oxidación bacteriana del Carbono orgánico

Para llevar a cabo la conversión de la materia orgánica en tejido celular, energía, gases y otros productos finales, se acude a uno de los tres procesos, ya definidos, aerobio, anaerobio o facultativo, combinándolos con procesos de cultivos en suspensión o en medio fijo.

La conversión aerobia de la materia orgánica se puede representar esquemáticamente por medio de las tres reacciones que indican los tres procesos que simultáneamente se producen en la mayoría de los sistemas de tratamiento.

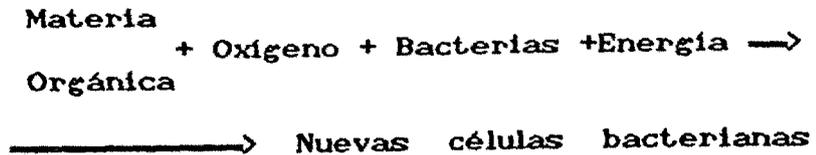
#### 1.- Oxidación



En este proceso disimilatorio se produce la energía que proviene de la oxidación de la materia orgánica e

inorgánica.

## 2.- Síntesis



En este proceso asimilatorio la energía es utilizada para la síntesis, mantenimiento y movilidad de la célula.

## 3.- Respiración endógena

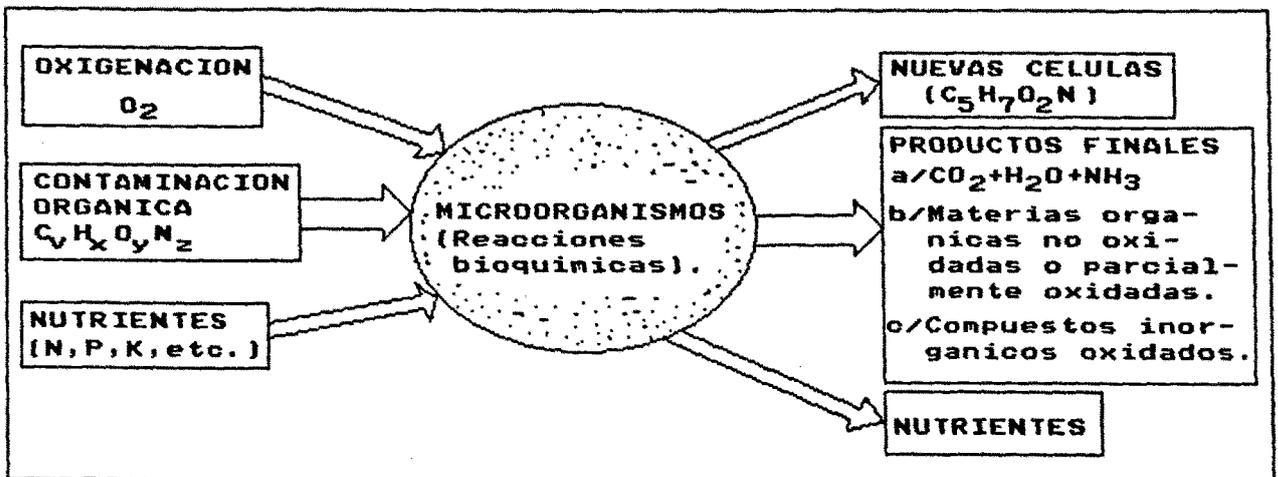
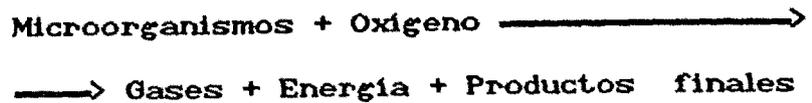


FIG.2.2.Reacciones de oxidación de la materia orgánica durante la depuración biológica aerobia.

En la figura 2.2, se muestra el conjunto de las tres reacciones.

Es evidente la importancia capital del oxígeno que constituye el requerimiento clave de un proceso aerobio. El suministro de oxígeno requiere consumo de energía, y por lo tanto es, asimismo, un factor económico a manejar correctamente en cuanto a que la tasa de consumo por parte de los microorganismos debe coincidir con la puesta a disposición del sistema de la forma más económica posible.

## 2.2.- LA BIOPELICULA O PELICULA BIOLOGICA.

### 2.2.1.- Análisis Funcional de la Biopelícula. Modelo General.

La técnica de los procesos de tratamiento biológico pasa, en primer lugar, por el conocimiento de los fundamentos biológicos, para lo cual se precisa un estudio minucioso del proceso de crecimiento, el cual, a su vez, necesita una cierta base de observación experimental. Por consiguiente, el planteamiento para el diseño y la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales es, o ha sido, muy pragmático.

Este hecho actualmente está cambiando, debido a que las demandas de hoy día, con respecto a la depuración, son más estrictas que lo que se puede llevar a cabo con simples aproximaciones pragmáticas.

El tratamiento de aguas residuales se está convirtiendo en una disciplina de biotecnología avanzada. El desarrollo de la tecnología del reactor, implica diseños más complicados, y estos diseños implican a su vez combinaciones de procesos más complejas.

Para poder diseñar y controlar configuraciones del reactor tan avanzadas, es indispensable tener un conocimiento adecuado de los mecanismos que esto lleva implícito.

Según dicta la experiencia, compuesta de teoría y práctica, el mejor marco para esa comprensión de los procesos es una formulación matemática, que implique principios básicos: químicos, físicos y biológicos.

Existe un aparente conflicto entre la aproximación pragmática del profesional y la aproximación descriptiva del teórico. Ambos puntos de vista pueden confluír en beneficio de ambos. Es decir, el modelado y la experimentación deben ser interdependientes

Entrando en el modelado matemático, se puede hacer una división en dos categorías. La empírica y la mecanicista.

La empírica, informa de la operación de entrada y salida de las variables, para cada uno de los fenómenos individuales que componen todo el proceso; mientras que los modelos mecanicistas aplican los principios de la ingeniería al reactor, combinándolos como anteriormente se dijo, con los principios químicos y biológicos que intervienen en el conjunto.

La primera etapa en el desarrollo de un modelo mecanicista de un sistema, es la reducción a los componentes esenciales que lo conforman. En el caso concreto de la película biológica se puede, en un análisis primario, establecer la relación siguiente:

- 1.- El medio soporte.
- 2.- El espesor de la biopelícula.
- 3.- La densidad de la biopelícula o la concentración de biomasa adherida al soporte.
- 4.- El agua residual con los nutrientes, y los donadores y aceptadores de electrones.
- 5.- Las concentraciones de ésta en el líquido, la interfase y la biopelícula.

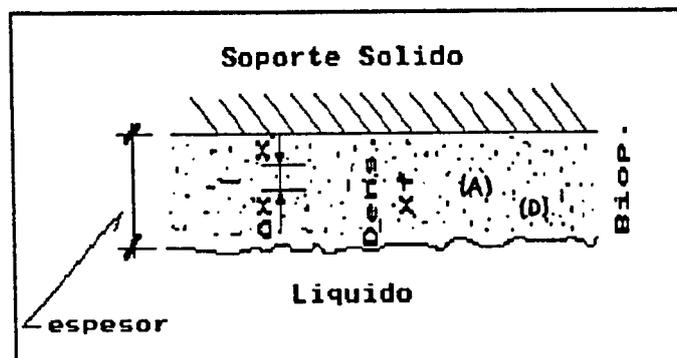


FIG. 2.3(a). Líquido conteniendo: Nutrientes, donador de electrones (D) y aceptador de electrones (A). (Fuente: Grady).

interior de la biopelícula.

Generalmente los nutrientes están en cantidad suficiente en cualquier proceso de tratamiento de las aguas residuales, por lo cual los donadores y aceptadores de electrones serán los constituyentes a considerar fundamentalmente.

El conocimiento de las concentraciones en el seno del líquido, en la interfase líquido-biopelícula y en la biopelícula es esencial. La naturaleza del proceso influye notablemente en la relación entre las concentraciones en el seno de líquido y la interfase.

Las concentraciones de donadores o aceptadores dentro de la biopelícula, en función de su profundidad, están influenciadas por:

- Las concentraciones relativas de donadores y aceptadores de electrones en la interfase.
- El espesor.
- Las propiedades físicas de la película.
- La cinética.

- La estequiometría de las reacciones bioquímicas.

De la consideración de las características esenciales descritas, se puede deducir que el modelo del desarrollo de una biopelícula, requiere conocimientos en las áreas siguientes:

- 1.- Transporte de materiales en la fase líquida.
- 2.- Estudio del espesor, densidad y composición de la biopelícula.
- 3.- Transporte y reacción dentro de la película.
- 4.- Técnicas matemáticas para resolver las ecuaciones resultantes.

## 2.2.2.- Transporte de materiales en la fase líquida.

La interfase líquida puede ser un determinante importante de la realización de un proceso de película fija.

La medida de los perfiles de oxígeno disuelto en y a través de la biopelícula, es la más clara evidencia del transporte externo de masa. De ahí la necesidad de su inclusión en el estudio (Chen y Bungay, 1981). En la figura 2.4, se observa la disposición de una curva típica de concentraciones de oxígeno en función de la distancia al medio soporte.

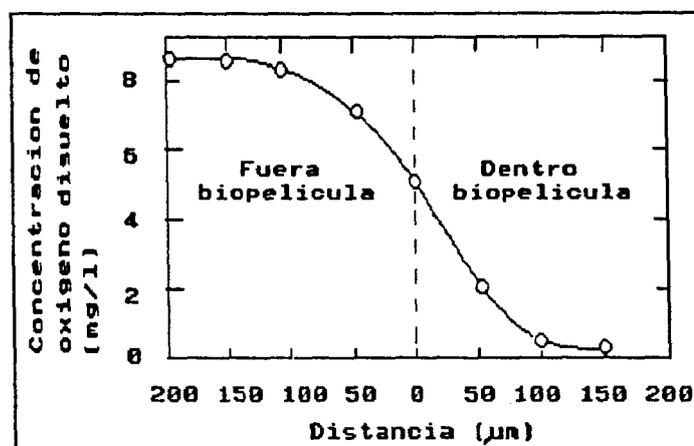


FIG.24. Perfiles de la concentración de oxígeno. (Fuente: Chen y Bungay).

Evidencias indirectas de la importancia del transporte externo de masa, se pueden obtener observando los cambios en la tasa de reacción, cuando cambia la velocidad del fluido a lo largo de una biopelícula.

El efecto del transporte externo de masa, puede ser aislado usando una biopelícula extremadamente delgada. (La Motta, 1976). Con biopelículas más gruesas, el transporte de reactantes, hace el cálculo de la tasa para el transporte externo de masas, más difícil; pero desde un punto de vista cualitativo, es posible mostrar que la tasa crece al crecer la velocidad del líquido, hasta un límite. (Trulear y Characklis, 1980; Castaldi y Malina, 1982)

Antes de modelar el proceso de transferencia de masa externa, se debe considerar la naturaleza de la biopelícula y por lo tanto su interfase líquida.

Atkinson y Howell (1976), muestran tres modelos para describir la interfase. Figura 2.5.

En el modelo pseudo-homogéneo se considera que el flujo de líquido penetra en la biopelícula formando una especie de bolsas interiores. Sería el caso de los sistemas de lechos bacterianos.

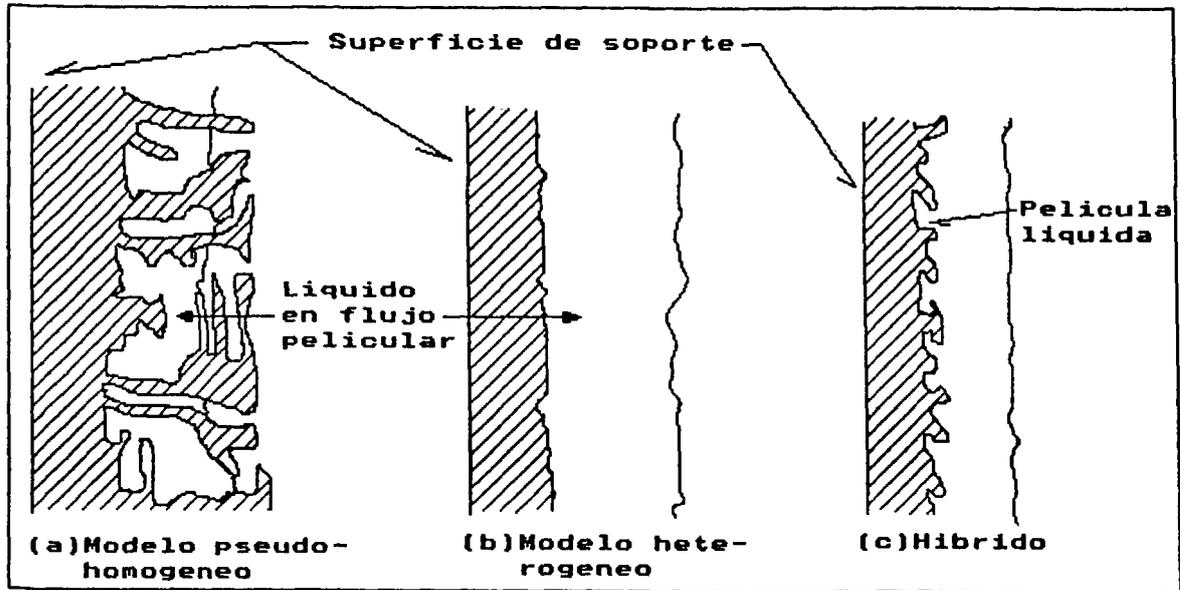


FIG.2.5 .Caracterización de la biopelícula:interfase líquida (Fuente:Atkinson y Howell).

El modelo heterogéneo se caracteriza por una clara interfase entre el líquido y la biopelícula. En este caso el transporte de masa exterior ocurre en la totalidad de la capa líquida.

Las diversas investigaciones que se han hecho sobre el tema, demuestran que la verdadera configuración de la interfase líquido-biopelícula corresponde a un modelo mixto de los dos mencionados, representado en la misma figura, y que el modelo preferido sería el heterogéneo.

La forma usual de representación, es imaginar una

hipotética película líquida estancada o estacionaria, de espesor  $L_f$ , entre la biopelícula y la fase líquida como se muestra en la figura 2.6.

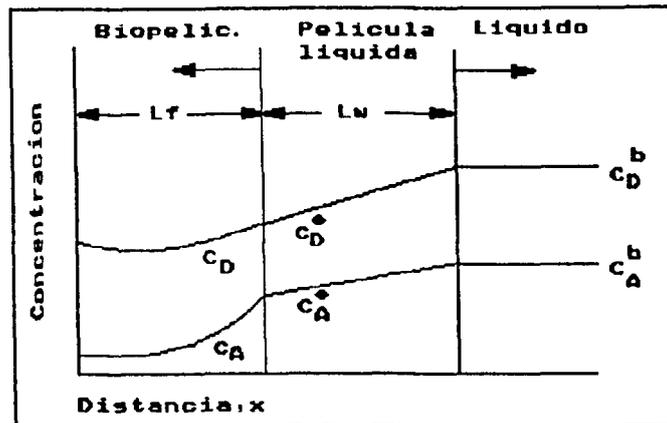


FIG.2.6 .Biopelícula idealizada, que ilustra los perfiles de la concentración de los donadores(D) y aceptores(A) de electrones. (Fuente:Grady).

Se asume que toda la resistencia al transporte de materia desde el seno del líquido a la biopelícula se produce en esta capa. Desde este punto de vista se pueden adoptar dos modelos diferentes que expresan la transferencia de flujo de masa de sustrato por unidad de área y unidad de tiempo:

$$N_s = \frac{D_s}{L_w} \left( c^b - c^* \right) \quad (2.1)$$

$$N_s = K (c^b - c^*) \quad (2.2)$$

De la comparación de estos dos modelos se deduce que la constante "k" es la relación entre la difusividad y el espesor de la película líquida, lo que permite a algunos investigadores tomar directamente esta relación de los distintos trabajos de ingeniería química, y usar entonces ecuaciones empíricas para el coeficiente de transferencia de masa (Grady y Lim, 1980; Dahodwala et al., 1976; Mueller et al., 1980).

Williamson y McCarty (1976), fundamentan que la película líquida está conformada por dos capas de espesores característicos determinados, el primero  $L_1$ , espesor externo, por la turbulencia, y el segundo,  $L_2$ , o espesor interno, determinado por las características físicas de la biopelícula. Para definir  $L_1$ , usaron las correlaciones de Welty et al. (1969). Un aproximación similar usaron Famularo et al. (1978); y Mueller et al. (1980) para modelar los RBCs.

En este último caso,  $L_2$  se estimó considerando la profundidad de las irregularidades superficiales en la biopelícula; y  $L_1$ , se calculó por la relación de Levich (1968).

Varios investigadores han usado también la Ec.(2.1), para estimar el transporte externo de masa, pero sin considerar el espesor  $L_2$ . Williamson, (1976), propone la incorporación de  $L_2$  en  $L_w$ . Mulcahy et al. (1981), usaron la expresión de Snowdon y Turner (1967), para determinar que las resistencias al transporte de masa externo, fueron despreciables para la desnitrificación en lechos fluidizados.

### 2.2.3.- Características de la Biopelícula.

La eliminación del sustrato en un medio heterogéneo (la biopelícula), es el resultado de la interacción entre:

- 1.- La tasa de transporte, y
- 2.- La tasa intrínseca de reacción.

La superficie disponible para la colonización y desarrollo de la biopelícula es una característica física del tipo de reactor a emplear, por lo cual la masa de biopelícula en el reactor resulta una función del espesor y densidad de la biopelícula.

De todas formas, es posible que no todos los microorganismos presentes en la biopelícula sean capaces de utilizar cualquier tipo de sustratos. Consecuentemente la composición de la biopelícula puede ser también un determinante importante de las tasas de reacción.

De lo dicho en estos últimos párrafos, se deduce que habrá que estudiar, dentro de las características de la

película biológica, fundamentalmente, las siguientes:

1.- Composición.

2.- Espesor.

3.- Densidad.

#### 2.2.3.1.- Composición Básica de la Biopelícula.

Las biopelículas están compuestas, fundamentalmente, por dos componentes: Las células microbianas y los Polímeros extracelulares (EPS).

Las especies microbianas y su morfología, así como la mayor parte de la composición del EPS, determinan las propiedades físicas de las biopelículas. De esta forma, la biopelícula puede ser considerada como un gel polimérico orgánico con microorganismos vivos atrapados en él.

Las propiedades de los EPS en las biopelículas, no se conocen actualmente, ni tampoco cual es su papel en la

biopelícula ecológica. Las propiedades físicas de estos polímeros, principalmente polisacáridos, pueden ser críticas para entender la conducta física y fisiológica de la biopelícula.

Las propiedades físico-químicas y biológicas de la biopelícula, son dependientes del medio en el que se ha acumulado. Los microorganismos predominantes, modifican el micromedio de manera específica de acuerdo con su actividad metabólica. Por lo tanto, las propiedades físico-químicas de las biopelículas, dependen de las mismas propiedades de sus principales componentes.

La matriz de los polímeros extracelulares, puede contener de un 50 a un 90% del carbono orgánico de la biopelícula (Bakke et al., 1984).

Los polímeros bacterianos, casi exclusivamente polisacáridos, han sido estudiados desde hace bastante tiempo, debido a sus aplicaciones industriales por Sandford y Baird, (1983), pero las propiedades físicas de éstos, han recibido muy poca atención por parte de otros investigadores.

La microscopía electrónica, ha posibilitado el estudio de algunos biopolímeros (Mikkelsen et al., 1985;

Lamblin et al, 1979).

Los EPS de alguna bacteria aislada de la biopelícula, son de composición similar a los típicos polisacáridos bacterianos aislados de bacterias suspendidas o planctónicas (Corpe, 1970; Uhlinger y White, 1983; Christensen et al., 1985).

Los polisacáridos se clasifican en: específicos y no específicos (Kenne y Lindberg, 1983). Los polisacáridos específicos, llamados algunas veces antígenos (Jann y Jann, 1977), tienen como constituyentes típicos los azúcares comunes: glucosa, galactosa, ácido glucurónico... Los polisacáridos aislados de dos bacterias de biopelículas marinas "Pseudomonas atlantica" (Corpe, 1970; Uhlinger y White, 1983), y "Pseudomonas sp." (Christensen et al., 1985), seguramente pertenecen a este grupo.

Los polisacáridos no específicos son estructuralmente diferentes y, generalmente, más simples que los específicos. Algunos de ellos son homopolisacáridos, conteniendo sólo un monómero.

Hay tres formas básicas de polímeros: esférica, de varilla y espiral. Figura 2.7.

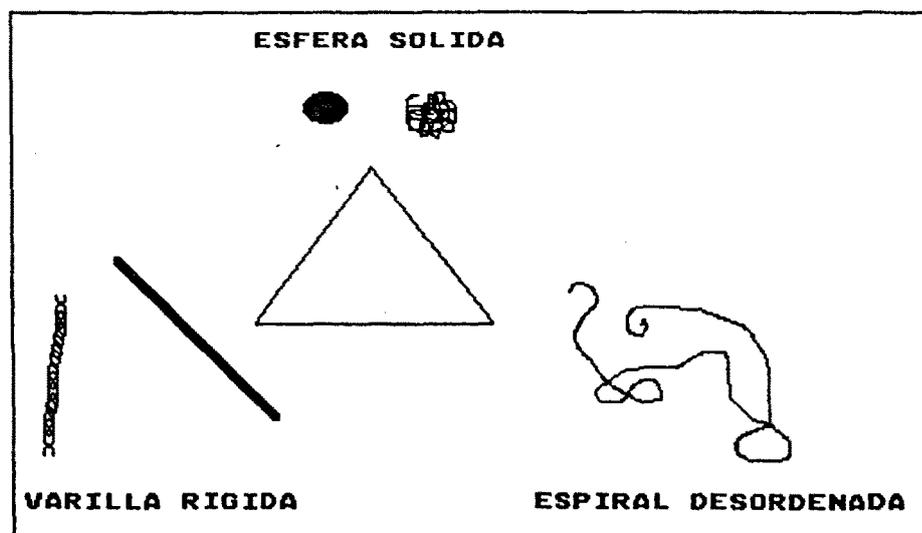


FIG. 2.7 .

La mayor parte de las bacterias tienden a adherirse más en superficies hidrofobas que hidrófilas (Fletcher y Loeb, 1979; Pringle y Fletcher, 1983). La base molecular para la hidrofobia no ha sido establecida. Por esta causa, no se sabe por qué algunas otras bacterias se oponen a adherirse a esas superficies hidrófobas (Dexter, 1979; Dexter et al., 1975). Se ha sugerido, por una parte, que los polímeros ácidos, semejantes a los polisacáridos, están sujetos a los procesos de adsorción microbiana; por otra parte, los polisacáridos se consideran, generalmente, hidrófilos. Las proteínas, sin embargo, pueden contener aminoácidos con grupos típicamente hidrófobos, y, por esta causa, servir como "adhesivos poliméricos", de acuerdo con las consideraciones

puramente físico-químicas (Paul y Jeffrey, 1985). Sin embargo, los polisacáridos pueden mostrar ambas propiedades (Symes, 1982).

