

03072

17  
28



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado  
del Colegio de Ciencias y Humanidades  
Facultad de Química**

**FALLA DE ORIGEN  
EFECTO DE LOS DESPLAZAMIENTOS BIOCENÓTICOS  
SOBRE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE FÓSFORO EN  
UN REACTOR DISCONTINUO CON BIOPELÍCULA**

**Tesis que para obtener el grado de Maestra en Biotecnología  
presenta la Bióloga**

**Ana Ma.<sup>ría</sup> Muñoz Colunga**



Instituto de Biotecnología

**México D.F. 1995**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **RECONOCIMIENTOS**

Agradezco especialmente al Dr. Simón González la valiosa dirección de este trabajo. Su apoyo, su paciencia y su presencia alentadora fueron fundamentales para la terminación del mismo.

Al personal que