Un biopelícula está compuesta principalmente de agua. Los rangos reportados están en el orden del 87-99% (Kornegay y Andrews, 1967; Characklis et al., 1981; Zilver, 1979). Characklis et al.(1981), han obtenido rangos del 98,1 al 99%, basados en 63 determinaciones de 9 experimentos usando una biopelícula de población mixta. La carga de Glucosa fué variable (0,06-1,14 mg/m<sup>2</sup>.s).

Las biopelículas son, generalmente, hidrófilas. Los EPS, son los principales responsables de este hecho, debido a los polisacáridos (el mayor componente de los EPS).

La cantidad y composición de los EPS y materias inorgánicas (Ca<sup>+2</sup>), influyen en el contenido de agua.

### 2.2.3.2.- Composición elemental de la Biopelícula.

La cantidad relativa de componentes inorgánicos y orgánicos en la biopelícula, puede determinarse por secado ( $103^{\circ}\text{C}$  , 1 hora), y combustión a  $550^{\circ}\text{C}$ . Los sólidos fijos y volátiles reflejan, generalmente, las fracciones orgánica e inorgánica de la biopelícula. En estas pruebas, se admite que puede haber errores producidos por la combinación de las sales carbonatadas con el agua que se volatilizan a altas temperaturas. De la fracción volátil se han obtenido resultados tan altos como el 80% de una biopelícula seca, con predominio de componentes bióticos (Kornegay y Andrews, 1967). Sin embargo, la fracción volátil de una biopelícula puede ser considerablemente más baja que la fracción volátil de una población microbiana en suspensión (>90% de sólidos volátiles).

La relación C/N en algunas biopelículas, es considerablemente más altas que en las células microbianas (aproximadamente 5). Esta relación tan alta, puede reflejar una gran proporción de EPS (generalmente bajas en Nitrógeno), o una preponderancia de las sales carbonatadas.

El componente inorgánico de las biopelículas,

influyen en las propiedades físicas de las mismas. Turakhia et al. (1983), demostraron la importancia del calcio en la resistencia mecánica de la biopelícula. Characklis et al. (1983), demostraron que los productos de corrosión quedan atrapados en la biopelícula influyendo en las propiedades macroscópicas de la biopelícula (densidad y rugosidad).

En las biopelículas que se forman en ambientes con cloro, han aparecido altos niveles de hierro y manganeso (seguramente procedente de las bombas o tuberías del sistema).

### 2.2.3.3.- Composición Biológica de la Biopelícula.

La mayoría de los modelos tratan la biopelícula como un conjunto homogéneo, aunque también hay otros que incluyen los cambios observados en la población microbiana.

Se debe tener presente que una comunidad de microorganismos puede englobar diversos estratos microbianos con características divergentes, tanto metabólicas como difusionales. (Alleman y Veil, 1981)

Bryers (1982), ha intentado la más ambiciosa modelización espacial de los perfiles dentro de la biopelícula. Este modelo puede predecir el perfil de las bacterias heterótrofas, Nitrosomonas y Nitrobacter. También considera los perfiles del sustrato por  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{O}_2$  y carbono orgánico (acetato). La técnica de elementos finitos es la usada para integrar las expresiones de tasa de sustrato limitante en función del tiempo y la distancia. De este modo se muestran los cambios dentro de la biopelícula.

#### 2.2.3.4.- Espesor de la Biopelícula.

El espesor de la biopelícula es, a menudo, una característica importante en los procesos de análisis de la biopelícula. Si se conoce, se puede calcular la longitud difusional, la resistencia por fricción y la transmisión del calor.

El espesor de la biopelícula puede variar considerablemente debido a las características morfológicas de la biopelícula (Bakke, 1986).

La variación en el espesor, está también en función de la edad de la biopelícula. También parece estar influenciado el espesor por la diversificación de las especies microbianas. Con poblaciones homogéneas, por ejemplo, de *Pseudomona Aeruginosa*, la biopelícula raramente excederá el espesor de 50  $\mu\text{m}$  (Trulear, 1983; Bakke, 1986), mientras con poblaciones mixtas, bajo las mismas condiciones, se consiguen espesores de casi tres veces más (120  $\mu\text{m}$ ) (Characklis, 1980).

Quando se considera el espesor de la película

biológica es importante distinguir entre:

- 1.- Espesor Total.
- 2.- Espesor activo.

Atkinson y Fowler (1974), dedujeron en sus investigaciones que el espesor total de una película biológica está entre los 0,07 y 4 milímetros. Además, con el fin de clasificar mejor en cuanto a las condiciones de la fase de crecimiento, subclasificaron las biopelículas en:

- 1.- Las sujetas a control mecánico e hidrodinámico.
- 2.- Las no controladas.

Las primeras abarcan las comprendidas entre 0,07 y 0,2 milímetros de espesor; las segundas hasta los ya mencionados 4 milímetros.

También una segunda subclasificación podría estar hecha en función del régimen de flujo, asegurándose que en los sistemas de flujo turbulento el espesor raramente excede de 1 milímetro.

Las películas gruesas, no controladas, no son aptas

para realizar eficientemente la función de eliminación del sustrato. Por el contrario, las películas delgadas al no oponer una resistencia a la difusión tan elevada, contribuyen eficazmente a dicha eliminación.

Se puede entonces empezar a hablar del concepto de capa activa, que se puede definir como el espesor de la película donde la concentración de nutrientes baja a cero.

Hay dos tipos de evidencias que demuestran su existencia. La más clara está basada en observaciones de los cambios en la tasa de eliminación del sustrato en función de la profundidad de la película. Esas observaciones demuestran que la tasa de consumo de sustrato crece a medida que la profundidad de la película crece hasta una profundidad límite comprendida entre 70 y 100  $\mu\text{m}$ .

La profundidad a la cual se extiende el valor máximo de consumo de sustrato se define como la profundidad activa.

Bungay et al. (1969), demostraron igualmente, que la tasa de sustrato eliminado crece hasta un máximo con la profundidad. La demostración consistió en determinar los perfiles de oxígeno dentro de la biopelícula. Los resultados

indican que la respiración cesa a profundidades entre 50 y 150  $\mu\text{m}$ , dependiendo, sobretudo, de la concentración de sustrato en el medio.

Esto afianza la tesis de que sólo los microorganismos en la capa activa contribuyen a la eliminación de sustrato.

Similares observaciones hicieron Hoehn y Ray, (1973) y Chen y Bungay, (1989) como muestra la figura 2.8.

Las últimas investigaciones también fundamentan que a bajas concentraciones de sustrato en el seno del líquido, la concentración de oxígeno en la biopelícula alcanza un valor constante a cierta profundidad, de este modo se demuestra que la capa activa puede definirse por medio del agotamiento de los aceptadores y donadores de electrones.

Se acepta entonces que el espesor activo de la biopelícula es el resultado de las limitaciones de transporte dentro de la misma.

Sólo cuando la película es muy delgada, como antes se indicó, o cuando la tasa de transporte es grande respecto a la tasa de reacción, el espesor activo se aproxima al

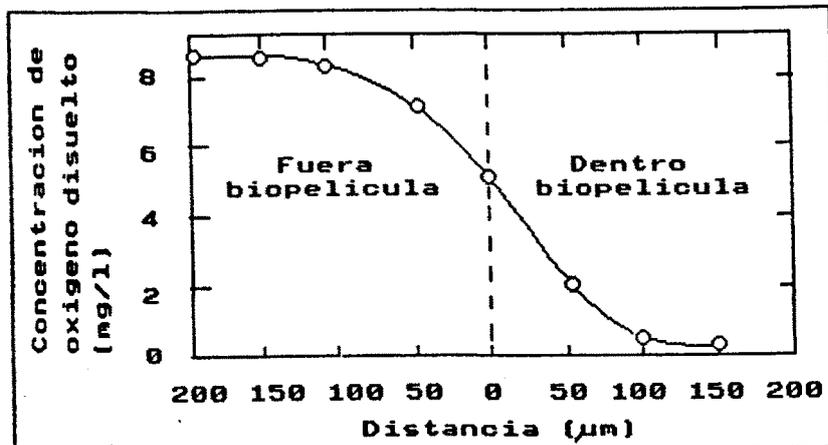


FIG.28. Perfiles de la concentración de oxígeno. (Fuente: Chen y Bungay).

espesor total. Para algunos reactores de película fija estas circunstancias no existen, y como resultado el espesor total no impacta en el desarrollo del reactor.

Básicamente una película crece en espesor, y perdura mientras que la velocidad o tasa de pérdida de biomasa por envejecimiento y por fricción, no supere la velocidad de crecimiento de los microorganismos.

En un régimen altamente turbulento, la fricción

puede ser constante y apreciable. En este caso la película raramente excede de las 1.000  $\mu\text{m}$ .

Para un régimen turbulento bajo, se pueden desarrollar biopelículas en estado estacionario o permanente cuando las concentraciones de sustrato útil son bajas, porque entonces las células decaen en su crecimiento.

Uno de los estudios más completos sobre crecimiento de la biopelícula, fué el realizado por Trulear y Characklis, (1982). En su investigación en un reactor anular consistente en dos cilindros concéntricos, uno estacionario y otro rotativo, analizaron el efecto de la velocidad rotacional que determinó la tensión de corte en la biopelícula. La interfase líquida y la velocidad de desprendimiento crecía a medida que lo hacía la velocidad de giro. Figura 2.9.

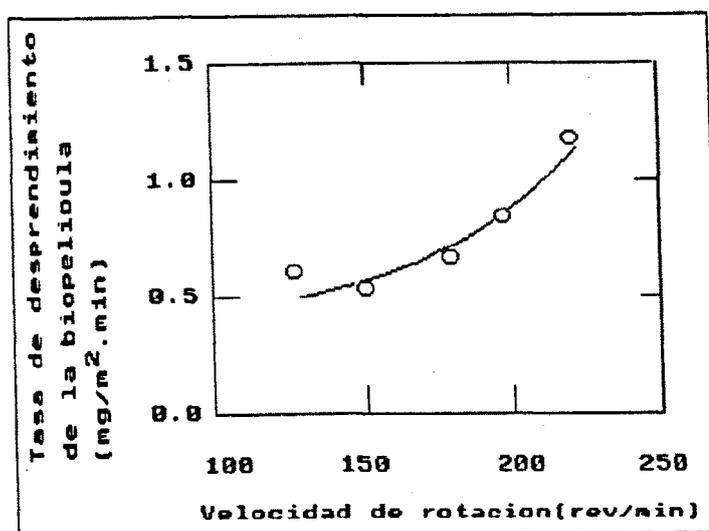


FIG. 2.9 .Efecto de la velocidad de rotacion sobre la tasa de desprendimiento. (Fuente:Trulear y Characklis).

Este hecho sugirió que la tasa de biopelícula desprendida aumenta con la fuerza del cortante en la interfase líquida.

Además, como muestra la figura 2.10, la tasa de desprendimiento también crece a medida que lo hace la masa de biopelícula.

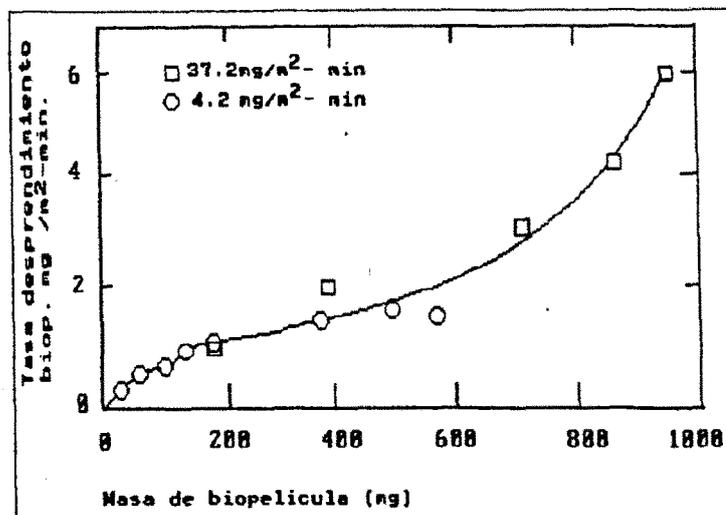


FIG.2.10. Efecto de la masa de biopelícula, a velocidad constante, en la tasa de desprendimiento de la biopelícula (Fuente: Trulear-Characklis).

Rittmann y McCarty (1980), han asumido que una biopelícula en estado estacionario permite hacer un balance entre el crecimiento y el envejecimiento celular. Es decir, no hay ningún término explícito en su modelo que indique la función de la fricción en el desprendimiento de la biopelícula.

Asimismo se asume que el aumento total de biomasa es justamente el que puede ser soportado por el flujo de sustrato, por lo que el espesor de la biopelícula en estado estacionario puede ser deducido igualando la energía disponible y la empleada en el mantenimiento.

En virtud del reconocimiento del efecto del esfuerzo cortante, Rittmann amplió el modelo e incorporó este efecto al mismo. Se basó para ello en los análisis de Trulear y Characklis, (1982) que conceptuaron que la tasa de desprendimiento depende del espesor de la biopelícula, de la masa, y del cortante.

A partir del modelo básico, empleado en un gran rango de casos, modifica la tasa de envejecimiento o de respiración endógena incluyendo en ella el efecto del desprendimiento por cortante.

Para biopelículas menores de 30  $\mu\text{m.}$ , el

desprendimiento debido a la fricción es función del cortante, mientras que para películas de mayor espesor será además función del espesor.

Howell y Atkinson (1976), han estudiado el fenómeno desde el punto de vista de estado transitorio o dinámico, ya que para el propio modelado del reactor, es fundamental el desarrollo de los modelos matemáticos y conceptuales más exactos.

### 2.2.3.5.- Densidad de la Biopelícula.

Para permitir el cálculo de la tasa de reacción, que es función de la masa de microorganismos presente, se debe relacionar la densidad con el espesor y la superficie.

Aunque generalmente se toma la densidad como un factor independiente del espesor, hay múltiples evidencias de que no es este el caso.

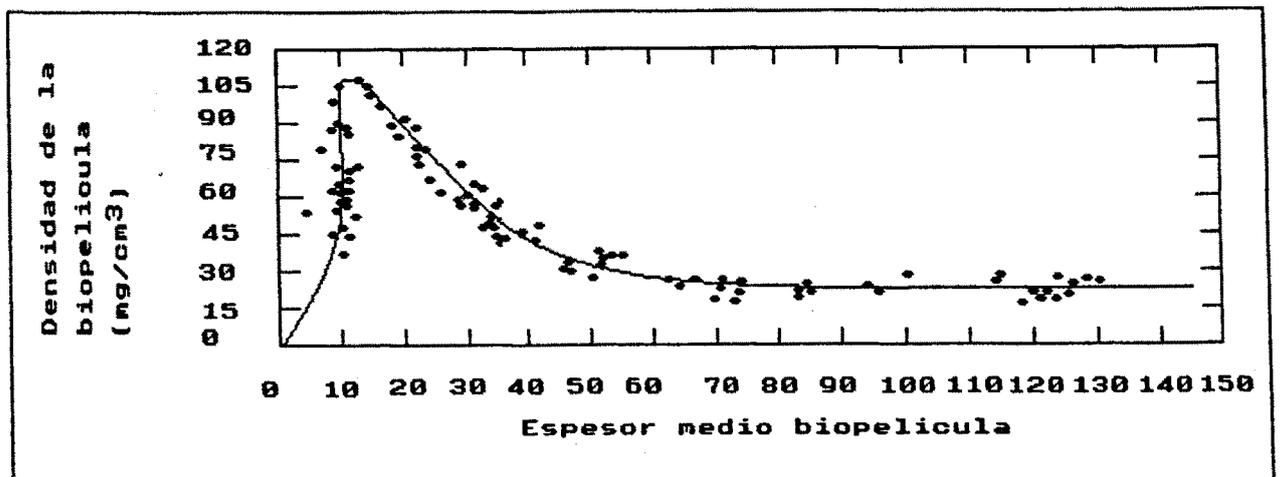


FIG. 2.11 .Efecto del espesor de la biopelícula sobre la densidad. (Fuente:Hoehn y Ray).

Los primeros investigadores que descubrieron que la densidad de una película biológica depende del espesor, fueron Hoehn y Ray (1973), que obtuvieron los resultados que muestra la figura 2.11.

Se observa que la densidad pasa por un máximo que coincide con el espesor activo, por lo que se postuló que los cambios de densidad son debidos a las variaciones de población microbiana dentro de la película.

La más baja cota de densidad corresponde a la zona anaerobia y el motivo puede ser la lisis celular.

Hay varios factores que pueden ser responsables de los cambios de densidad, desde la lisis, planteada por Hoehn y Ray (1973), a los cambios del cultivo morfológico observados por Trulear y Characklis (1980). La investigación fundamental requiere, entonces, describir los mecanismos y su importancia.

Un desarrollo selectivo de ciertas especies microbianas, puede influenciar el valor de la densidad de la biopelícula. Picologlou et al., 1980; Trulear y Characklis, 1982; McCoy y Costerton, 1982, observaron el predominio de microorganismos filamentosos en biopelículas de baja densidad

(< 40 Kg/m<sup>3</sup>). En cambio, Jensen y Woolfolk (1985) han observado *Pseudomonas* (consideradas no filamentosas) en biopelículas de este tipo.

Los valores extremos de las densidades obtenidas, oscilan entre los 130 Kg/m<sup>3</sup> (Kornegay y Andrews, 1967) en biopelículas mixtas, estado estacionario, y los 10 Kg/m<sup>3</sup> (Characklis, 1980). Hoehn y Ray (1973), llegaron a densidades del orden de los 105 Kg/m<sup>3</sup>.

El tipo de sustrato, también puede influir en el valor de la densidad. Turakhia (1986) observó que aumentando la concentración de calcio, aumenta la densidad celular de la biopelícula.

La densidad puede ser significativamente alta en ambientes que contienen partículas suspendidas de sales inorgánicas con baja solubilidad, que llegan a integrarse en la biopelícula.

Al modelar la densidad pensando en determinar la tasa de reacción, puede surgir la duda de usar un valor constante. También puede suponer un cierto problema cuando se piensa incluir factores correctores en un modelo en el cual la eliminación de sustrato sólo ocurre en la capa

activa.

Si por otra parte, la densidad es importante para deducir otros parámetros, tal como la altura en un modelo de lecho fluidizado, podría pensarse en que un valor de densidad variable no tendría demasiado sentido. La solución, entonces, debe plantearse, prácticamente, para cada proceso.

#### 2.2.3.6.- Reología de la Biopelícula.

Una biopelícula no es una sustancia rígida. La matriz EPS, se comporta como un gel. Las propiedades reológicas de la biopelícula influyen en la transferencia de masa en la interfase biopelícula-agua.

Mediciones realizadas con un reogniómetro Weissenburg en una biopelícula de población mixta (Characklis, 1980), indicaron que la biopelícula es viscoelástica. El módulo de elasticidad es del mismo orden que el de una proteína gel de enlaces transversales que tenga el mismo contenido de agua.

Las propiedades viscosas de la biopelícula contribuyen al aumento de la resistencia friccional del fluido.

#### 2.2.4.- Transporte y reacción dentro de la biopelícula.

Una vez transportados el donador y el aceptador de electrones a la superficie de la biopelícula, es necesario que penetren en su interior donde van a reaccionar. Estos fenómenos de transporte y reacción son simultáneos y las concentraciones de aquéllos reflejarán las velocidades relativas.

La capacidad de reacción en la biopelícula depende de las concentraciones. El corazón de un modelo biopelícula son la conceptualización y la expresión matemática de los fenómenos simultáneos de transporte y reacción.

Las células están unidas en disposiciones geométricas complejas y tienen una cierta clase de distribución espacial. La mayoría de los modelos asumen que su distribución es uniforme a lo largo y ancho de la biopelícula.

El carácter gelatinoso de la matriz de la biopelícula contribuye al pequeño transporte convectivo de los constituyentes reactivos dentro de la biopelícula y

permite la difusión de los donadores y aceptadores de electrones.

De nuevo es la Ley de Fick la que controla dicha difusión:

$$N = D_e \frac{dC}{dx} \quad (2.3)$$

La difusión efectiva está representada por  $D_e$ , y refleja el hecho de que la difusión en la biopelícula es retardada por la constitución gelatinosa de la matriz.

Si se realiza un balance de materia respecto a un elemento diferencial en una biopelícula en estado estacionario y de composición microbiana homogénea, resulta la siguiente ecuación reconocida y usada para modelar las reacciones dentro de las biopelículas:

$$- D_e A \left. \frac{d C}{d x} \right|_x + D_e A \left. \frac{d C}{d x} \right|_{x+\Delta x} + r A \Delta x = 0 \quad (2.4)$$

"A" es la superficie total normal a la dirección de la difusión "x". La determinación de la difusividad y de la velocidad de reacción "r", permite conocer la naturaleza del gradiente de concentración resultante y sobre todo el fenómeno global.

#### 2.2.4.1.- Coeficiente de Difusión Efectiva.

Reconocida la importancia de la difusión para modelar los reactores de biopelícula fija, hay sorprendentemente poco acuerdo acerca de su cuantificación.

Esto se debe en parte al hecho de que el carácter particular de una biopelícula depende del tipo de organismos que crecen en ella, pero también es probable que sea debido a las diferentes técnicas que se usan para estimar este coeficiente.

Hay un método directo para medir  $D_e$ , que consiste en medir el gradiente de concentración a través de la biopelícula y relacionarlo con el flujo de materiales.

Bungay et al. (1971), han experimentado la difusión del oxígeno en cultivos de laboratorio y en las biopelículas de los lechos bacterianos.

El coeficiente para biopelículas de laboratorio llegó al 80 % del valor en agua, mientras que el coeficiente en biopelículas de crecimiento en campo, estuvo alrededor del 35%.

Las diferencias entre los valores hallados se atribuyen a los diferentes cultivos de las dos biopelículas.

Otra técnica directa, es situar una película en una cámara especial, la cual permite la difusión de un componente a través de ella con lo cual se permite medir el flujo y, conociendo el espesor, determinar la difusividad.

Tres investigadores han usado esta técnica (Williamson y McCarty, 1976; Matson y Characklis, 1976; Pipes, 1974) y los valores obtenidos son, según los casos, unos superiores al 80% de su valor en el agua, otros entre el

6 y el 60% y otros entre el 10 y 30%. Como anteriormente se ha dicho, las especies microbianas son el factor determinante de las características difusionales diferentes.

Otras técnicas empleadas son las basadas en las mediciones realizadas durante los regímenes variables de funcionamiento, y posterior ajuste de curvas de datos experimentales (Andrews y Tien, 1981; Mulcahy et al., 1981).

Siegrist y Gujer (1985), han indicado que un decrecimiento en el coeficiente de difusión, se produce con incrementos del espesor de la biopelícula (colonias mixtas).

El coeficiente de difusión de la biopelícula varía al hacerlo la rugosidad de la misma, y ésta última crece con la edad. (Bakke, 1986).

Los EPS, pueden constituir una barrera para la difusión. La difusividad a través de un gel poliméricos, disminuye al aumentar la densidad de la biopelícula (Siegrist y Gujer, 1985).

Itamunoala (1987), observó que el coeficiente de difusión para la glucosa en el gel alginato cálcico, fué el 24% más bajo que en el agua. El coeficiente de difusión

disminuyó con la disminución de la concentración de glucosa, a partir de concentraciones menores de  $18 \text{ Kg/m}^3$ . Incrementando la concentración de alginato, disminuyó el coeficiente de difusión.

Otros factores que influyen en la difusión en geles, y probablemente en las biopelículas, incluyen: las fuerzas electrostáticas (Potencial Donnan); el pH; la composición iónica y la resistencia iónica.

#### 2.2.4.2.- Biocinética Básica.

Como ya se ha mencionado, muchos procesos biológicos de depuración de las aguas residuales pueden perseguir uno o más de los propósitos siguientes:

- 1.- Eliminación de la materia orgánica soluble.
- 2.- Nitrificación.
- 3.- Desnitrificación.

Sea cual sea el fin del sistema de tratamiento, debe haber en el proceso, un transporte de un donador de electrones y de un aceptador de ellos.

En los procesos que se enfocan para la eliminación de la materia orgánica soluble, esa materia orgánica sirve como donador de electrones y el oxígeno como aceptador.

Cuando el objetivo es la nitrificación, el  $\text{NH}_4^+$ , sirve como donador de electrones y el oxígeno de nuevo es el aceptador. Algunos modelos de nitrificación buscan especificar también la producción y subsiguiente oxidación del  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  pero la mayoría considera simplificada mente sólo la oxidación del  $\text{NH}_4^+$ .

Finalmente cuando es la desnitrificación la meta del proceso, el  $\text{NO}_3^-$  sirve como aceptador terminal de electrones, y alguna forma de materia orgánica sirve como donador.

Estas consideraciones sugieren la posibilidad de escribir las expresiones de la velocidad de reacción en función de las concentraciones de donadores y aceptadores de electrones.

En el caso más general, las reacciones dentro de la

biopelícula pueden ser controladas por las concentraciones de los donadores y aceptadores de electrones. Si la concentración de uno es mucho mayor que la del otro, entonces sólo controla un constituyente. Por esto las expresiones generales están hechas en función de uno sólo de los constituyentes.

El crecimiento de las células y la oxidación del sustrato son reacciones que se interrelacionan. La constante de proporcionalidad es la producción de crecimiento verdadero,  $Y_g$ . Además, la tasa de crecimiento celular es proporcional a la concentración o densidad de células dentro de la biopelícula,  $X_f$ .

La tasa de crecimiento bacteriano,  $r_g$ , tiene como expresión la de la ecuación:

$$r_g = \mu X_f \quad (2.5)$$

La tasa o grado de utilización del sustrato,  $r_{su}$ , se puede expresar en función de la tasa específica de eliminación de sustrato,  $q$ .

$$-r_{SU} = q X_f$$

(2.6)

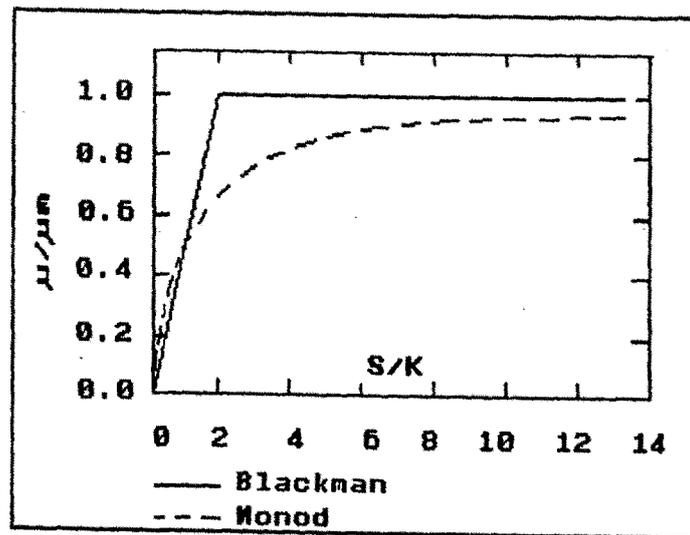


FIG. 2.12. Modelos de cinética de Blackman y Monod

(Fuente Badar).

Estas ecuaciones conducen a una serie de modelos que relacionan la tasa de crecimiento específico de las bacterias ( $\mu$ ), y la concentración de un nutriente simple limitante. De estos modelos muchos son empíricos, por lo que es necesario limitar el estudio a los más importantes.

Los dos más usados son: Monod y Blackman. (Figura 2.12).

En este punto se describen las ecuaciones correspondientes a las dos cinéticas, comparándolas entre sí.

La expresión de Monod es la siguiente:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (2.7)$$

La correspondiente de Blackman:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{2 K_s} ; \text{ Si } S < 2 K_s \quad (2.8)$$

$$\mu = \mu_m ; \text{ Si } S \geq 2 K_s \quad (2.9)$$

El modelo de Monod es el modelo más empleado para describir la eliminación de la materia orgánica soluble y la oxidación del  $\text{NH}_4^+$  en los reactores de película fija, bajo la condición de que el aceptador de electrones está presente en concentración ilimitada.

Por otra parte, el modelo Blackman está muy extendido en los sistemas de desnitrificación en películas fijas, cuando es alta la concentración de donadores y aceptadores de electrones.

Como se dedujo anteriormente, es probable que las concentraciones de aceptadores y de donadores puedan limitar la velocidad de reacción. Por tanto sería conveniente poder disponer de un modelo general que abarcara todos los tipos de limitaciones por doble sustrato.

Una revisión del estado actual de la cuestión plantea dos teorías clasificadas como:

- 1.- No interactiva.
- 2.- Interactiva.

La primera teoría sostiene que la tasa de

crecimiento específico de cualquier organismo, sólo puede ser limitada por un sustrato en el tiempo. Por esto, la tasa de crecimiento específica puede ser igual a la más baja tasa que pueda ser prevista en los diferentes modelos de un sólo sustrato.

Para el modelo de Monod se puede escribir, a partir de una reestructuración de la ecuación general indicando los límites definidos y caracterizándola con los subíndices correspondientes a "donador" (D) o "aceptador" (A), como sigue:

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S_D/K_D}{1 + \frac{S_D}{K_D}}; \quad \text{Si } \frac{S_D}{K_D} < \frac{S_A}{K_A} \quad (2.10)$$

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S_A/K_A}{1 + \frac{S_A}{K_A}}; \quad \text{Si } \frac{S_A}{K_A} < \frac{S_D}{K_D} \quad (2.11)$$

Para la cinética de Blackman, teniendo en cuenta

el criterio de la no interacción, sería

Si  $S/K_s < 2$  :

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S_D}{2 K_D} \quad (2.12)$$

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S_A}{2 K_A} \quad (2.13)$$

$$\text{Si } S/K \geq 2 ; \mu/\mu_m = 1 \quad (2.14)$$

Por otra parte el concepto de interactivo se basa en que si los dos sustratos están presentes en concentraciones más bajas que las de saturación, entonces los dos afectan a toda la tasa de crecimiento específico de los organismos.

Un tipo de modelo interactivo se construye

multiplicando - combinando los modelos vistos para cada uno de los sustratos. Es decir, se pueden construir seis categorías de modelos que describen la tasa de crecimiento específico de los microorganismos en la biopelícula.

De esta forma se puede hablar del "modelo Monod de doble sustrato interactivo o no interactivo", "modelo Blackman de doble sustrato interactivo o no interactivo", o los ya mencionados de "sustrato simple de Monod o de Blackman".

La ecuación (2.5), debe ser corregida por medio de dos términos que indican las pérdidas por envejecimiento de las células y por la fricción. De esta corrección resulta la expresión del crecimiento neto de las células,  $r_x$ .

$$r_x = \mu X_f - b X_f - r_a \quad (2.15)$$

El envejecimiento está representado por el coeficiente  $b$ , y la fricción por  $r_a$ .

La tasa constante  $b$  puede ser un valor fijo o una función de la concentración del aceptador de electrones: (por ejemplo el oxígeno).

$$b = \frac{b' C_A}{K_A + C_A} \quad (2.16)$$

La tasa de utilización del aceptador de electrones,  $r_A$ , se puede describir estequiométricamente para las tasas de oxidación del donador de electrones en la síntesis y el envejecimiento de la célula.

$$-r_A = \frac{\mu X_f}{Y_{gA}} + \frac{b X_f}{Y_b} \quad (2.17)$$

En esta ecuación se ha introducido por una parte, un factor de conversión que corresponde a la masa celular producida por la síntesis de la totalidad de aceptadores de electrones, y por otra parte por un factor que representa la masa celular perdida por envejecimiento,  $Y_b$ .

Si el oxígeno es el aceptador de electrones,  $Y_{gA}$  se expresa en función de  $Y_g$ , que representa la producción neta de crecimiento.

$$Y_{gA} = \frac{Y_g}{1 - \beta Y_g} \quad (2.18)$$

$\beta$  es el oxígeno equivalente a la materia celular (con frecuencia se toma 1,25 mg de  $O_2$  ó DQO/mg de células, o 1,44 mg de  $O_2$  ó DQO/mg de sólidos volátiles).

La inversa de  $\beta$  es  $Y_b$ . Es decir:

$$\beta = \frac{1}{Y_b} \quad (2.19)$$

Cuando se trata de un proceso de desnitrificación, es decir, cuando el  $NO_3^-$  es el aceptador de electrones,  $Y_{gA}$  está dado por

$$Y_{gA} = \frac{2,86 Y_g}{1 - \beta Y_g} \quad (2.20)$$

Valiendo en este caso  $Y_b$ :

$$Y_b = \frac{2,86}{\beta} \quad (2.21)$$

Si se trata de un proceso de nitrificación, el donador de electrones será el  $\text{NH}_4^-$  en lugar del DQO, por lo que habrán de emplearse los apropiados factores de conversión en todas las ecuaciones anteriores.

#### 2.2.4.3.- Análisis Estequiométrico.

Dos procesos cuantitativos son esenciales para el diseño, análisis y control de la biopelícula: (1) la estequiometría y (2) las cinéticas.

La estequiometría se asocia, generalmente, con el equilibrio en un sistema químico o abiótico, y describe la extensión de un proceso. Se define como la información que relaciona las cantidades de reactantes consumidos para las cantidades de productos formados. Necesariamente las transformaciones de energía ocurren durante una reacción, en un sistema abiótico esos cambios de energía son descritos por la estequiometría.

Es conveniente y útil conocer si las ecuaciones teóricas desarrolladas, describen la producción y/o los requerimientos de oxígeno, por medio de la energía libre de oxidación del nutriente limitante.

Roels (1983), ha desarrollado los antecedentes y la metodología para estimar "a priori" las tasas de reacción. Busch (1971), obtuvo experimentalmente y teóricamente diversas tasas estequiométricas, entre las que se encuentran las correspondientes a la glucosa. Los valores obtenidos fueron: la observada 0,44 g de biomasa/g de oxígeno, y la teórica 0,42 g de biomasa/g de oxígeno.

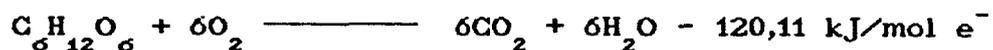
Cuando es conocido el metabolismo, la producción de ATP por unidad de sustrato ( $Y_{ATP/S}$ ), puede ser calculada y la tasa de biomasa teórica, determinada (Servizi y Bogan, 1963).

Bauchop (1958) y Bauchop y Elsdén (1960), dedujeron las bases para los cálculos anteriores y determinaron el valor de  $Y_{ATP/S}$  de los experimentos realizados con un limitado número de organismos. Payne (1970), verificó los valores anteriores.

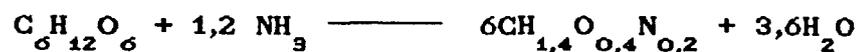
La síntesis y los productos de oxidación de las reacciones microbianas de crecimiento, se expresan, generalmente, por tasas. El reactante de interés es, usualmente pero no necesariamente, el factor limitante.

La estequiometría que describe un sistema microbiano de crecimiento, en el cual la glucosa es el sustrato, es la siguiente: (Sistema definido por Busch, 1971).

Energía:



Síntesis:



Estequiometría total:



Esta ecuación representa la ecuación estequiométrica para la eliminación de la glucosa por medio de un reactor "batch" ,con población microbiana mixta. La reacción se completa cuando se consume totalmente la glucosa.

Como se observa, la reacción estequiométrica es la suma de las reacciones de energía y síntesis.

Se han realizado intentos para expresar la composición celular, a partir de las fórmulas moleculares simples tales como:  $C_4H_8O_2N$  (Mayberry et al.,1968) o  $C_5H_7N_2$  (Porgues et al, 1956). Los estudios de diversas células bacterianas, cada una de ellas con fórmulas empíricas diferentes (Herbert, 1976; Harrison, 1967; Kok y Roels, 1980; Wang et al., 1976; Bauer y Ziv, 1976; Turakhia, 1986), conducen a fórmulas elementales que contienen un átomo gramo de Carbono. Herbert (1976) aboga por el uso de C-moles por las razones siguientes:

- El contenido de carbono en los microorganismos varía con las condiciones de crecimiento y el nutriente limitante.
- El carbono es el elemento más abundante en la célula, tanto

que el cambio en otros elementos, tiene poco efecto en el peso.

-El balance de carbono tiene una gran importancia, generalmente.

La composición química de los microorganismos puede estar considerablemente afectada por la tasa de crecimiento y por la naturaleza del nutriente limitante (Herbert, 1958, 1961).

Characklis y Dydek (1976), observaron incrementos en la cápsula y en la mucosa de las bacterias en una biopelícula al haber incrementado la relación C/N en el agua.

Robinson et al. (1984) y Bakke et al. (1984) estructuraron el modelo de la biopelícula separando, en dos compartimentos, la masa de la biopelícula: (1) carbono celular y (2) carbono EPS.

El consumo de oxígeno se describe estequiométricamente por el  $\text{CO}_2$  y por la producción de biomasa.

Busch (1958, 1965), establece que el consumo de

oxígeno por cultivos mixtos de heterótrofos, muestra una meseta que corresponde a la utilización de todo nutriente primario. Una meseta también puede ser el resultado del consumo de oxígeno, si el oxígeno disuelto inicial es estequiométricamente limitante.

La demanda teórica de oxígeno para la oxidación completa de la glucosa es de 1,07 g/g.

La meseta es característica de un proceso de crecimiento bacteriano limitado por la concentración de carbono orgánico.

Busch (1971), demuestra que una deficiencia en uno de los nutrientes esenciales, la degradación de los nutrientes, o la presencia de fracciones grandes de predadores microbianos, puede ocultar la meseta.

Turakhia (1986), experimentó con *Ps. Aeruginosa* en varios reactores. El valor de la glucosa consumida por unidad de oxígeno consumido, fue  $Y_{s/o} = 0,89 \pm 0,6$  g/g de  $O_2$ , este valor comparado con el correspondiente a la estequiometría, resulta válido con poblaciones mixtas.

Turakhia y Ckaracklis obtuvieron  $Y_{s/o} = 0,92 \pm 0,02$  g de carbono/g de  $O_2$ .

#### 2.2.4.4.- Eliminación conjunta del nitrógeno y del carbono orgánico.

Una de las principales formas de contaminación de las aguas es la producida por los compuestos del nitrógeno que llegan procedentes de fuentes artificiales y naturales. Antes de exigirse su eliminación, ya se habían comprobado los resultados de la nitrificación en algunos tratamientos biológicos, pero desde que se ha reconocido la importancia de la contaminación nitrogenada, se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar procesos de control y eliminación de este tipo de contaminación.

Los procesos biológicos son de los más económicos para la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales, industriales y domésticas. El amoníaco, los nitratos y nitritos, además de los compuestos orgánicos solubles y la materia orgánica son las formas en que se presentan los compuestos de nitrógeno. De éstos, el amoníaco y el nitrógeno orgánico, se pueden eliminar por el proceso biológico de oxidación bacteriana conocido como "nitrificación" obteniendo nitritos y nitratos en dos etapas diferenciadas por los tipos de reacciones en las que intervienen distintas familias de

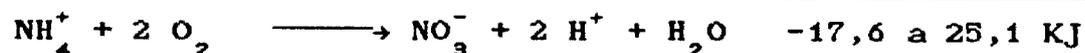
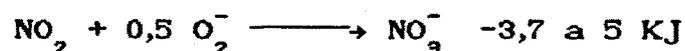
bacterias (nitrobacterias).

Por lo general, los organismos que intervienen en la primera etapa de oxidación de los iones amonio a nitritos son de las especies Nitrosomonas europea y monocella y Nitrosococcus. Entre las bacterias que realizan la segunda etapa de oxidación se encuentran las Nitrobacter winogradskyi y las Nitrocystis. En esta etapa los nitritos se oxidan a nitratos.

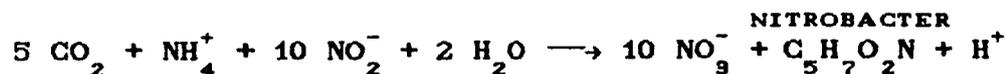
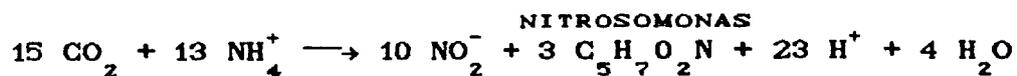
Dentro de la bioquímica de la nitrificación las etapas mencionadas se pueden clasificar como reacciones de oxidación que producen la energía necesaria para el mantenimiento de la vida de las bacterias. El nitrógeno también puede ser utilizado para la síntesis de nuevos microorganismos, se tendría un segundo tipo de reacciones que serían las específicas de síntesis celular.

Las etapas y reacciones mencionadas serían:

Nitrificación: (Obtención de energía).



Crecimiento de la biomasa: (Síntesis celular).



La energía para estos dos procesos, la suministran las reacciones de oxidación en el orden descrito.

De las reacciones globales de nitrificación y síntesis, se deduce que la oxidación autotrófica de 1 Kg de nitrógeno, produce aproximadamente 170 g de biomasa con un contenido en la misma de un dos por ciento del nitrógeno amoniacal original. También se observa que se necesita gran cantidad de oxígeno para la nitrificación (casi cuatro veces el peso del amoníaco oxidado) y, lo que es más importante, cuando se elimina el nitrato en el proceso siguiente de desnitrificación se recupera y se utiliza el oxígeno de una manera efectiva.

La desnitrificación es el proceso por el cual los nitratos y nitritos se reducen a compuestos gaseosos de nitrógeno, gas nitrógeno u óxidos nitrosos y nítricos por medio de microorganismos que usan nitratos en un mecanismo respiratorio a fin de sustituir el oxígeno en condiciones de

muy poca disponibilidad del mismo. Como se trata de un mecanismo respiratorio, se necesita un sustrato que aporte energía. Los microorganismos mencionados son en su mayoría heterótrofos anaerobios facultativos. Los géneros principales son *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter*, *Alcaligenes* y *Bacillus*. La naturaleza facultativa de estos organismos fue demostrada por Cooper y Wheeldon (1981).

Debido a lo expuesto anteriormente, es decir, a la necesidad de una fuente de energía para el mecanismo respiratorio de los microorganismos desnitrificantes, se han desarrollado, o están actualmente en fase de desarrollo, diversos procesos que combinan la oxidación del carbono y la nitrificación-desnitrificación en una etapa única. Sus ventajas son evidentes.

- 1.- La reducción del volumen de oxígeno para lograr la nitrificación y eliminación de la materia orgánica carbonácea.
- 2.- La eliminación potencial de la fuente de carbono orgánico.
- 3.- La eliminación de los clarificadores intermedios de un sistema de fases independientes.

4.- La desnitrificación reduce la alcalinidad, por lo que la realización conjunta nitrificación-desnitrificación palia el problema para la propia reacción de desnitrificación.

Al estar influenciada la desnitrificación por factores tales como la temperatura, pH, una perfecta nitrificación, cantidad de carbono y oxígeno disuelto, es de especial importancia analizar como se pueden conjugar estos factores con su influencia en la etapa de nitrificación.

El punto mas problemático es el último mencionado, es decir, el oxígeno disuelto, pues mientras para la nitrificación debe contarse con un medio estrictamente aerobio, para la desnitrificación debe ser anóxico.

En los procesos combinados se utiliza la descomposición endógena de los microorganismos o bien el carbono del agua residual para lograr la desnitrificación.

Estos procesos incluyen, por lo tanto, oxidación aerobia, fermentación anaerobia, nitrificación y desnitrificación. Puede darse eliminación del carbono y desnitrificación cuando las biopelículas son lo suficientemente profundas y se produce tal disminución en la

concentración de oxígeno disuelto en el interior, que se pueden cumplir las condiciones de anoxia en las capas siguientes. El problema surge de la relación entre los factores que afectan tanto a la nitrificación como a la desnitrificación. En un RBC, por ejemplo, en las primeras etapas se puede dar la oxidación carbonosa y desnitrificación, pues se cumple con la condición de anoxia en las capas mas profundas, sin embargo, la nitrificación no es apreciable y por consiguiente no se producen los nitratos suficientes para una desnitrificación importante. Además, en las últimas etapas, aparte de la insuficiencia de los nitratos, está la del sustrato como fuente de energía.

En este trabajo se pretenden alcanzar rendimientos significativos en la eliminación del carbono, estudiando el efecto, que teóricamente es posible, de la nitrificación y desnitrificación.

2.2.5.- Fases del crecimiento de la Biopelícula.

Una superficie en contacto con un fluido rico en sustancias nutritivas, permite, si las condiciones son suficientes, el desarrollo de una película biológica.

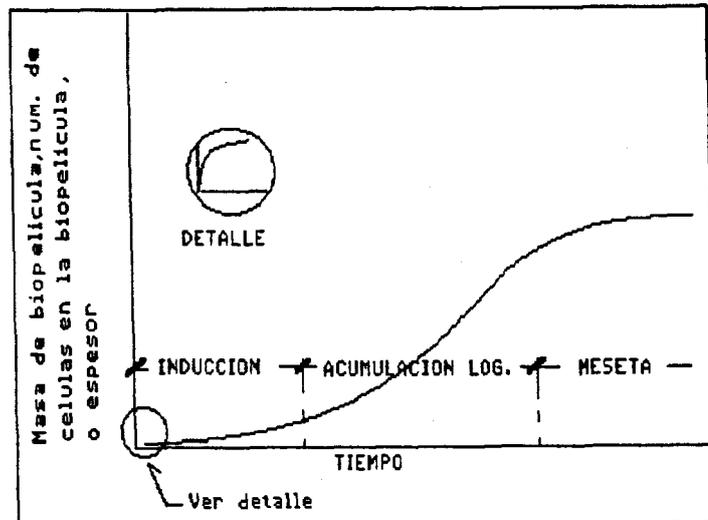


FIG. 2.13. Fases de la progresión de la biopelícula.  
Fuente: Characklis

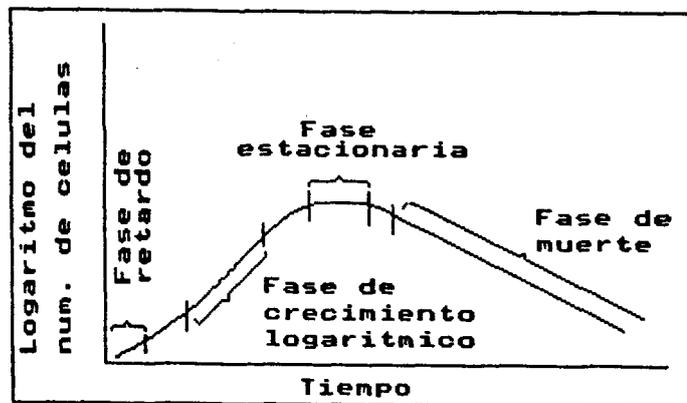


FIG. 2.14 .

El crecimiento de la biopelícula, que tradicionalmente se describe en tres fases demasiado genéricas (figura 2.13), o incluso en cuatro fases (figura 2.14), se puede explicar más en profundidad con las teorías dadas por los diferentes equipos de investigadores que hasta la fecha han trabajado en el tema.

Se puede, entonces, describir el crecimiento de la biopelícula en seis fases: (Capdeville, Nguyen, 1990).

1.- Fase latente, de inducción o retardo: Es la fase que corresponde al principio del fenómeno y depende de varios factores. Se corresponde con la adherencia inicial que se describe en el apartado 2.3.2.3 y, por lo tanto, con la "Adhesión instantánea reversible" más la "Adherencia firme e irreversible". De acuerdo con Fletcher et al., 1980, se pueden distinguir dos etapas: una fase pasiva, en la cual los compuestos orgánicos son adsorbidos, y una fase activa que corresponde a la adherencia de las bacterias.

Fletcher et al. (1976), postuló que la adherencia puede ser reversible, dependiendo de las fuerzas de atracción y repulsión, o irreversible. De hecho, los mecanismos de interacción son numerosos y complejos, tal como se describe en la "Adhesión Inicial". Teniéndose que tener en cuenta

también los aspectos biológicos conectados con las estructuras superficiales de los microorganismos (membrana), y con cierto tipo de actividad biológica, tal como la excreción de exopolímeros.

Muchas líneas de investigación se han desarrollado tratando de controlar y optimizar las propiedades de la superficie de los materiales soporte. (Vidard, 1987; Hernández, 1987; Cálvez, 1988; Hernández et al., 1988).

Referenciándolas en el tiempo, se tendría, en primer lugar, la investigación en membranas de ultra-filtración catiónicas y aniónicas donde las cargas fueron modificadas por adsorción de tensoactivos o polielectrolitos. Estos experimentos mostraron que la interacción entre microorganismos y soporte es inmediata cuando la superficie del último está cargada positivamente.

La duración de esta fase depende de factores ligados a la naturaleza del soporte, (Zobell, 1943; Wood, 1950; Maignan et al., 1974; Fletcher et al., 1976, Beachy, 1981), la naturaleza del sustrato, la relación espacio-tiempo, la concentración del medio y la carga orgánica superficial aplicada. (Belkhadir, 1986).

Desde el punto de vista cinético, esta fase es de

difícil control, aunque con el microscopio electrónico se pueden observar implantaciones de microcolonias después de algunas horas.

Capdeville y Nguyen, 1990; Hernández et al., 1988; demostraron con sus investigaciones la influencia que tiene el tipo de carga en el material soporte, respecto a la interacción bacteriana.

2.- Fase dinámica o de "crecimiento acelerado" o acumulación exponencial: Esta fase se desarrolla a gran velocidad, y su característica en un reactor aerobio es la gran variación decreciente en las concentraciones de carbono y oxígeno disuelto, con la acumulación de biomasa adherida como resultado del crecimiento de las colonias de microorganismos en número y en masa.

Al final de esta fase, la superficie del soporte se encuentra totalmente cubierta por una delgada, y relativamente uniforme, película de un espesor del orden de 50 a 100  $\mu\text{m}$ . El concepto "Biopelícula" se empieza a definir en esta fase.

La concentración de sustrato tiende, por lo anteriormente dicho, a un valor límite constante el cual,

obviamente, no es cero. El factor del cual depende este límite, es la concentración en el afluente ( $S_0$ ). Los potenciales biológicos del cultivo adherido tienden a un máximo, aunque el espesor siga incrementándose. Esto se traduce en un funcionamiento en régimen estacionario o permanente con respecto a la fase líquida y un régimen transitorio respecto a la masa de biopelícula.

Para explicar este fenómeno, se ha sugerido (Capdeville y Nguyen, 1990), una nueva hipótesis para un nuevo modelo de película biológica, que está basado en aspectos fisiológicos y consiste en definir dos tipos de bacterias en la película observada:

- Las bacterias activas,  $M_a$ , responsables de la eliminación de sustrato y caracterizadas por una tasa de crecimiento específico,  $\mu_0$ .
  
- Las bacterias inertes o inactivas,  $M_d$ , que no metabolizan sustrato por causa de fenómenos de inhibición tales como: la presencia dentro de la biopelícula, o de la misma bacteria, de productos de fermentación o metabolitos inhibidores; el efecto de confinamiento que modifica el transporte difusional del sustrato y de los productos que están alrededor.

Los metabolitos inhibidores juegan un papel importante en el proceso de crecimiento, notablemente en cultivos mixtos. Este aspecto de un proceso biológico, fué estudiado por De Souza Melo, H y J, 1984; y por Damromgsri, 1984; quienes aislaron e identificaron metabolitos inhibidores. En un estudio complementario, Li, 1985, mostró que, bajo ciertas circunstancias, esos metabolitos crecían.

Desde un punto de vista cinético, el crecimiento de un cultivo adherido, puede modelizarse por definición como:

Una tasa de crecimiento intrínseco a las bacterias activas, que es de primer orden respecto a su concentración, y de orden cero respecto al sustrato.

$$r_{M_a} = \mu_0 \cdot M_a \quad (2.22)$$

$\mu_0$  = Tasa máxima de crecimiento de bacterias activas. ( $T^{-1}$ )

$M_a$  = Masa activa respecto a la unidad de superficie geométrica del soporte  $A_0$  ( $ML^{-2}$ ).

Una tasa de inhibición, proporcional a la concentración del inhibidor y densidad celular:

$$r_{Nd} = k_1 \cdot I \cdot Ma \quad (2.23)$$

$k_1$  = Constante de inhibición ( $M^{-1}L^{-3}T^{-1}$ )

Si se asume que la concentración del inhibidor (I), es asimismo proporcional a la masa activa ( $\alpha \cdot Ma$ ), resulta:

$$r_{Md} = (k_1 \cdot \alpha) \cdot Ma^2 = k_2 \cdot Ma^2 \quad (2.24)$$

De las ecuaciones anteriores, la tasa neta de acumulación de bacterias activas en el soporte durante la fase dinámica:

$$\left( \frac{d Ma}{dt} \right)_{ac} = r_{Ma} - r_{Md} = \mu_0 \cdot Ma - k_2 \cdot Ma^2 \quad (2.25)$$

En el estado estacionario de la fase líquida, que corresponde a una concentración de sustrato constante y máxima cantidad de biomasa activa,  $\left( \frac{d Ma}{dt} \right)$  es igual a cero y el coeficiente  $k_2$  resulta:

$$k_2 = \frac{\mu_0}{(Ma)_{\text{máx}}} \quad (2.26)$$

La tasa de inactivación, resulta:

$$r_{Md} = \left( \frac{dMd}{dt} \right)_{acc.} = \mu_0 \frac{Ma^2}{(Ma)_{m\acute{a}x}} \quad (2.27)$$

En conclusión, durante la fase dinámica se tendrá:

$$\left( \frac{dMd}{dt} \right)_{ac.} = \mu_0 \cdot Ma \left( 1 - \frac{Ma}{(Ma)_{max}} \right) \quad (2.28)$$

Es de hacer notar que la forma de la ecuación (2.28), es idéntica a la que ha sido usada algunos años (Pearl, 1940; Keshavan et al., 1964; Constantinides et al., 1970; Trulear y Characklis, 1982; Vavilin et al., 1983).

Integrando las ecuaciones (2.27) y (2.28), se obtienen las ecuaciones de: la variación de la masa de bacterias activas en el tiempo; la variación de la masa de bacterias inactivas en el tiempo y la variación de la masa observada de la biopelícula:

- La variación de la masa de bacterias activas en el tiempo:

$$M_a = \frac{(M_a)_0 \cdot e^{\mu_0 t}}{1 - \frac{(M_a)_0}{(M_a)_{\text{máx}}} (1 - e^{\mu_0 t})} \quad (2.29)$$

$(M_a)_0$ : Masa activa inicial, corresponde al inicio de la fase dinámica de crecimiento.

- La variación de masa de bacterias inactivas en el tiempo:

$$M_d = (M_a)_{\text{Máx}} \ln \left[ 1 - \frac{M_a}{(M_a)_{\text{Máx}}} (1 - e^{\mu_0 t}) \right] + \frac{(M_a)_0 (1 - e^{\mu_0 t})}{1 - \frac{(M_a)_0}{(M_a)_{\text{Máx}}} (1 - e^{\mu_0 t})} \quad (2.30)$$

- La variación de la masa de biopelícula observada ( $M_b$ ), en el tiempo, sabiendo que:

$$M_b = (M_a) + (M_d) \quad (2.31)$$

$$M_b = (M_a)_{\text{Máx}} \ln \left[ 1 - \frac{M_a}{(M_a)_{\text{Máx}}} (1 - e^{\mu_0 t}) \right] + \frac{(M_a)_0}{1 - \frac{(M_a)_0}{(M_a)_{\text{Máx}}} (1 - e^{\mu_0 t})} \quad (2.32)$$

Si el tiempo es muy corto, como de hecho corresponde a la fase dinámica, las expresiones (2.30) y (2.32), pueden simplificarse a:

$$M_a = (M_a)_0 e^{\mu_0 \cdot t} \quad (2.33)$$

y,

$$\frac{d M_b}{dt} = \mu_0 \cdot M_b \quad (2.34)$$

Estas ecuaciones expresan la variación logarítmica de la masa de biopelícula (Sanders, 1967; La Motta, 1976; Trulear et al., 1982; Characklis et al., 1982).

3.- Fase de crecimiento lineal: La tasa de acumulación es constante. Se caracteriza por: una concentración mínima y constante de sustrato y máxima demanda de oxígeno. Lo dicho representa un estado estacionario funcionando en la fase líquida, que se corresponde con una cantidad máxima de biomasa activa adherida  $(M_a)_{max}$ . Entonces se igualan las masas  $(M_a) = (M_a)_{max}$ , y no hay acumulación adicional de masa activa en el soporte, y la experiencia muestra que la superficie está enteramente colonizada.

En la fase de crecimiento lineal, las ecuaciones (2.30) y (2.32) debido al descenso en el crecimiento, pueden

simplificarse para resultar:

$$M_d = \mu_0(M\alpha)_{\text{Máx}} \cdot t + (M\alpha)_{\text{Máx}} \left[ \text{Ln} \frac{(M\alpha)_0}{(M\alpha)_{\text{Máx}}} - 1 \right] \quad (2.35)$$

Entonces:  $M_d = K \cdot t + C_1$  (2.36)

$$M_b = \mu_0(M\alpha)_{\text{Máx}} \cdot t + (M\alpha)_{\text{Máx}} \left[ \text{Ln} \frac{(M\alpha)_0}{(M\alpha)_{\text{Máx}}} + 1 \right] \quad (2.37)$$

Entonces:  $M_b = K \cdot t + C_2$  (2.38)

Siendo:  $K = \mu_0(M\alpha)_{\text{Máx}}$  (2.39)

Que representa una tasa constante de acumulación de biopelícula en el soporte.

Si se hace un balance entre la cantidad de bacterias activas e inactivas, a partir de la simplificación anterior aplicada a las ecuaciones de la (2.22) a la (2.27), resulta:

$$r_{M_a} = r_{M_d} = K = \mu_0(M\alpha)_{\text{Máx}} \quad (2.40)$$

Se observa un cambio de estructura apareciendo

organismos filamentosos, cuya morfología, depende de la concentración de oxígeno disuelto. (Christensen et al., 1988; Hamoda et al., 1987). El espesor de la biopelícula no es uniforme.

4.- Fase de deceleración o de tasa decreciente: Esta fase constituye una transición entre la acumulación de biopelícula a tasa constante y su estabilización en los valores máximos de espesor y masa. En esta fase se observa una disminución de biopelícula en el soporte debido, principalmente, a los esfuerzos hidrodinámicos ejercidos por el líquido sobre la biopelícula, que están en función del espesor de ésta y de su masa.

Trulear et al., 1982; y Rittmann, 1982; sugieren la relación entre la tasa de desprendimiento y el coeficiente de fricción.

También se puede observar un aumento de materia en suspensión en la fase líquida. Usualmente se une con la fase siguiente, sobre todo cuando las fuerzas cortantes son grandes. La duración de esta fase es relativamente corta.

5.- Fase de estabilización o meseta (Characklis et al., 1982) Se alcanzan en esta fase los máximos valores

(constantes) en la masa y espesor de biopelícula. El régimen es estacionario respecto a la misma. La duración es corta y depende de factores tales como: la concentración de sustrato, y, como se ha dicho en la fase anterior, de los esfuerzos hidrodinámicos.

6.- Fase de separación del soporte, o desprendimiento de la biopelícula.

En la figura 2.15 se presentan las diferentes fases del crecimiento de la película biológica en función del tiempo. La consecuencia del estudio del crecimiento, es que se muestra que se establecen dos estados estacionarios: uno funcionando con respecto al líquido y que se alcanza al final de la fase de crecimiento dinámico o acelerado, con una biopelícula muy fina, y, otro funcionando con respecto a la biopelícula en la fase de estabilización con un espesor de biopelícula mayor que el anterior.

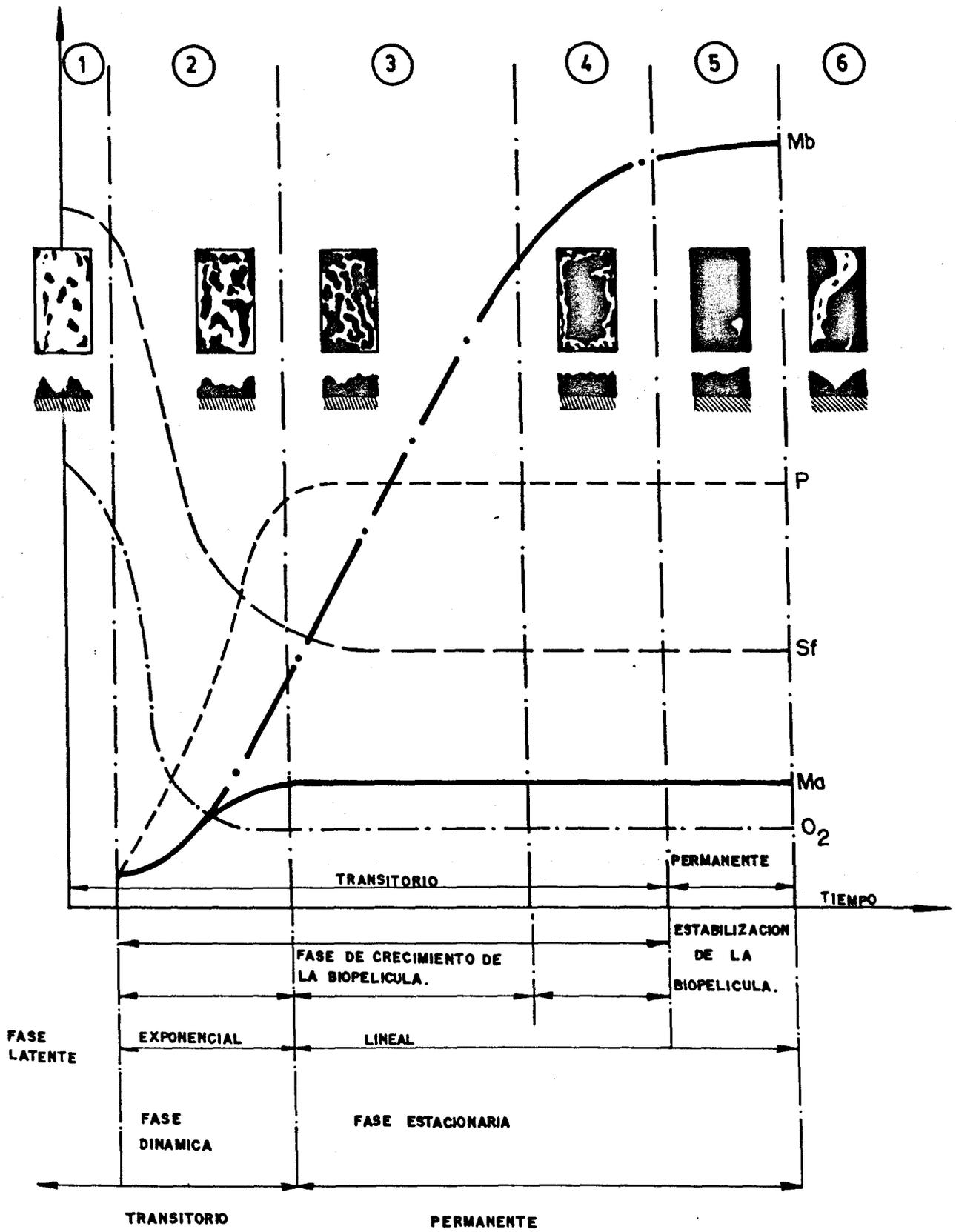


FIG. 2.15.

#### 2.2.6.- Modelos de la Biopelícula.

Como resumen de todo lo expuesto en este capítulo, se presentan a continuación las aplicaciones que se han realizado históricamente de las teorías expuestas para la obtención de modelos que representen el funcionamiento de la biopelícula.

Los modelos que se presentan son todos muy parecidos, pero cada uno suele introducir ligeras modificaciones sobre los anteriores, al intentar considerar fenómenos contemplados hasta el momento.

Estos modelos describen el efecto que tiene el cambio de las condiciones dentro de la biopelícula, sobre la capacidad de toma de sustrato que tiene la misma. Este efecto se expresa en términos de flujo de masa de sustrato en la interfase biopelícula-líquido.

Entonces dichos modelos se pueden combinar con un modelo global de reactor, con el fin de suministrar una descripción de la eliminación de sustrato por el reactor tomado en conjunto.

#### 2.2.6.1.- Modelo de Williamson y McCarty.

Los modelos de película biológica describen detalladamente lo que ocurre dentro de la biopelícula, generalmente con la suposición de una marcada interfase entre la biopelícula y la capa de líquido. Este modelo define que la concentración de sustratos en la biopelícula es máxima en la interfase biopelícula-líquido, y disminuye según se difunden y consumen los nutrientes dentro de la biopelícula.

Esta concentración de sustratos en la interfase de la biopelícula se supone igual a la concentración de nutrientes en el líquido de la interfase y a su vez igual a la de nutrientes en el seno de la capa de líquido que fluye.

Se considera estado estacionario para un área de biopelícula y capa de líquido con la que está en contacto, en donde la difusión de nutrientes del líquido a la biopelícula se equilibra por el consumo de nutrientes dentro de la biopelícula.

Se considera un área de biopelícula normal a la

dirección de la difusión de nutrientes. Para esta área será:

$$\frac{d N_s}{d y} = U_s \cdot \rho \quad (2.41)$$

Donde:  $N_s$  - Flujo de masa del sustrato ( $g/m^2 \cdot h$ )  
 $U_s \cdot \rho$  - Tasa de toma de sustrato por unidad de volumen de la biopelícula por unidad de tiempo. ( $g \text{ DBO}/m^3 \cdot h$ ).

La variación de flujo de masa de los sustratos a través de la biopelícula es igual a la tasa de consumo de sustrato dentro del área de la biopelícula atravesada.

Al combinar la ley de Fick con la ecuación (2.41), se obtiene:

$$D_s \frac{d^2 S}{d y^2} = U_s \cdot \rho_s \quad (2.42)$$

$D_s$  - Difusividad efectiva de sustrato de la biopelícula ( $m^2/h$ ).

La toma de sustratos por unidad de área superficial de la biopelícula es igual al producto del coeficiente de difusión del sustrato por el gradiente de la concentración de sustrato en la biopelícula.

$$N_s = - D_s \left( \frac{dS}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.43)$$

Estos modelos de ecuaciones, dependen del patrón cinético que describe la tasa de utilización de sustratos, U.

El modelo Monod para la cinética del crecimiento microbiano es apropiado, de manera que:

$$D_s \frac{d^2 S}{dy^2} = \frac{\mu_m \rho_s S}{Y (K_s + S)} \quad (2.44)$$

$\rho_s$  se supone constante en toda la biopelícula y la

concentración de sustrato,  $S$ , se refiere a un determinado sustrato limitante.

Para aguas residuales fuertes donde  $S \gg K_s$  (coeficiente de semisaturación), la cinética es del orden cero y la ecuación (2.44), se aproxima a:

$$\frac{d^2 S}{dy^2} = \frac{\mu_m \rho_s}{D_s Y} \quad (2.45)$$

Si el espesor de la capa activa,  $L_f$ , se define como el espesor de la película donde la concentración de nutrientes baja a cero, y el gradiente de la concentración de nutrientes con la profundidad es nulo; y la concentración de sustratos en la interfase entre la biopelícula y el líquido es  $S^*$ , las condiciones de borde para integrar la ecuación (2.45) son:

$$\begin{array}{ll} y = 0; & S = S^* \\ & y, \quad \frac{dS}{dy} = 0 \\ y = L_f; & S = 0 \end{array} \quad (2.46)$$

Se pueden obtener tres ecuaciones que expresan:

- 1.- Variación de la concentración de sustrato en función del espesor.
- 2.- Espesor de la capa activa.
- 3.- Toma de nutrientes por la biopelícula.

$$L_f = \left[ \frac{2 S^* D_s Y}{\mu_m \rho_s} \right]^{1/2} \quad (2.47)$$

$$S_Y = S^* \left[ 1 - \frac{Y^2}{L} \right] \quad (2.48)$$

$$N_s = 2S^* \frac{D_s}{L_f} = \left[ 2S^* D_s \mu_m \frac{\rho_s}{Y} \right]^{1/2} \quad (2.49)$$

Cuando el espesor de la biopelícula sea menor que  $L_f$ , toda ella será activa y la biomasa soportada por el medio material será proporcional a su profundidad. La eliminación de sustrato, aumenta según lo hace el espesor de la biopelícula.

Cuando el espesor de la biopelícula sea igual a  $L_f$  la eliminación será máxima y no aumentará a pesar de un incremento adicional del espesor de la biopelícula. Esto se debe a que los nutrientes no penetran más allá de una distancia  $L_f$ , y el resto de la biopelícula se vuelve inactiva.

Por otra parte, para aguas residuales de baja concentración, donde  $S \ll K_S$ , la ecuación se aproxima a:

$$\frac{d^2S}{dy^2} = \frac{\mu_m \rho_s S}{D_s Y K_S} = A_p \cdot S \quad (2.50)$$

$A_p$  es una agrupación de parámetros de la biopelícula.  $\left(\frac{\mu_s \rho}{D_s Y}\right)$

Una solución a la ecuación (2.50) ha sido propuesta por Williamson y McCarty (1.976).

$$S_Y = S^* \frac{\cosh \left[ \sqrt{A_P} (L_f - Y) \right]}{\cosh \left[ \sqrt{A_P} L_f \right]} \quad (2.51)$$

$$N_S = S^* D_s A_P^{1/2} \quad (2.52)$$

Esta última ecuación indica que la tasa de eliminación de sustrato por área unitaria de la biopelícula es proporcional a la concentración interfacial de sustrato.

2.2.6.2.- Modelo de Atkinson et al., o de la Ecuación de la Tasa Biológica.

Atkinson et al., entre 1974 y 1976 desarrollaron una analogía entre los agregados microbianos y los catalizadores heterogéneos para crear una ecuación de tasa biológica (ETB).

La tasa de reacción se basa en el modelo Monod, de modo que la tasa específica de toma de sustrato, (U), o la tasa de eliminación por unidad de masa microbiana, es:

$$U = \frac{U_m S_i}{[K_s + S_i]} \quad (2.53)$$

$U_m$  es la tasa específica máxima.

Teniendo en cuenta un factor de efectividad que

considera la limitación difusional en la biopelícula:

$$U = \frac{\lambda U_m S_i}{(K_S + S_i)} \quad (2.54)$$

Utilizando la relación :

$$\frac{N_s}{N_m} = \frac{U}{U_m} \quad (2.55)$$

Donde  $N_m$  es el flujo máximo o límite del sustrato en la interfase entre la biopelícula y el líquido.

La ecuación de tasa biológica, describe la toma de sustrato representada como un flujo de la masa de sustrato y depende de los siguientes parámetros:

- 1.- Espesor de la biopelícula ( $L_f$ ).

- 2.- Concentración interfacial del U sustrato. ( $S^*$ ).
- 3.- Coeficiente característico ( $K_1$ ) que mide la densidad microbiana y la cinética en la biopelícula.
- 4.- Coeficiente característico ( $K_2$ ) que incluye, aparte del anterior, el coeficiente de difusión del sustrato en la biopelícula.
- 5.- Coeficiente característico  $K_3$  o coeficiente cinético.

Las relaciones de los coeficientes son entonces:

$$K_1 = \frac{\mu_m \rho_s}{Y K_s} \quad (2.56)$$

$$K_2 = \left( \frac{K_1}{D_s} \right)^{1/2} \quad (2.57)$$

$$K_3 = \frac{1}{K_s} \quad (2.58)$$

Los parámetros que influyen en la toma de sustrato por la biopelícula se pueden definir en términos adimensionales:

**Espesor:**

$$H = K_2 L_f \quad (2.59)$$

**Concentración:**

$$B^* = K_3 S^* = \frac{S^*}{K_3} \quad (2.60)$$

Relación tasa de disponibilidad / toma de sustrato.

$$\phi = \frac{H}{\sqrt{1+2B^*}} \quad (2.61)$$

La ecuación de tasa biológica para películas microbianas será:

Forma adimensional:

$$\frac{N_s}{N_m} = \frac{\lambda B^*}{(1+B^*)} \quad (2.62)$$

Forma dimensional:

$$N_s = \frac{K_1 L_f S^*}{(1 + K_3 S^*)} \quad (2.63)$$

El factor de efectividad en función de los

parámetros definidos será:

El factor de efectividad, cuando predomina la reacción controlada y el parámetro  $\phi_s$  es menor que la unidad, será:

$$(\phi_s \leq 1): \therefore \lambda = 1 - \frac{\tanh H}{H} \left( \frac{\phi_s}{\tanh \phi_s} - 1 \right) \quad (2.64)$$

Si predomina el límite de difusión,  $\phi_s$  es mayor que la unidad, y el factor de efectividad está dado por:

$$(\phi_s \geq 1): \therefore \lambda = \frac{1}{\phi_s} - \frac{\tanh H}{H} \left( \frac{1}{\tanh \phi_s} - 1 \right) \quad (2.65)$$

Se puede observar que si no hubiera limitación difusional, el factor de efectividad sería 1.

Con una baja concentración interfacial de sustrato ( $S^*$ ), y un valor grande de  $L_f$ , la Ecuación de Tasa Biológica se reduce a:

$$N_s = \frac{K_1}{K_2} S^* \quad (2.66)$$

Cuando sea alta la concentración interfacial de sustrato, dicha concentración no fijará el límite, y la tasa de toma dependerá de  $L_f$ . La ETB se reduce a:

$$N_s = \frac{K_1}{K_3} L_f \quad (2.67)$$

Es necesario determinar  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  para poder usar la ETB. La determinación experimental para un agua residual heterogénea en sustrato, suministrará valores integrales y, por esta causa, podría haber diferencias entre el afluente y el efluente. También los cambios en la población microbiana, el espesor de la biopelícula y la temperatura, afectan a los valores de los tres coeficientes.

2.2.6.3.- Modelo de Rittmann y McCarty, soluciones propuestas por Suidan, Rittmann y Traegner.

Las investigaciones llevadas a cabo por bastantes investigadores, (Atkinson y Daoud, 1968; Williamson y McCarty, 1976; Harremoës, 1978; Rittmann y McCarty, 1980-1981), han demostrado claramente, que la cinética de la utilización de sustrato dentro de las biopelículas se describe por un modelo que contiene la representación de los fenómenos de reacción y difusión. Figura 2.16.

Los perfiles característicos de la concentración de sustrato dentro de la biopelícula, para un modelo que contenga reacción con difusión, están representados en la figura 2.17. En esta figura se refleja, igualmente, la resistencia al transporte de masa externo, modelado como una capa de difusión que afecta a la concentración de sustrato en la biopelícula.

Rittmann y McCarty, 1981, definieron tres perfiles característicos de la concentración de sustrato en el interior de una biopelícula, y en base a ellos clasificaron

las correspondientes biopelículas en: (a) "totalmente

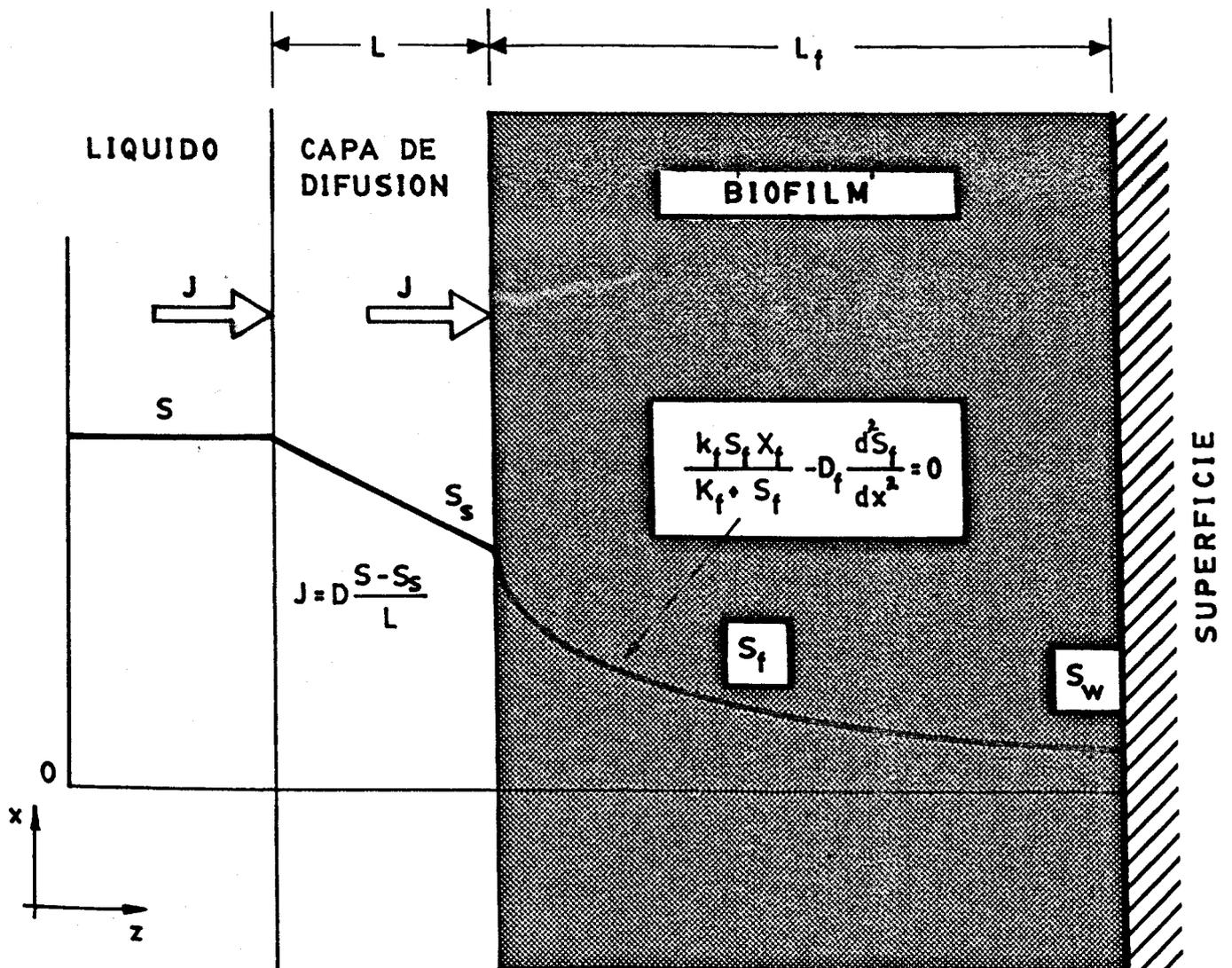


FIG. 2.16. Concepto básico para el modelo de biopelícula. (Fuente Rittmann y McCarty).

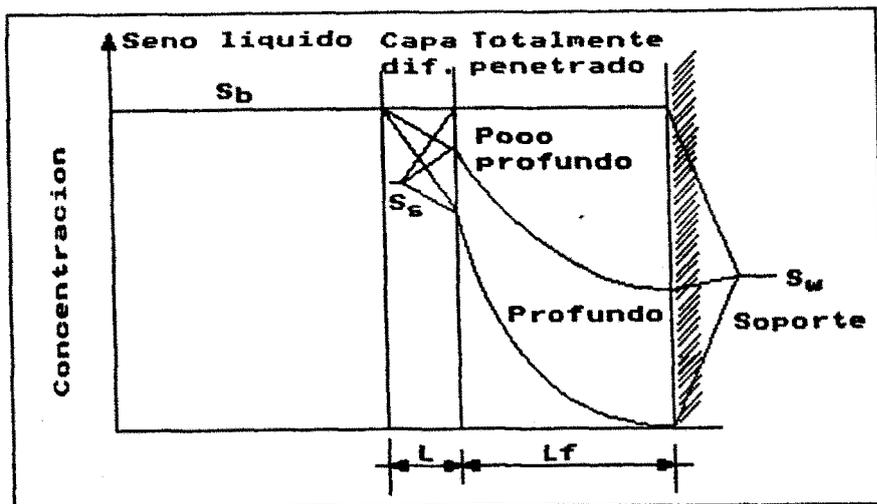


FIG.2.17. Perfiles caracteristicos de sustrato dentro de la biopelícula. (Fuente: Suidan, Rittmann y Trayner).

penetrada", (b) "superficial o poco profunda" y (c) "profunda". El primero se caracteriza por un despreciable decrecimiento del sustrato desde la concentración superficial

$(S_s)$ , (biopelícula muy delgada), mientras que el tercero sufre el máximo decrecimiento porque la concentración de sustrato llega a ser cero. (biopelícula gruesa o profunda).

El caso intermedio (b) se caracteriza por tener una concentración de sustrato en la superficie del soporte, parte más profunda de la biopelícula,  $(S_v)$ , comprendida entre cero y  $(S_s)$ . (biopelícula delgada).

El conocimiento del tipo de perfil que corresponda a la concentración de sustrato, permite, matemáticamente hablando, una simplificación si se trata de los casos extremos que se convierten en límites. Atkinson y Davies, 1974; Rittmann y McCarty, 1981; y Swidan y Wang, 1985, han presentado soluciones para el caso general de un flujo de sustrato dentro de la biopelícula conociendo el espesor  $(L)$ .

Investigaciones llevadas a cabo por Suidan, 1986; Rittmann y McCarty, 1981, han permitido establecer los cálculos directos para biopelículas "profundas".

Suidan, Rittmann y Traegner (1987), definieron los criterios para las cinéticas de biopelículas "profundas" y para las "totalmente penetradas".

El modelo que desarrollaron, se fundamentó en la ecuación diferencial de estado estacionario, basada en la cinética de Monod, y modificada por Rittmann y Mc Carty (1981), y Suidan (1986):

$$D_f \frac{d^2 S_f}{dz^2} = \frac{K S_f X_f}{K_s + S_f} \quad (2.68)$$

Las condiciones de borde para esta ecuación, especifican la concentración de sustrato en la interfase líquido-biopelícula y son

$$S_f = S_s \quad \text{cuando } z = 0 \quad (2.69)$$

$$\frac{dS_f}{dz} = 0 \quad \text{cuando } z = L_f \quad (2.70)$$

La resistencia externa al transporte de masa se modela como una capa de difusión efectiva. (Rittmann y

McCarty, 1981). El flujo de masa de sustrato queda representado por:

$$J = D_v \frac{S_b - S_s}{L} \quad (2.71)$$

Introduciendo parámetros adimensionales, se puede reducir el número de constantes de las ecuaciones anteriores:

$$S_f^* = \frac{S_f}{K_s} \quad (2.72)$$

$$K_s = \frac{1}{K} \quad \text{de la ETB}_3$$

$$z^* = z \left( \frac{K X_f}{D_f K_s} \right)^{1/2} \quad (2.73)$$

$$L_f^* = L_f \left( \frac{K X_f}{D_f K_s} \right)^{1/2} \quad (2.74)$$

$$\left( \frac{K X_f}{D_f K_s} \right)^{1/2} = K_2 \text{ en ETB}$$

$$L^* = L \left( \frac{K X_f}{D_f K_s} \right)^{1/2} \left( \frac{D_f}{D_v} \right) \quad (2.75)$$

$$J^* = \frac{J}{\left( K_s k X_f D_f \right)^{1/2}} \quad (2.76)$$

Después de definir cada grupo adimensional, e introducirlo en las ecuaciones correspondientes, resulta:

$$\frac{d^2 S_f^*}{dz^{*2}} = \frac{S_f^*}{1 + S_f^*} \quad (2.77)$$

$$J^* = \frac{S_b^* - S_s^*}{L^*} \quad (2.78)$$

$$S_f^* = S_s^* \quad \text{para } z^* = 0 \quad (2.79)$$

$$\frac{d S_f^*}{d z^*} = 0 \quad \text{para } z^* = L_f^* \quad (2.80)$$

Los casos que definen distintas condiciones de borde, resultan ser cuatro, correspondientes a las combinaciones que se pueden realizar de "biopelícula totalmente penetrada" y "biopelícula profunda" con  $S_s^*$  muy grande o muy pequeña respecto a la unidad. Así:

- Si la biopelícula es profunda, y  $S_s^* \ll 1$ , resulta:

$$\frac{J^*}{S_s^*} = 1 \quad (2.81)$$

Esta ecuación demuestra que para una biopelícula profunda el flujo de sustrato es independiente del espesor de la biopelícula. Además, el flujo de sustrato es directamente proporcional a la concentración de sustrato en la interfase líquido-biopelícula.

- Si la biopelícula es profunda y  $S_s^* \gg 1$ , será:

$$\frac{J^*}{S_s^*} = \sqrt{2} \left( S_s^* \right)^{-1/2} \quad (2.82)$$

Esta ecuación demuestra claramente que el flujo de sustrato en las condiciones establecidas varía con la raíz cuadrada de  $S_s^*$ . Este comportamiento es típicamente observado para difusión limitada por reacciones de orden cero (Harremöes, 1978).

- La biopelícula está totalmente penetrada y  $S_s^* \ll 1$

$$\frac{J^*}{S_o^*} = L_f^* \quad (2.83)$$

Es decir, no sufre reducción de la tasa de reacción a medida que se profundiza en la biopelícula.

- La biopelícula está totalmente penetrada y  $S_o^* \gg 1$

$$\frac{J^*}{S_o^*} = \frac{L_f^*}{S_o^*} \quad \text{ó} \quad J^* = L_f^* \quad (2.84)$$

Los procesos heterogéneos que combinan las transformaciones químicas o bioquímicas y el transporte de masa por difusión, tienen gradientes de concentración de sustrato, que reducen los valores de la tasa de reacción desde aquéllos que tendrían que considerarse si toda la fase microbiana estuviera expuesta a la concentración del sustrato del seno del líquido.

Cuando se consideran las reacciones de primer

orden, tal como es el caso cuando  $S_b^*$  es mucho más pequeño que la unidad, la relación entre  $S_v^*$  y  $S_b^*$ , puede usarse como una medida de la penetración del sistema biopelícula.

Pero cuando esta relación es mucho mayor que la unidad, dicha relación no puede usarse para describir la penetración de la biopelícula.

En esta situación, la tasa de bioconversión es constante a través de la biopelícula, en la cual, dependiendo de su profundidad, los valores de las dos concentraciones limitantes pueden ser diferentes.

Para remediar esta situación, y poder describir la penetración de la biopelícula, se definió un módulo adimensional de tasa,  $Q$ .

Este módulo se define como la relación entre la tasa específica de reacción en la superficie soporte de la biopelícula y la tasa específica de reacción que se alcanza en la concentración de sustrato en el seno del líquido

$$Q = \left[ S_v^* / \left( 1 + S_v^* \right) \right] / \left[ S_b^* / \left( 1 + S_b^* \right) \right] \quad (2.85)$$

La solución a esta ecuación puede plantearse a

partir de técnicas gráficas de las relaciones  $J^*/S_b^*$  vs  $S_b$ . Por ejemplo, un valor constante de la relación  $J^*/S_b^*$  indica una dependencia de primer orden del flujo en la concentración de sustrato en el seno del líquido. Por otra parte, las pendientes positivas o negativas de la curva  $J^*/S_b^*$  indican que el orden de la reacción total, es más grande o más pequeño que de primer orden, respectivamente. Para una biopelícula profunda,  $Q = 0$ ; mientras que para una biopelícula totalmente penetrada,  $Q = 1$ .

2.2.6.4.- Modelo de Rittmann y McCarty aplicado por Sáez, Muñoz y Celedón.

Una vez definidos los conceptos de "biopelícula profunda", "totalmente penetrada" y "poco profunda", cuyos perfiles se observan en la figura 2.16, y que supone que en el primero la concentración de sustrato decrece asintóticamente a cero, y tiene el flujo de sustrato máximo posible para una  $S_a$  dada; y para el tercero que la concentración de sustrato en la interfase biopelícula-soporte es mayor que cero, se puede establecer para ambos perfiles, que el gradiente de concentración de sustrato llega a ser cero.

A partir de la ecuación de Monod:

$$(-r_s) = \frac{k X_a S}{K_s + S} \quad (2.86)$$

Y de la deducción del "Consumo de sustrato por la biopelícula", a partir del balance de masa de sustrato dentro de una sección diferencial de biopelícula cuando el transporte de masa es sólo por difusión molecular,

resulta:

$$\frac{\delta S_f}{\delta t} = D_f \frac{\delta^2 S_f}{\delta z^2} - (-r_{sf}) \quad (2.87)$$

$(-r_{sf})$ : Tasa de utilización de sustrato por la biopelícula.

La primera Ley de Fick permite calcular la resistencia externa al transporte de masa. El flujo J puede, asimismo, determinarse para  $z = 0$

$$J = -D_f \frac{dS_f}{dz} \quad (2.88)$$

Esta última ecuación necesita de la determinación de J como una función de S. Se puede obtener haciendo un balance de biomasa adherida:

$$a \, dV \frac{\delta}{\delta t} (X_f L_f) = Y J a \, dV - b X_f L_f a \, dV + r_{dep} a \, dV - r_{ec} a \, dV \quad (2.89)$$

"Y" es la Producción de masa de bacterias, por unidad de masa de sustrato utilizada.

"b" es el el Coeficiente de decrecimiento.

"r<sub>dep</sub>" es la Tasa de deposición, o tasa a la cual las bacterias suspendidas se depositan en la biopelícula.

"r<sub>ec</sub>" es la Tasa de pérdida por cortante.

Rittmann (1982), demostró, por medio de los datos experimentales de Trulear y Characklis (1980), que la tasa de pérdidas por esfuerzos cortantes se puede aproximar a la dada por la ecuación siguiente:

$$r_{ec} = A X_f L_f \quad (2.90)$$

Donde A es función de  $L_f$  y del cortante.

Para estado estacionario, la tasa de deposición es despreciable, y la tasa de pérdidas se aproxima a la de la ecuación (2.89), la ecuación (2.88) resulta:

$$L_f = \frac{J Y}{b' X_f} \quad (2.91)$$

"b'" es la suma de los coeficientes de pérdidas por decrecimiento y cortante.

Un concepto llave en la solución para estado estacionario, es la existencia de una "concentración de sustrato umbral"  $S_{min}$ , por debajo del cual no ocurre actividad significativa en la biopelícula. (Rittmann, McCarty, 1980)

La razón de que esto ocurra es porque la tasa neta de crecimiento para una concentración más baja que  $S_{min}$  es siempre negativa. En otras palabras, la biopelícula está continuamente decreciendo y no puede existir una situación de estado estacionario cuando  $S$  es menor que  $S_{min}$ . A concentraciones por encima de  $S_{min}$  la biopelícula tiene un crecimiento neto positivo.

Si la tasa de deposición es despreciable, el balance de masa de biomasa adherida en una sección diferencial de biopelícula es:

$$a \, dV \frac{\delta}{\delta t} (X_f \, dz) = Y (-r_{sf}) a \, dV \, dz - b' a \, dV X_f \, dz \quad (2.92)$$

Para  $S = S_{\min}$ , se asume que sólo una monocapa de bacterias forma la biopelícula.

La tasa de utilización de sustrato por la biopelícula, para la condición  $S_{\min} = S_f$ , será:

$$(-r_{sf}) = \frac{b' X_f}{Y} \quad (2.93)$$

Para determinar la concentración mínima de sustrato en el seno del líquido se puede acudir a los diferentes modelos cinéticos. Así:

-Para modelo cinético de primer orden:

$$K_s = \frac{b'}{k Y} \quad (2.94)$$

- Para modelo cinético de Monod:

$$K_s = \frac{b'}{kY - b} \quad (2.95)$$

- Para modelo cinético de Contois:

$$B X_f \frac{b'}{kY - b'} \quad (2.96)$$

Para determinar el flujo de sustrato empleando modelo de cinética de primer orden, se ha de diferenciar entre biopelículas poco profundas y profundas. Asimismo se puede determinar el espesor de la biopelícula, la concentración de sustrato en la interfase líquido-biopelícula y la concentración de sustrato dentro de la biopelícula.

La respuesta del sistema con modelos de primer orden, para biopelículas "poco profundas" y "profundas", se muestra a continuación.

- Para biopelículas poco profundas:

-Flujo de sustrato:

$$J = \left[ S - \frac{J L}{D} \right] D_f \sqrt{k X_f / K_s D_f} \tanh \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} \right] \cdot \left[ \frac{Y}{(b' X_f)} J \right] \quad (2.97)$$

- Espesor de la biopelícula:

$$L_f = \frac{Y}{(b' X_f)} J \quad (2.98)$$

- Concentración de sustrato en la interfase líquido-biopelícula:

$$S_s = S - \frac{J L}{D} \quad (2.99)$$

- Concentración de sustrato dentro de la biopelícula:

$$S_f = S_s \frac{\cosh \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} (L_f - z) \right]}{\cosh \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} L_f \right]} \quad (2.100)$$

- Para biopelículas profundas:

- Flujo de sustrato:

$$J = \left[ S - \frac{J L}{D} \right] D_f \sqrt{k X_f / K_s D_f} \coth \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} \frac{Y}{(b' X_f)} J \right] \quad (2.101)$$

- Espesor de la biopelícula:

$$L_f = \frac{Y}{(b' X_f)} J \quad (2.102)$$

- Concentración de sustrato en la interfase líquido-biopelícula:

$$S_s = S - \frac{J L}{D} \quad (2.103)$$

- Concentración de sustrato dentro de la biopelícula:

$$S = S_s \frac{\sinh \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} (L_f - z) \right]}{\sinh \left[ \sqrt{k X_f / K_s D_f} L_f \right]} \quad (2.104)$$

Todos estos modelos, tienen limitaciones

importantes, tales como: el estado estacionario supuesto; se aplican sólomente cuando un sustrato simple limita la cinética y se asume que la tasa de deposición es despreciable.

## 2.3.- EL MEDIO SOPORTE DE LA BIOPELICULA.

### 2.3.1.- Planteamiento General.

Debido a que la composición de la superficie que se toma como soporte de la biopelícula, está relacionada con las propiedades físico-químicas necesarias para la adhesión inicial bacteriana, hidrofobia y potencial zeta, (Verrier et al., 1988), se han desarrollado múltiples líneas de investigación tratando de controlar y optimizar las propiedades de la superficie de los materiales soporte (Cálvez, 1988; Hernández et al., 1988; Vidard, 1987; Hernández, 1987)

La optimización del material soporte, pasa en primer lugar por analizar las características comunes que deben reunir dichos materiales, y que esencialmente son tres:

- Máxima superficie de contacto con el agua y con el aire u oxígeno.
  
- No debe inhibir el crecimiento de la biopelícula, ni

ser atacada por las sustancias en contacto.

- Resistencia mecánica para soportar la biopelícula a plena carga, y configuración geométrica que optimice la hidrodinámica del sistema

El modelo de Williamson y McCarty (1976), sirve como base a todas las recientes investigaciones para biopelículas fijas. En este modelo, se demuestran ciertos mecanismos que están influenciados por los parámetros siguientes:

- Concentración de aceptadores y donadores de electrones en el líquido. (Oxígeno y sustrato, respectivamente). Estas concentraciones están controladas por el régimen hidrodinámico del sistema y por la transferencia de oxígeno.
- Espesor de la capa inmóvil (o estancada) de líquido entre la fase del líquido y la biomasa. Está determinada por las condiciones hidrodinámicas del medio.
- Coeficiente de difusión molecular en el líquido.

Depende de la composición del afluente y de la temperatura.

- Coeficiente de difusión molecular en la biomasa.  
Depende de la composición del sustrato y de los microorganismos, además de la temperatura.
- Tasa máxima específica de utilización del sustrato.  
Depende de la composición del sustrato y de los microorganismos, además de la temperatura.
- Constante de semisaturación de la Ecuación de Monod, que es función de la composición del sustrato y de los microorganismos de la biopelícula.
- Intercambio superficial entre la biomasa y la concentración de sustrato del líquido.

Se puede observar que el medio soporte juega un papel esencial, en virtud de su forma y configuración, en las características hidráulicas del sistema y en la transferencia de oxígeno. Sin embargo, es difícil definir esta parte con criterios muy precisos. Igualmente, cuanto mayor sea la superficie del soporte, en la mayoría de los reactores, mayor

será el rendimiento; además el intercambio superficial es proporcional a la superficie específica del soporte.

Los programas de investigación sobre el tema deben seguir la pauta siguiente (Pascik, 1989):

- Las relaciones entre las propiedades físico-químicas y físicas de los materiales soporte, y su resistencia a la degradación bajo condiciones varias.
- Desarrollar, según las bases del conocimiento adquirido en el apartado anterior, nuevos materiales soporte sintéticos, cuyas propiedades puedan ser optimizadas para misiones específicas.

Pero el fenómeno de la adherencia inicial necesita ser analizado por la gran importancia obvia que tiene en el desarrollo del resto del proceso.

## 2.3.2.- Adherencia de la Biopelícula al Medio Soporte

### 2.3.2.1.- Análisis General.

Desde Zobell y Anderson (1936) se han creado varios grupos de investigadores sobre el tema de la adherencia inicial, hasta nuestros días. Marshall, Stout y Mitchell (1971); Marshall y Cruickshank (1973) y Marshall (1976), definieron dos fases en el proceso de la adherencia, cada una de ellas controlada por distintos mecanismos.

La primera fase está considerada como instantánea, y la adhesión es reversible. La segunda fase es una adherencia firme e irreversible que requiere un "período de incubación", descrito ya en su momento por Zobell (1936), de unas tres horas. Este tiempo es, presumiblemente, el que necesitan las bacterias para producir los "cementos" extracelulares necesarios para una firme adherencia. Hendricks (1975) observó estas dos fases propuestas por Marshall para bacterias heterótrofas.

La adsorción inicial de las bacterias en

superficies sumergidas, ocurre casi instantáneamente.(Zobell, 1943; Marshall, Stout y Mitchell, 1971; Meadows, 1971). Fletcher (1977) modeló la tasa de adherencia usando una isoterma de adsorción modificada de Langmuir.

Durante esta primera fase de adherencia, las bacterias móviles y no móviles, permanecen en movimiento. Las móviles girando violentamente alrededor de su eje y las no móviles exhibiendo un movimiento Browniano.

Las investigaciones hechas por Meadows, confirman las observaciones hechas por Marshall con bacterias marinas.

Los factores que afectan a la adherencia de los microorganismos sobre los soportes, (Daniels, 1971), son:

1.- Carácter de los microorganismos:

A.Especies.

B.Medio de cultivo.

C.Edad del cultivo.

D.Medio en suspensión.

E.Concentración.

F.Propiedades superficiales.

G.Interacciones célula-célula.

H.Interacciones célula-soporte.

2.- Carácter del soporte:

A.Tipo.

B.Forma iónica.

C.Propiedades superficiales.

D.Rugosidad o aspereza.

E.Interacciones soporte-célula.

F.Interacciones soporte-líquido.

G.Radio de curvatura.

3.- Carácter del medio .

A.pH.

B.Concentración.

C.Composición.

D.Agitación.

E.Tiempo de retención.

F.Temperatura.

G.Interacciones líquido-soporte.

H.Interacciones líquido-célula.

Fletcher (1977), estudió el efecto de la edad del fango, el tiempo , la temperatura y la fase de crecimiento en la fase de adsorción 1. El tiempo requerido para un estado de

adsorción rica osciló entre las 2,5 y las 5 horas.

La segunda fase denominada "Adherencia bacteriana permanente", se caracteriza porque las bacterias pueden "pegarse" a las superficies con tenacidad. Zobell (1943), fue el primero que sugirió que la adherencia firme a las superficies sumergidas fué posible gracias a un "cemento" segregado por las bacterias. Corpe et al. (1970-1975), observaron que las bacterias marinas tienen la propiedad de producir polisacáridos extracelulares. Fletcher y Floodgate (1976), atribuyeron la adherencia a dos polímeros encerrados en la pared celular; ambos contienen polisacáridos ácidos. Estos investigadores sugirieron que el proceso de la adherencia ocurría en dos fases, cada una de ellas resultante de la producción de estos dos polímeros.

Varios investigadores, (Fletcher, 1976; Fletcher y Loeb, 1979; y Dexter, Sullivan, Williams III y Watson, 1975), han estudiado la relación entre las propiedades de la superficie sólida y la adherencia permanente de una película biológica.

### 2.3.2.2.- Efecto de las propiedades del soporte.

Desde la década de los 40, los investigadores han buscado la relación entre las propiedades de la superficie soporte y la adherencia de la biopelícula. Weiss (1968-1970), fué el primero en introducir el concepto de "humectabilidad", "ángulo de contacto" y "tensión crítica superficial" en el campo de la bioadhesión.

Weiss y Blumenson (1967), observaron que las células se adhieren más fácilmente en superficies de alta energía, tales como el cristal, que en superficies de baja energía, tales como el teflón. Baier (1970) reinterpreto los resultados de otros investigadores en términos de tensión crítica superficial. Examinó el porcentaje de células que se desarrollaban respecto a la tensión crítica superficial del soporte y obtuvo una excelente correlación.

Weiss y Blumenson (1967), establecieron que al añadir suero de caballo al medio soporte usado, no hubo diferencia entre la adherencia de las células al cristal o al teflón. Concluyeron que una película de suero adsorbido en

ambos soportes, sirvió como "superficie" para ambos materiales y entonces se comportaron de idéntica manera.

Otros investigadores han estudiado el efecto de varias proteínas sobre la adherencia bacteriana, y concluyeron que, en general, tienden a retrasar el proceso. (Fletcher, 1976-1979; y Meadows, 1971.

En los tratamientos de las aguas residuales, el pretratamiento superficial del medio soporte por una capa de un polímero artificial demuestra ser útil para mejorar la adherencia de coloides y bacterias.

Los reactores biopelícula, tales como los RBCs, lechos bacterianos, y lechos fluidizados tienen pocos problemas en desarrollar una película biológica estable para la eliminación de la DBO o la desnitrificación. Sin embargo, ciertos procesos, como los de nitrificación y los tratamientos anaerobios, requieren varias semanas, y algunas veces, meses (Jeris, 1977 ; y Switzenbaum, 1978), para desarrollar un crecimiento fuerte. Está claro que en estos casos sería deseable desarrollar un método para mejorar el crecimiento de la biopelícula.

La Motta y Hickey (1980), investigaron el uso de

diferentes polimeros como capas superficiales en discos de un reactor rotativo. Las conclusiones que obtuvieron se resumen así: Para mejorar la adherencia inicial de la biopelícula, los polimeros sintéticos catiónicos son los que dan mejores prestaciones; el crecimiento de la biopelícula en aguas de baja dureza, se puede mejorar añadiendo cationes divalentes; al cabo de 1 día se puede observar ya una ligera nitrificación en una cámara cubierta con Calgon WT 2640.

Los resultados obtenidos, demuestran que es factible acelerar el desarrollo de una película de nitrificantes, cubriendo las superficies soportes con un polímero apropiado.

### 2.3.2.3.- Teoría Básica de la Adhesión Inicial.

Para comprender las interacciones entre dos superficies planas, hay que distinguir entre las fuerzas electrostáticas debidas a la doble capa y las fuerzas de interacción atómica denominadas fuerzas de London - Van der Waals. Las primeras son repulsivas y las segundas son atractivas, y componen la llamada teoría DLVO.

La teoría DLVO informa de las interacciones entre dos superficies (Rutter y Vincent, 1980; Marshall, 1985). Las fuerzas repulsivas son debidas a:

- 1.- La doble capa eléctrica.
- 2.- Potencial Zeta.
- 3.- Repulsión de Born.

Las fuerzas atractivas entre partículas se denominan:

- 1.- Fuerzas de London - Van der Waals.
- 2.- Fuerzas de Debye.

### 3.- Fuerzas de Keesom.

La explicación que ayude a comprender el efecto de estas fuerzas sería:

La doble capa eléctrica se forma por la unión de dos capas, adyacentes a la superficie de las partículas, denominadas capa fija y capa difusa. La capa fija está compuesta de contraiones que se han podido originar en la misma superficie o en la solución y que han sido atraídos hasta allí por la carga superficial que comunica a la partícula propiedades análogas a las de los iones.

La capa difusa está formada por contraiones y similiones. Por razones de neutralidad, la carga total de los iones que determinan el potencial debe ser igual a la carga total de las capas fija y difusa.

Los fenómenos que originan la carga eléctrica superficial de las partículas, dependen fundamentalmente de la naturaleza de la propia partícula.

El potencial zeta o potencial electrocinético ( $\zeta$ ) se puede explicar considerando el movimiento de una partícula

en un líquido, que produce un corte en un plano exterior a los iones fijos. Entonces, sólo se mueven los iones fijos con la partícula, y por lo tanto hay un movimiento relativo entre la partícula y el fluido, neutralizándose parcialmente la carga superficial.

El rango del potencial zeta depende del potencial de superficie, la concentración y la carga transportada por los contraiones. Al neutralizarse parte de la carga superficial, la partícula se moverá hacia el electrodo de signo opuesto bajo la acción de un campo eléctrico (electroforesis), lo cual se puede aprovechar para determinar el potencial zeta por medio de una propiedad electrocinética tal como la movilidad electroforética o potencial de corriente.

Tales medidas determinan la magnitud de las fuerzas repulsivas y, por lo tanto, la estabilidad de las suspensiones.

La repulsión de Born entra en acción cuando dos partículas se acercan tanto que las nubes de sus átomos interactúan, originándose la repulsión.

Las fuerzas de London, también llamadas fuerzas de

dispersión, explican el fenómeno de atracción de cualquier molécula, incluidas aquellas que no tienen momento dipolar permanente.

Debido a esto, el estado líquido puede ser alcanzado por cualquier sustancia, incluidos los gases nobles.

El origen de estas fuerzas que actúan con independencia de los dipolos moleculares, los cuales son necesarios para que aparezca la atracción dipolo - dipolo y el efecto de inducción, es el movimiento de los electrones en las moléculas vecinas, y se estudia mecanocuánticamente.

La energía de atracción es proporcional al cuadrado de la polaridad, e inversamente proporcional a la sexta potencia de la distancia de separación, esto es:

$$U_{\text{London}} \propto \frac{\alpha^2}{r^6} \quad (2.105)$$

La atracción dipolo - dipolo consiste en que las moléculas con momento dipolar permanente ejercen una atracción efectiva sobre las demás moléculas, como resultado

de la interacción entre sus dipolos. Estas fuerzas se denominan " Fuerzas de Keesom"

Para dos moléculas polares, con momento dipolar  $\mu$ , separadas una distancia  $r$ , la energía de atracción dipolo - dipolo, para valores elevados de  $r$ , frente a la distancia intercargas en el dipolo, es:

$$U_{D-D} = - \frac{2}{3} \frac{\mu^4}{\left[4 \pi \epsilon_0\right]^2 r^6 k T} \quad (2.106)$$

En 1.920 P. Debye demostró que para un par de moléculas con momento dipolar  $\mu$  y polarizabilidad  $\alpha$ , la energía potencial de atracción que resulta de la interacción dipolo - dipolo inducido, o efecto de inducción, es

$$U_{\text{inducida}} = - \frac{2\alpha\mu^2}{4\pi\epsilon_0 r^6} \quad (2.107)$$

El efecto descrito por la ecuación (2.106), se explica cuando el dipolo de una molécula interacciona con los

electrones de una vecina polarizándola. Los electrones de esta segunda molécula quedan desplazados y de esta forma interaccionan con el dipolo de la primera y dan origen a un efecto de atracción.

En la figura 2.18 se muestra la gráfica de atracción efectiva, repulsión y efecto energético total entre las moléculas de un líquido.

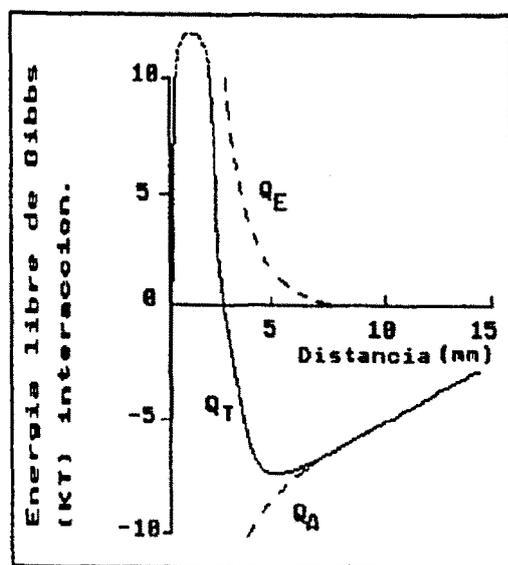


FIG.2.18. Adherencia inicial.  
(Fuente: Van Loosdrecht).

La energía libre de interacción,  $G_T$ , es la suma de dos términos  $G_A$  y  $G_E$  o energías debidas a las fuerzas de atracción o de Van der Waals y de las interacciones

electrostáticas, respectivamente.

Se considera (Rouxhet y Mozes, 1990), una partícula de radio  $r$  situada a la distancia  $h$  con respecto al plano superficial.

Si  $h$  es muy pequeño respecto a  $r$ :

$$G_A = - \frac{A r}{\delta h} \quad (2.108)$$

Donde  $A$  es una constante que representa la influencia de la composición química de las superficies en la resistencia a la interacción.

Algunos autores, (Rutter y Vincent, 1980; Tadros, 1980 y Visser, 1976), consideran que las fuerzas dipolo-dipolo inducido (Debye) actúan también a largas distancias ; en un medio acuoso, su contribución a las fuerzas de Van der Waals, puede serlo como fuerzas de dispersión (Nir, 1976).

El término electrostático  $G_E$  es una evaluación de las interacciones de la doble capa eléctrica. De acuerdo con la teoría de la doble capa, la variación de potencial

eléctrico en función de la distancia  $h$  con respecto a la superficie cargada es:

$$\psi^0 = \psi_d \exp(-\alpha h) \quad (2.109)$$

En la ecuación (2.108),  $\psi^0$  es el potencial de superficie real que debido a los procesos de adsorción se sitúa en la capa de Stern o capa fija.  $\psi_d$  es el potencial de la doble capa difusa y  $\alpha^{-1}$  es la amplitud del potencial de la doble capa difusa.

Si se consideran  $\psi_1$  y  $\psi_2$  los potenciales de la doble capa difusa de las dos superficies y si son menores de 50 mV, y si no están afectados por la interacción, la energía libre debida a las interacciones electrostáticas,  $G_E$  será:

$$G_E = w \epsilon r \left[ \frac{\psi_1^2 + \psi_2^2}{\psi_1^2 + \psi_2^2} \left[ \frac{2\psi_1 \psi_2}{\psi_1^2 + \psi_2^2} \ln \frac{1 + \exp(-\alpha h)}{1 - \exp(-\alpha h)} + \ln [1 - \exp(-2\alpha h)] \right] \right] \quad (2.110)$$

Siendo  $\epsilon$  la permitividad del medio.

Cuando las dos superficies tienen cargas del mismo signo entonces  $G_E$  es repulsiva y la variación de  $G_T$  en función de la distancia determina, a cortas distancias, el llamado mínimo primario y a largas distancias el mínimo secundario. En la figura (2.18), (van Loosdrecht, 1989), se pueden apreciar ambos mínimos para una partícula esférica de 500 nm de radio ;  $\psi_1 = \psi_2 = -15$  mV;  $A = 2 \cdot 10^{-21}$  J;  $I = 0,1$ .

Para la determinación de  $G_E$  se consideran solamente las interacciones de la doble capa eléctrica a distancias mayores de 1 nm.  $\psi_d$  se evalúa por el potencial zeta.

La superficie de los microorganismos está cargada negativamente en condiciones de pH normales, este es también el caso de algunos materiales considerados como potenciales soportes, incluyendo polímeros orgánicos. Las células son retenidas en el mínimo secundario y tal adherencia puede ser reversible y permitir la movilidad de las células (Marshall, 1985; y Tadros, 1980).

Para conseguir la firme retención habría que superar la barrera de alta energía que en la figura 2.19, se

representa.

Entonces se puede deducir de lo expuesto que, para promover la inicial adhesión microbiana se pueden modificar las propiedades superficiales de los microorganismos o del soporte tal como se indicó, por medio de tratamientos.

En la tabla 2.1 se relacionan los tratamientos usados con diferentes microorganismos y diferentes soportes.

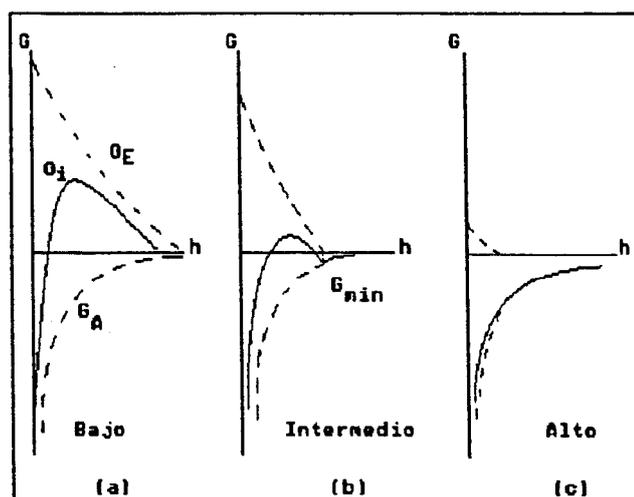


FIG. 2.19. Adherencia inicial (Fuente: Characklis Marshall.)

Microorganismo	Soporte	Tratamiento		Referencia
		Células	Soporte	
Saccharomyces Cerevisiae	Vidrio	Al <sup>3+</sup>	-	Van Haetch et al, 1985
	Vidrio	Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	-	Mozes & Rouxhet, 1985
	Polícar	-	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mozes & Rouxhet, 1985
	Vidrio Policarbona.	-	Al(OH) <sub>3</sub> Fe <sup>3+</sup>	Changui et al, 1988
Polímeros Orgánicos	-	Fe <sup>3+</sup>	Mozes et al, 1987	
Kluyveromyces Lactis	Lana de Vidrio	-	Chitosan	Champluvier et al, 1988 1989
Arthrobacter simplex	Vidrio Lana vidrio	Al <sup>3+</sup> -	- Al(OH) <sub>3</sub>	Mozes & Rouxhet, 1984 Mozes & Rouxhet, 1984
Acetobacter aceti	Vidrio Mica Polímer. Orgán.	-	Fe <sup>3+</sup>	Hermesse et al., 1988 Mozes et al., 1989
Klebsiella oxyloca	Lana Vidrio	-	Chitosan	Champluvier et al, 1989
Corynebacterium glutamicum	Vidrio	-	Aminosilane	Buchs et al., 1988
Xanthomas campestris	Vidrio	Al <sup>3+</sup>	-	No publicado
		-	Al <sup>3+</sup>	No publicado
		-	Al(OH) <sub>3</sub>	No publicado
Escherichia coli	Vidrio	Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	No publicado
Bacillus licheniformis	Vidrio Policarbonatos Poliuretano Lana de vidrio	-	Fe <sup>3+</sup> Chitosan Aminosilane	No publicado

TABLA 2.1. - Inmovilización de microorganismos por modificación superficial de las células o de los soportes.

Para definir totalmente la adhesión, quedan por considerar las fuerzas de corto alcance y la aproximación termodinámica.

De acuerdo con la aproximación termodinámica, los procesos de adhesión se consideran como creadores de una nueva interfase, el soporte - célula (CS), por ruptura de las dos interfaces preexistentes, líquido - célula (CL) y el líquido - soporte (SL). Este efecto permite estudiar el contacto molecular entre las dos superficies que se han de adherir.

La tendencia de las superficies para asociarse está expresada por la variación de energía libre en el proceso

$$\Delta G_{\text{adhesion}} = \gamma_{\text{CS}} - \gamma_{\text{CL}} - \gamma_{\text{SL}} \quad (2.111)$$

Donde  $\gamma$  es la energía libre para el área interfacial. Los principales procedimientos para determinar la energía libre de adhesión y las tensiones interfaciales se pueden deducir por los métodos que se refieren a continuación de forma breve.

La ecuación de Young describe el efecto de la termodinámica interfacial.

$$\gamma_{XV} - \gamma_{XL} = \gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_X - w_o - \gamma_{XL} \quad (2.112)$$

Donde X representa cualquier sólido y V la fase de vapor saturado;  $\theta$  el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido X;  $\gamma_{LV}$  es la tensión superficial del líquido L;  $\gamma_X$  es la energía libre superficial del sólido en contacto con el vacío y  $w_o$  es la presión de difusión del vapor adsorbido.

La energía interfacial es la suma de las interacciones de las fuerzas de dispersión o de London, de las interacciones dipolo - dipolo de Keesom, de las interacciones dipolo - dipolo inducido de Debye, del enlace de hidrógeno (Good, 1979), etc.

El llamado "enlace de hidrógeno" tiene propiedades específicas y aparece cuando algún átomo de hidrógeno ácido, portador de una carga positiva parcial, como son los hidrógenos de los enlaces O-H, N-H, etc., pueden aproximarse a otro átomo de tipo básico, rico en electrones, como son los



(Good, 1979). En este caso las ecuaciones (2.112) y (2.113) resultan ser:

$$\gamma_{LV} \left[ \cos \theta + 1 \right] = 2 \left[ \gamma_X \cdot \gamma_{LV} \right]^{1/2} \quad (2.114)$$

La energía superficial del sólido X se puede deducir por el ángulo de contacto del líquido L con tensión superficial conocida.

Para evaluar el parámetro de interacción, se aplica la ecuación de aproximación de estado (Neumann et al., 1974), que considera que  $\gamma_{xy}$  es función de  $\gamma_x$  y de  $\gamma_y$  y, además, no hay interacción de la superficie con el vapor ( $w_o=0$ ) Esto conduce a:

$$\phi = 1 - 0,0075 \gamma_{xy} \quad (2.115)$$

$$\gamma_{XY} = \left( \gamma_{XV}^{1/2} \gamma_{YV}^{1/2} \right)^2 \left[ 1 - 0,015 \left( \gamma_{XV} \cdot \gamma_{YV} \right)^{1/2} \right]^{-1} \quad (2.116)$$

$$\cos \phi = \frac{\left[ 0,015 \gamma_{XV} - 2 \right] \left( \gamma_{XV} \gamma_{LV} \right)^{1/2} + \gamma_{LV}}{\gamma_{LV} \left[ 0,015 \left( \gamma_{XV} \gamma_{LV} \right)^{1/2} - 1 \right]} \quad (2.117)$$

Resolviendo la ecuación (2.116), se llega a determinar la energía superficial de un sólido a partir del ángulo de contacto.

Otros investigadores, (Gerson, 1980; Owens y Wendt, 1969; Busscher et al., 1984; Absolom et al, 1983; Fletcher y Pringle, 1985), han establecido otras ecuaciones a partir de aproximaciones y supuestos que permiten resolver las incógnitas planteadas.

En todos los métodos basados en la aproximación termodinámica, las energías libres superficiales se determinan a partir del ángulo de contacto de los líquidos, por lo tanto no se considera en ninguno de ellos el efecto de las interacciones eléctricas entre las superficies. Sin embargo los últimos estudios sí permiten tenerlos en cuenta.

(Hattori y Hattori, 1985,1987; Marshall, 1985; Mozes et al., 1987; Rouxhet et al., 1987).

Por otra parte, la teoría DLVO no permite hacer predicciones a cortas distancias debido a la interrupción de las interacciones eléctricas. Además desatiende las fuerzas que son importantes a cortas distancias como el "enlace del hidrógeno", otros efectos contenidos en la solvatación y el enlace hidrófobo.

Se puede aducir que las interacciones de largo alcance son las más importantes en el control de la deposición de la partícula mientras que las de corto alcance gobiernan las fuerzas necesarias para separar las dos superficies después de la adherencia (Tadros, 1980).

De acuerdo con lo dicho, no hay razón para considerar las fuerzas de corto alcance cuando la repulsión eléctrica es lo bastante alta como para inhibir la adherencia. Sin embargo, cuando sí hay adherencia, las fuerzas eléctricas juegan un papel muy importante en el proceso.

Como se ha dicho anteriormente, los datos

experimentales confirman que ambos efectos marcan las pautas complementarias que describen la adhesión de los microorganismos al soporte. Como caso particular común a ambos efectos, se considera que la carga superficial, la energía superficial o la hidrofobia, son relevantes tanto para las fuerzas de largo alcance como para las de corto alcance, de donde se deduce que van a ser tenidas en cuenta.

La aspereza o rugosidad de la superficie del soporte puede provocar las interacciones descritas de las fuerzas de largo y corto alcance.

Las ecuaciones referenciadas anteriormente muestran que  $G_T$  es proporcional al radio de curvatura. Por lo tanto la barrera de potencial puede ser mucho menor que la considerada al tener en cuenta la superficie celular lisa.

Los efectos adicionales que pueden influir en la adhesión microbiana, y que pueden ser tenidos en cuenta, son los producidos por las interacciones célula-célula. La figura 2.20, muestra la relación entre la densidad de las células que se adhieren al soporte descrito en la misma figura, y el pH del medio (Mozes et al., 1987). Este efecto se debe a la floculación.

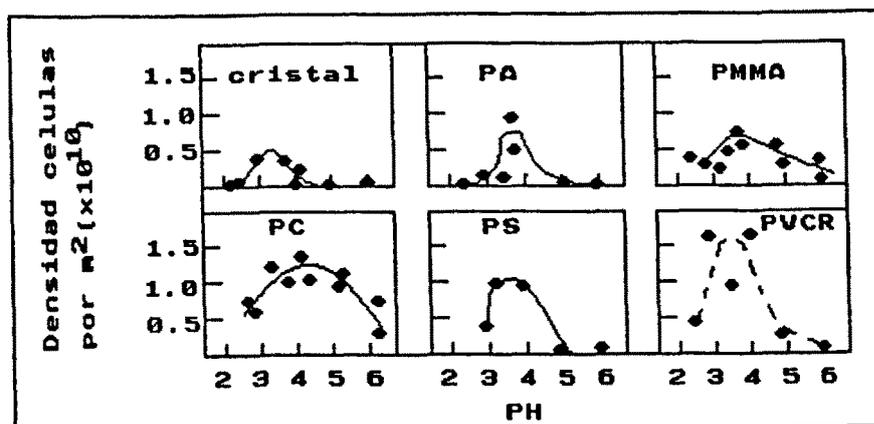


FIG. 2.20 .Adhesion de moniliella pollinis en varios soportes. (Fuente:Može et al).

En la floculación, sólo tienen importancia las fuerzas de London entre las atractivas, y las de la doble capa eléctrica y potencial zeta entre las repulsivas. Por lo tanto la energía neta de interacción, se obtiene por la suma de la curva de energía de atracción (A), y una de las energías repulsivas ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) tal como se representa en la figura 2.21, cuyas magnitudes dependen del potencial de superficie y de la distribución de los contraiones.

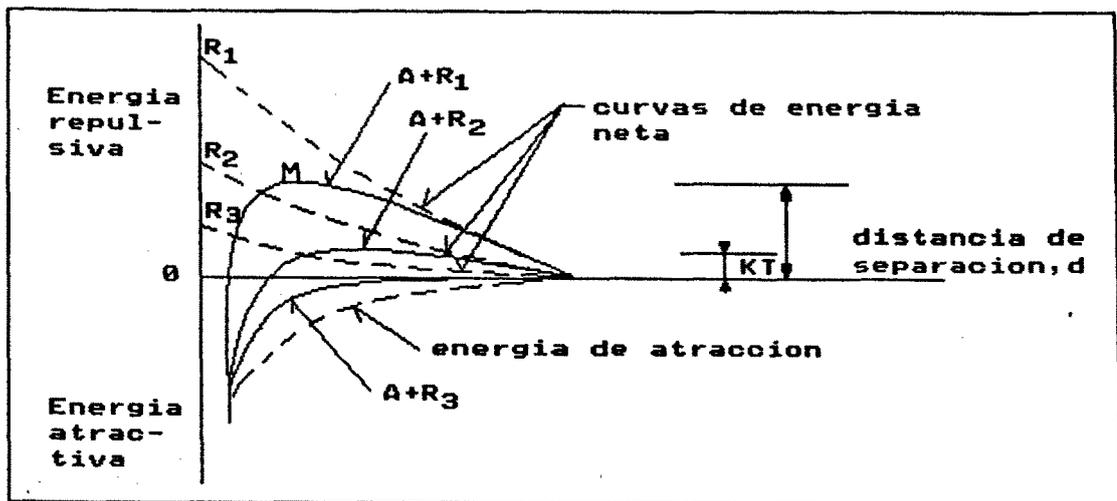


FIG.8.21. Distribuciones de energia potencial neta.

La interpretación de las energías netas es la siguiente: al aproximarse dos células, la energía neta se incrementa hasta un máximo  $M$ , que representa la repulsión entre las células. Para distancias menores que las que determinan  $M$  existe atracción; por lo que para que se produzca la floculación las células deben poseer energías mayores que  $M$ , lo que determina que las células permanezcan unidas.

Las partículas pueden aumentar la energía requerida por la agitación o el movimiento browniano (agitación molecular del fluido) en el que las moléculas transfieren por colisión sus energías cinéticas a las partículas.

En la figura 2.18, se observa que puede existir un mínimo secundario en la curva de energía potencial neta que está situado a distancias de separación comparativamente grandes. Cuando el máximo de energía es lo suficientemente alto para impedir la floculación en el mínimo primario, las partículas mayores que las coloidales pueden flocular en el mínimo secundario, y dado que la barrera de potencial en este mínimo es más baja que la del primario, la floculación será más reversible en aquél que en éste.

La influencia de las interacciones célula-célula se puede ilustrar por medio de la figura 2.22, la cual se explica de la siguiente forma:

-Cuando las células y los soportes tienen carga negativa la adhesión es muy baja y la superficie del soporte cubierta nunca excede del 50% (a).

-Cuando el soporte está cargado positivamente por

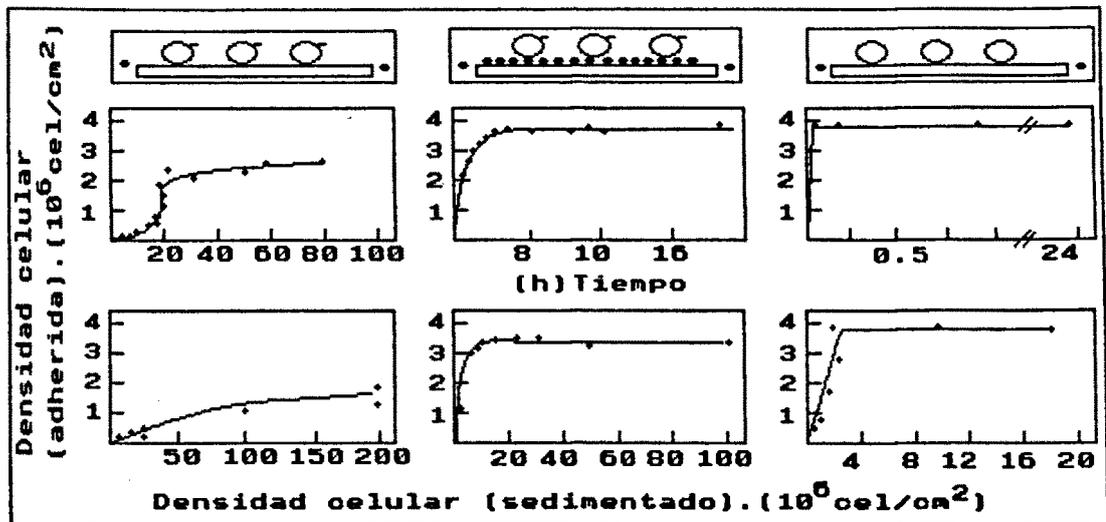


FIG. .Adhesión de *Saccharomyces cerevisiae* en soportes con carga en superficie (Fuente:Van Haecht).

adsorción de partículas de alúmina, la atracción célula-soporte es rápida, pero a medida que el tiempo crece se produce un incremento de las fuerzas de repulsión debidas a las células cargadas con el mismo signo que ya están adheridas. (b).

-Cuando las interacciones célula-célula y célula-soporte son débiles, se logra la máxima superficie cubierta prácticamente de forma instantánea (c).

La comparación de los tres apartados anteriores muestra que una adhesión muy pequeña requiere de la sedimentación de un gran número de células para conseguir la

máxima superficie cubierta. La influencia del incremento de células sedimentadas se atribuye a la presión que ejerce el sedimento en la capa más profunda de células o a la reorganización dentro del principal sedimento de una densa capa de células en contacto con el soporte.

Los polímeros presentes en la interfase célula - soporte, ejercen su influencia en los procesos de adhesión.

Si ambas superficies están cubiertas por polímeros, puede existir una repulsión adicional. Por otra parte, si una superficie está cubierta por polímeros o ambas parcialmente cubiertas, el movimiento libre a través de los canales poliméricos puede hacer que se adsorban en la superficie opuesta y formen un puente entre la célula y el soporte. Este mecanismo se conoce como la formación de "puentes". Este flóculo elemental crece, entonces, formando puentes con otras partículas hasta alcanzar un tamaño óptimo.

La secuencia de reacciones elementales propuesta para representar mejor el mecanismo de la floculación, se puede descomponer en tres fases:

- 1.- Adsorción de floculante en la superficie del sólido.

2.- Colisión de una partícula cubierta de polímero con otra.

3.- Colisiones subsiguientes que conducen a los flóculos.

En orden a describir, aunque sea someramente, cada uno de estos tres apartados se establece que:

1.- La naturaleza del proceso de adsorción depende de la configuración del floculante en disolución, esto es, de su estructura, solubilidad, pH de la solución y de las concentraciones de otros iones presentes. Las fuerzas de unión entre el floculante y la superficie sólida dependen de la naturaleza de ambos materiales y de las condiciones de la solución, pero la adsorción tiene lugar mediante el enlace de hidrógeno, con evidencia de efecto de carga iónica y adsorción de Van der Waals, no específica en algunos sistemas.

2.- Se crean puentes entre las partículas suprimiendo toda clase de movimiento aislado de cada partícula. La floculación de partículas que estén cubiertas de polímero en su superficie, seguirá el tipo de ecuaciones de velocidad de Smoluchowsky, modificando el diámetro de colisión de las mismas.

3.- Se forman agregados que crecen y sedimentan.

Siguiendo la exposición general del problema, en cuanto a la diferencia de las células que tienen cápsula de las que no la tienen, se establece (Hermesse et al., 1988), que: las células que tienen cápsula son capaces de adherirse a soportes silíceos u orgánicos, mientras que las que no la tienen se adhieren solamente en soportes con tratamientos específicos, para disminuir el carácter negativo de su superficie.

Los polímeros pueden actuar de forma similar en las películas biológicas, controlando de esta forma su estabilidad y permeabilidad.

Sin embargo en las biopelículas es necesario distinguir entre dos situaciones que implican mecanismos diferentes. Por una parte, los polímeros influyen en la asociación de células individuales y en su adhesión al soporte. En segundo lugar, los polímeros excretados pueden formar una matriz continua, dentro de la cual las células se multiplican. Los polímeros pueden jugar también un papel muy importante a través del reconocimiento específico de las interacciones.

Otro de los factores adicionales que influyen en la adhesión microbiana es la composición de la solución. Esta influencia puede ser de varias formas:

-Un incremento de la fuerza iónica provoca una compresión de la doble capa difusa y un decrecimiento de la barrera de energía.

-El pH determina el potencial eléctrico superficial de las células y del soporte debido a las reacciones de cambio de protones, lo que hace que la atracción eléctrica célula - soporte pueda llegar a ser elevada o despreciable.

-Algunos constituyentes específicos presentes en la solución pueden reacondicionar la superficie del soporte por adsorción, y por lo tanto cambiar las propiedades de dicho medio.

Por todo lo expuesto se deduce que la comprensión de los fenómenos que engloban la adhesión celular y la formación de la biopelícula necesita del conocimiento de la composición química y propiedades físico-químicas de las superficies interrelacionadas.

En este orden se han sintetizado portadores de

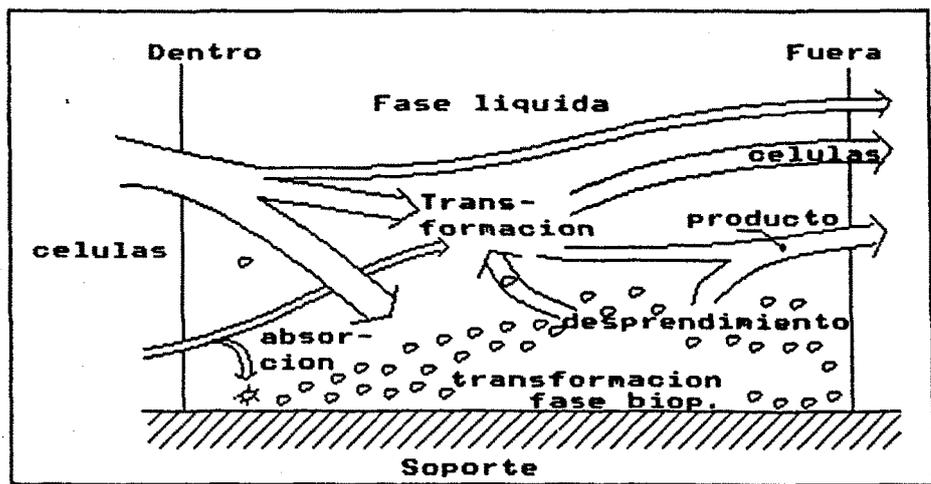
poliuretano poroso modificados con diferentes cargas iónicas y actividad en la superficie que permiten investigar las relaciones entre las propiedades del material y la eficiencia de la biodegradación.

Asimismo, se han analizado diversos microorganismos (Amory et al., 1988; Büchs et al., 1988; Mozes et al., 1988; van der Mei et al., 1988), cuyos resultados muestran que su carga superficial, caracterizada por la medida de la movilidad electroforética "U" (James, 1982; Loeb, 1985) que es proporcional al "Potencial Zeta"  $\zeta$  a la permitividad  $\epsilon$  y a la viscosidad  $\eta$  según la ecuación de Smoluchowski:

$$U = - \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \quad (2.118)$$

es afectada por el pH, por la rugosidad superficial y por la conductividad eléctrica del material celular.

En la figura 2.23 se puede observar la composición de todos los procesos que contribuyen a la acumulación de la biopelícula en el soporte.



**FIG. 2.23.** Composicion de todos los procesos que contribuyen a la acumulacion de biopelícula (Fuente: Characklis).

### 2.3.3.- El Material Soporte.

#### 2.3.3.1.- Materiales utilizados.

En un lecho bacteriano el medio soporte es, generalmente, un aroca o plástico; en un sistema rotativo de contacto es plástico y en un sistema de lecho fluidizado es un medio mineral (arena, carbón o vidrio) o algún otro material granular plástico o metálico. En los dos primeros el radio de curvatura del soporte es grande respecto al espesor de la biopelícula que se va a desarrollar, tanto que el soporte puede ser considerado plano. En el tercero se asumen partículas esféricas. Sobre este medio soporte se ha de adherir la biomasa hasta conseguir un espesor determinado que está limitado por diversos condicionantes.

Los experimentos llevados a cabo con membranas catiónicas o aniónicas, con cargas modificadas por adsorción de productos tensoactivos o polielectrolitos, muestran que la interacción materiales-microorganismos es inmediata cuando la superficie está cargada positivamente (membrana aniónica de ultrafiltración RP 3050, catiónica de ultrafiltración RP 4038 modificada por tensoactivos o polielectrolitos).

Inversamente, cuando las cargas superficiales son negativas, la interacción estática, (la simple colonización), no existe.

Los soportes a base de carbón activado (pulverizado o granulado), arena de cuarzo (Heijnen et al., 1986), arcilla expandida, lava y plásticos porosos (Atkinson, 1981), o no porosos bajo la forma de gránulos (Camilleri, 1988); Weiland et al., 1988), se usan cada vez más para ser soportes de biomasa. Las propiedades de estos materiales son variables hasta cierto punto, sin embargo sus aplicaciones se restringen a determinados usos.

Los poliuretanos, creados por vez primera por Bayer AG en 1937, forman ahora un grupo de plásticos, cuyas propiedades muestran más variedad que las de cualquier otro grupo. Su prueba como potenciales soportes, tuvo a su favor un gran número de factores:

- El hecho de que sus propiedades (densidad, velocidad de sedimentación, tamaño de las partículas) pueden ser modificadas.
  
- Alta porosidad interna.
  
- Alta estabilidad a la hidrólisis.

- La no degradabilidad biológica.

También la investigación actual sigue una línea en "soportes geotextiles". Este término designa cualquier producto o artículo textil usado en aplicaciones geotécnicas y más generalmente en trabajos de ingeniería civil. Los geotextiles tienen dos de las tres caras dimensionales, hechas de fibras sintéticas (Sotton, 1981 y Raumann, 1982).

Para la fabricación de estos soportes, se recurre a los polímeros más comunes: Polipropileno, poliéster, poliamidas,...Aparte de estos constituyentes, los geotextiles se distinguen por como están ensambladas sus fibras, que les confiere una serie de propiedades: filtración, permitividad, transmitividad, resistencia a la tracción y flexión. Estas propiedades se definen de acuerdo a las demandas para un determinado uso.

En esta investigación, se han usado dos membranas Fluoropore (PTFE), biológicamente inertes y de amplia compatibilidad química. Son hidrófobas, y por lo tanto, adecuadas para el filtrado de gases. Estas membranas son autoclavables, y estables hasta los 130<sup>o</sup>C.

### 2.3.3.2.- Tipos y Características de Membranas.

El término membrana empleado en Biofísica, Biología y Química, designa un sistema cuyo espesor es muy pequeño comparado con su superficie, que separa dos fases macroscópicas, respecto de las que ejerce un control selectivo de las transferencias de materia y energía entre ellas.

Hay dos formas según las cuales los diferentes componentes de las fases en contacto con la membrana pueden pasar a su través:

- 1.- Mediante disolución en una cara de la membrana y posterior liberación en la otra, con la consiguiente disolución en la correspondiente fase externa.
- 2.- Pasando a través de los poros, que forman parte de la estructura interna de la membrana.

En cualquier caso, el proceso está gobernado por las propiedades tanto de la membrana como de las disoluciones en contacto con ella.

Las propiedades de la membrana que más influyen en este proceso de permeación o de transporte, son:

- 1.- El espesor.
- 2.- La solubilidad de las especies permeantes en la membrana.
- 3.- La carga eléctrica sobre las superficies de la membrana.
- 4.- El signo y la densidad de la membrana (cuando se trata de permeantes cargados).
- 5.- El ancho y la tortuosidad de los poros.
- 6.- La carga y movilidad de los iones transportados a través de los poros.

El transporte másico a través de una membrana, puede ser debido a la difusión de las moléculas de las fases externas, o a un flujo convectivo provocado por un campo eléctrico, o por un gradiente de concentración, temperatura o presión, actuando separada o simultáneamente.

Las membranas se clasifican atendiendo a diversos conceptos. En orden a su espesor, que puede variar entre 10

nm y 1 cm, pueden ser gruesas y delgadas. Las gruesas son las que tienen un espesor macroscópico (superior a la micra), y las delgadas comportan un espesor comparable a las dimensiones moleculares.

En cuanto a su estructura pueden ser porosas y compactas; homogéneas y heterogéneas; simétricas o asimétricas. Y en cuanto a su carga pueden ser neutras o cargadas. Las membranas cargadas que constituyen diafragmas porosos se denominan "membranas intercambiadoras o selectivas".

Los procesos de transporte, son procesos de no equilibrio y como tales, son descritos convencionalmente mediante ecuaciones fenomenológicas, que relacionan el flujo con su correspondiente fuerza generalizada, y que bajo ciertas condiciones adoptan la forma proporcional.

En algunos procesos con membranas las fuerzas pueden ser independientes dando lugar a nuevos efectos.

Así, un gradiente de concentración a través de una membrana puede no sólo dar lugar a un flujo de materia, sino que, en ciertas condiciones, puede también causar el efecto de una diferencia de presión desencadenando un proceso de

ósmosis. El caso contrario se podría producir análogamente.

Para delimitar, entonces, los procesos de transporte y separación en membranas, se establece que sólo tiene importancia aquellas fuerzas generalizadas que dan lugar a flujos significativos de materia. De esta forma se dice que:

- 1.- Una diferencia de presión entre dos fases, da lugar a flujo de volumen.
- 2.- Un gradiente de concentración a través de una membrana provoca un flujo de masa.
- 3.- Un gradiente de potencial eléctrico puede provocar un transporte de materia.

Las membranas sintéticas son membranas artificiales, usualmente del tipo de los polímeros.

Se diferencian cuatro grupos básicos de membranas de este tipo:

- 1.- Medios porosos.
- 2.- Películas homogéneas.

3.- Membranas asimétricas.

4.- Membranas intercambiadoras o selectivas.

En orden a describir las más interesantes desde el punto de vista del trabajo de investigación concreto, se analizan las de medios porosos y las intercambiadoras o selectivas

Las primeras representan la forma más simple de membrana en lo que respecta a las propiedades de transporte y consisten en una matriz sólida con poros, de diversos materiales como óxidos metálicos, grafito o polímeros. Las más sencillas son de vidrio sinterizado preparado con óxidos de silicio o de aluminio. Los poros tienen un rango de tamaños comprendido entre 1 nm y 50  $\mu\text{m}$ ; algunas de estas membranas poseen poros cilíndricos casi perfectos y paralelos entre sí, y se obtienen a partir de una capa polimérica de espesor entre 10 y 20  $\mu\text{m}$ .

En las llamadas membranas microporosas, los radios de poro son tan pequeños que se produce una separación a nivel molecular entre las especies disueltas y las partículas de disolvente. Se les llama también membranas semipermeables.

La mayoría de las membranas comerciales se preparan

a partir de polímeros de celulosa

Las membranas selectivas poseen en sus superficie (caras externas y paredes de poros) una carga eléctrica.

Cuando es positiva, la membrana es intercambiadora de aniones, pues contiene grupos catiónicos fijos que ligan a los aniones de los fluidos en contacto con ella; si los grupos cargados fijos a la membrana son de tipo aniónico, la membrana se llama intercambiadora de cationes. Los procesos de separación con este tipo de membranas, se basan en la exclusión de los "similiones" o iones cuya carga es del mismo signo que la de la membrana.

En contacto con una disolución acuosa de tipo electrolítico, el contenido de electrolito en los poros depende de la densidad superficial de carga eléctrica en las paredes de los mismos y de las concentraciones de las disoluciones en contacto con la membrana.

La doble capa eléctrica, formada sobre las paredes de los poros, tiene una concentración muy grande de "contraiones" (iones con carga del mismo signo que la de la membrana).

Cuando las disoluciones extramembranas son

diluidas y los poros son tan finos que el espesor de la doble capa es comparable con el radio de los mismos, entonces los contraiones están en claro exceso sobre los simliones en el interior de los poros.

En el caso extremo de que la doble capa eléctrica llene completamente el poro, en el interior de éste, y a efectos prácticos sólo estarán presentes los contraiones, por lo que serán los únicos iones permeables a través de la membrana en estas condiciones.

Si las disoluciones son más concentradas, y los poros más anchos, el exceso de contraiones sobre simliones puede llegar a ser despreciable, mostrando la membrana un efecto similar sobre ambos tipos de iones.

La constitución de las membranas están constituidas por una matriz polimérica a la que se han unido de forma covalente grupos ionizables, los cuales deben estar lo suficientemente disociados para crear una carga neta sobre la matriz. Poseen unos espesores típicos entre 100 y 500  $\mu\text{m}$  y cuando están en contacto con disoluciones acuosas se empapan en una cantidad que depende de la concentración de grupos ionizados sobre la matriz y de la superposición de los caracteres hidrófilo e hidrófobo del material polimérico que

la constituye.

Si la densidad de grupos iónicos fuese lo suficientemente grande y la matriz polimérica fuese suficientemente hidrófila, podría llegarse a la completa disolución de la membrana. Esto se evita introduciendo en una de las etapas del proceso de fabricación, eslabones químicos que ligan las cadenas poliméricas de la matriz.

Cuando la matriz es muy hidrófoba no son necesarios los eslabones mencionados, y el grado de empapamiento está determinado por la concentración de los grupos iónicos en la matriz.

## 2.4.- LA TRANSFERENCIA DE OXIGENO.

### 2.4.1.- Fundamentos de la Transferencia de Materia por

#### Difusión

Es reconocida la importancia del oxígeno que se debe aportar a un proceso de depuración con el objetivo claro de hacer posible las reacciones bioquímicas de oxidación y síntesis, además de minimizar los costos del proceso.

En este apartado se hacen las consideraciones generales de la transferencia de la materia por difusión.

Se denomina:

A.- Superficie

$C_A$ .- Concentración molar del componente 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

$C^*$ .- Concentración de oxígeno disuelto en saturación en la interfase gas-líquido.

- $D_A$ .- 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.
- $K_1$ .- Constante de velocidad de reacción referida a la unidad de volumen del sistema.
- $l$ .- Espesor.
- $N_A$ .- Flujo molar del componente A respecto a una superficie estacionaria.
- $p_A$ .- Presión parcial del componente A.
- $R$ .- Constante de los gases perfectos.
- $R_A$ .- 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 exterior de un cilindro.
- $r$ .- Coordenada radial de posición.
- $T$ .- Temperatura.
- $t$ .- Tiempo.
- $v$ .- Velocidad de la corriente.
- $x$ .- Coordenada de posición.

Por una parte la transferencia se desarrolla siempre en flujos de fluidos con dos o más componentes, y por otra, generalmente la misma va acompañada de los transportes de cantidad de movimiento y energía. Por lo tanto, se

requiere la solución simultánea de las ecuaciones de las tres propiedades.

Dada la complejidad de estas ecuaciones en su forma más general, en muchas ocasiones pueden utilizarse argumentos que simplifiquen las formas, bien porque resulte aceptable suponer valores medios constantes de las propiedades físicas del sistema, o bien porque alguno de sus términos puedan despreciarse en determinadas circunstancias.

Así, para un flujo Newtoniano, mezcla binaria, con valores medios prácticamente constantes de sus propiedades físicas ( $\delta$ ,  $\mu$ ,  $k$ ,  $D_{AB}$ ,  $c_p$ ) y efectos térmicos debidos a la disipación de energía por rozamiento y a las reacciones químicas, despreciables, serán aplicables las siguientes ecuaciones:

1.- Conservación de materia total:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.119)$$

2.- Conservación de los componentes individuales:

$$\frac{\delta C_A}{\delta t} + \vec{v} \cdot \nabla C_A = D_{AB} \nabla^2 C_A - \frac{M_B}{M} + R_A \quad (2.120)$$

$$\frac{\delta C_A}{\delta t} + \nabla \cdot (C_A \vec{v}) = D_{AB} \nabla^2 C_A + R_A \quad (2.121)$$

3.- Conservación de cantidad de movimiento:

$$\rho \left( \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla p + \rho g \quad (2.122)$$

4.- Conservación de la energía:

$$\rho c_p \left( \frac{\delta T}{\delta t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = K \nabla^2 T \quad (2.123)$$

En general, cualquier problema de difusión de materia implicará la resolución del modelo matemático constituido por las ecuaciones vectoriales (2.119), (2.120) o

(2.121), (2.122) y (2.123), o las más generales de las que se derivan de no cumplirse las hipótesis que condujeron a ellas, expresadas en el sistema de coordenadas que aconseje la forma del sistema y las condiciones límites que correspondan. Se llegará así a las distribuciones de velocidades, temperaturas y concentraciones en el sistema.

Si el sistema puede considerarse isoterma y/o isóbaro podrá prescindirse de las ecuaciones de conservación de la energía y/o de cantidad de movimiento, simplificándose el sistema aunque se pierda algo de realismo.

También para establecer con suficiente precisión la distribución de concentraciones, son muchos los casos en que bastan una o dos coordenadas, denominándose la difusión unidimensional o bidimensional.

#### 2.4.2.- Modelos Teóricos de Transferencia de Oxígeno.

En la disolución del oxígeno, la fuerza impulsora representa la diferencia de actividad entre el oxígeno en la fase gaseosa y el oxígeno disuelto en el agua.

El flujo molar o flujo de masa de oxígeno a través de un área unitaria en la unidad de tiempo,  $N_A$ , puede expresar la tasa de transferencia por la ecuación:

$$N_A = K \left( P_B - P_L \right) \quad (2.124)$$

El paréntesis representa la diferencia de actividad del oxígeno en la fase gaseosa y líquida y  $K$  es el coeficiente de la masa total que describe la transferencia del oxígeno del gas al líquido. Se pueden considerar dos etapas en el proceso total:

- 1-. El oxígeno se disuelve en el líquido para formar una capa

relativamente concentrada en la interfase gas-líquido.

2.- La transferencia desde la interfase al volumen del líquido.

Esta segunda etapa controla prácticamente el proceso total de transferencia, debido a que la solubilidad del oxígeno en el agua es muy baja. Por esto, no es raro encontrar  $N_A$  expresada en función de las concentraciones en la interfase y el líquido y el coeficiente de transferencia de masa en fase líquida,  $K_L$ .

$$N_A = K_L [C_I - C_L] \quad (2.125)$$

Si  $C_I = C^*$  o concentración de saturación, que según la ley de Henry:

$$P_B = H C^* \quad (2.126)$$

Donde: H es la constante de Henry.

La Tasa de Transferencia de Oxígeno, (TTO), por unidad de tiempo y por volumen unitario del líquido, estará dada por:

$$TTO = K_L \frac{A}{V} [C^* - C_L] \quad (2.127)$$

Siendo: A el área total de la interfase y V el volumen del líquido correspondiente.

Según la Primera Ley de Difusión de Fick, el flujo de masa,  $N_A$ , respecto a una superficie estacionaria, es proporcional al gradiente de concentración del oxígeno,  $\delta C / \delta y$ . La constante de proporcionalidad se conoce como "coeficiente de difusión"  $D_A$ . Entonces:

$$N_A = - D_A \left( \frac{\delta C}{\delta y} \right) \quad (2.128)$$

Donde: C es la concentración de oxígeno disuelto e "y" es la dimensión lineal, normal al área considerada.

Si la difusión se considera simple y en régimen estacionario, se cumple que:

$$\frac{\delta C_A}{\delta t} = 0 \quad (2.129)$$

$$\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = 0 \quad (2.130)$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = 0 \quad (2.131)$$

$$R_A = 0 \quad (2.132)$$

Si, además, la difusión es unidimensional, de un sólo componente a través de un sólido poroso, a temperatura constante, y con una muy pequeña diferencia de presiones, teniendo en cuenta las igualdades anteriores y que  $v = 0$ , la ecuación general se simplifica a:

$$\nabla^2 C_A = 0 \quad \therefore \quad \nabla^2 P_A = 0 \quad (2.133)$$

Expresión de la Ecuación de Laplace aplicada a la concentración o presión del gas A.

Si el sólido poroso es de superficie transversal de paso cilíndrica, se deduce de las expresiones anteriores el siguiente modelo matemático:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d P_A}{d r} \right) = 0 \quad (2.134)$$

$$r = R_1 \quad : \quad P_A = P_{A1} \quad (2.135)$$

$$r = R_2 \quad : \quad P_A = P_{A2} \quad (2.136)$$

Modelo que resuelto conduce a las ecuaciones:

$$P_A = - \frac{P_{A1} - P_{A2}}{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)} \ln \frac{r}{R_1} + P_{A1} \quad (2.137)$$

$$\begin{aligned} \left( N_A \right)_{R_2} &= - \frac{D_A}{R T} \left( \frac{d P_A}{d r} \right)_{r=R_2} \\ &= \frac{D_A}{R T} \frac{P_{A1} - P_{A2}}{\ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)} \frac{1}{R_2} \end{aligned} \quad (2.138)$$

$$A_2 \left( N_A \right)_{r=R_2} = \frac{D_A}{R T} A_{me} \frac{P_{A1} - P_{A2}}{R_2 - R_1} \quad (2.139)$$

Si se mantiene el régimen estacionario y la difusión es con reacción química, se tiene:

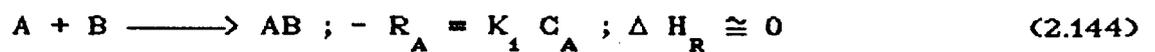
$$\frac{\delta C_A}{\delta t} = 0 \quad (2.140)$$

$$\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = 0 \quad (2.141)$$

$$\frac{\delta T}{d t} = 0 \quad (2.142)$$

$$R_A \neq 0 \quad (2.143)$$

Si la reacción química es homogénea, el gas A es poco soluble en el líquido y al hacerlo se difunde en él, reaccionando irreversiblemente con el compuesto B para dar otro AB por una reacción química de primer orden y escasa tonalidad térmica:



Entonces la forma de la ecuación vectorial de

conservación del componente A será:

$$D_{AB} \frac{d^2 C_A}{d x^2} + R_A = 0 \quad (2.145)$$

Y sustituyendo la expresión de  $R_A$

$$D_{AB} \frac{d^2 C_A}{d x^2} - K_1 C_A = 0 \quad (2.146)$$

$$\therefore \frac{d^2 C_A}{d x^2} - \frac{K_1}{D_{AB}} C_A = 0 \quad (2.147)$$

Estableciendo las condiciones límite, y siendo la ecuación del modelo matemático una diferencial ordinaria lineal de segundo orden, con coeficientes constantes, y, tras calcular las constantes, se llega a la ecuación:

$$\frac{C_A}{C_{A1}} = \frac{\cosh \left[ 1 \sqrt{\frac{K_1}{D_{AB}}} \left( 1 - \frac{x}{l} \right) \right]}{\cosh \left[ 1 \sqrt{\frac{K_1}{D_{AB}}} \right]} \quad (2.148)$$

De esta ecuación se deduce el flujo en la interfase gas-líquido:

$$\begin{aligned} \left( N_A \right)_{x=0} &= - D_{AB} \left( \frac{dC_A}{dx} \right)_{x=0} = \frac{D_{AB} C_{A1}}{l} \left[ 1 \sqrt{\frac{K_1}{D_{AB}}} \right] \\ &\quad \tanh \left[ 1 \sqrt{\frac{K_1}{D_{AB}}} \right] \end{aligned} \quad (2.149)$$

Habiendo supuesto que el producto de reacción AB, debido a su pequeña concentración, no afecta a la difusión del compuesto A en el seno del disolvente B.

### 2.4.3.- Transferencia de Oxígeno en Procesos Biológicos.

El coeficiente volumétrico de transferencia de masa, de dimensiones  $T^{-1}$ , depende del área de la interfase, del volumen del líquido, y de las características físico-químicas del sistema. Este coeficiente varía con la temperatura en la forma: (Banhart, 1969).

$$K_L a (T^{\circ}C) = K_L a (t^{\circ}). \theta^{(T-t)} \quad (2.150)$$

$$\theta = 1,024 \div 1,028$$

La ecuación (2.127), se puede expresar en función de un coeficiente "a" que es la relación entre A y V (área de la interfase y volumen del líquido, respectivamente), de tal forma que la transferencia de oxígeno es proporcional a  $K_L$  y a. La ecuación es:

$$\frac{d c}{d t} = K_L a.(C^* - C) \quad (2.151)$$

Para determinar la capacidad de oxigenación de un sistema de aireación, es necesario conocer el valor del coeficiente volumétrico de transferencia  $K_L a$ .

En un proceso de aireación, el balance de la

concentración de oxígeno viene dado por:

$$\frac{d c}{d t} = K_L \cdot a \cdot (C^* - C) - Q_o \quad (2.152)$$

Siendo  $Q_o$ , el consumo de Oxígeno en el agua.

Existen varios tipos de ensayos para determinar

$K_L \cdot a$ :

-Ensayos en estado de equilibrio (El oxígeno consumido es igual al transferido), donde  $\frac{dc}{dt} = 0$ , y por lo tanto:

$$K_L \cdot a = \frac{Q_o}{C^* - C} \quad (2.153)$$

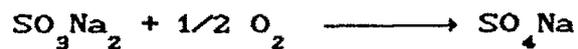
-Ensayos en estado de desequilibrio, sin consumo de oxígeno en el agua, y por lo tanto  $Q_o = 0$ , y

$$K_L \cdot a = \frac{\frac{C^* - C_o}{C^* - C}}{t - t_o} \quad (2.154)$$

Siendo  $C_o$ , la concentración inicial para  $t_o$ .

La representación gráfica de la ecuación (2.154), conduce a una recta de pendiente  $K_L \cdot a$ .

El ensayo más utilizado para determinar la capacidad de aireación de un sistema, es el de oxigenación de un agua limpia previamente desoxigenada (estado de desequilibrio). Para la desoxigenación se utiliza sulfito sódico (con cobalto como catalizador).



A continuación se comienza a airear el agua, y se mide la concentración de oxígeno a intervalos regulares. Con estos valores se determina la recta correspondiente, cuya pendiente es  $K_L a$ .

El método químico para calcular  $K_L a$  en la fase líquida, requiere eliminar la resistencia a la transferencia en la fase gaseosa, por lo que conviene utilizar oxígeno puro.

Se puede emplear una reacción instantánea o una reacción lenta. Se considera una reacción instantánea cuando  $\sqrt{M} > E_i$ . Si además  $Db.ClB/Da.Z.Ca \gg 1$ , el factor de aceleración para la reacción instantánea será:

$$E_i = \frac{Db.ClB}{Da.Z.Ca} \quad (2.155)$$

Siendo:  $E_i$ , Factor de aceleración para la reacción

instantánea. Adimensional.

$D_B$ , Coeficiente de difusión del reactivo en la fase líquida. ( $m^2/s$ ).

$D_A$ , Idem. para el soluto gaseoso.

$C_{LB}$ , Concentración del reactivo en el seno del líquido.  $Kmol/m^3$ .

$z$ , Coeficiente estequiométrico.

$C_A$ , Concentración en la interfase gas-líquido del soluto gaseoso. ( $Kmol/m^3$ ).

La velocidad de absorción es:

$$R.a = K_L.a \frac{D_B \cdot C_{LB}}{D_A \cdot z} \quad (2.156)$$

Conociendo los valores de  $z$ ,  $C_{LB}$ ,  $D_A$  y  $D_B$ , y midiendo experimentalmente la velocidad de absorción, se puede calcular  $K_L.a$ . Para el  $O_2$ , el reactivo en la fase líquida para este método es el  $S_2O_4Na_2$  (Jhaveri and Sharma, 1968).

El empleo del método con una reacción lenta, conduce a usar la velocidad de absorción en la forma de:

$$R.a = K_L.a \cdot C_A \quad (2.157)$$

Conocida  $C_A$ , el cálculo de  $K_L a$  se realiza midiendo experimentalmente la velocidad de absorción, sin necesidad de conocer la cinética de la reacción. Para el Oxígeno como soluto en la fase gas, se emplea el aire como gas inerte y el reactivo en la fase líquida es  $ClCu$ . (Jhaveri and Sharma, 1967).

Otros métodos químicos permiten determinar el área interfacial mediante una reacción rápida de pseudo-primer orden, y la determinación simultánea de los coeficientes de transferencia y del área interfacial por el método de la "recta de Danckwets".

### 3- OBJETIVOS

### 3.-OBJETIVOS

El objetivo general de esta Tesis consistirá en observar el desarrollo de la biopelícula (profundizando en los fenómenos que inciden en éste), en un medio soporte que permita la difusión del oxígeno a través del mismo (aportando éste desde el interior de la biopelícula). Es decir, el estudio del fenómeno biopelícula en un Reactor de Soporte Permeable. (RSP).

Dadas las características especiales del fenómeno bajo estudio, y el previsible campo de aplicación del mismo, se delimita el campo de investigación al caso de: la eliminación de la materia orgánica carbonácea del agua residual.

Dentro del Objetivo General expuesto, se establecen los siguientes Objetivos Específicos o concretos:

- 1.- Descripción del funcionamiento de la biopelícula en soporte permeable.
  
- 2.- Estudio de los factores que inciden en el

funcionamiento.

- 3.- Establecer los parámetros de diseño recomendables para procesos basados en el soporte permeable, en función de los parámetros analizados, teniendo en cuenta las perturbaciones que pueden incidir en el objetivo específico fundamental, como es el caso de la posible nitrificación y desnitrificación.
  
- 4.- Discusión externa de las ventajas y desventajas del RSP frente a otros procesos biopelícula por aplicación de la teoría general, así como, frente a otros procesos biológicos que utilizan oxígeno, como es el caso del proceso de fangos activos con oxígeno.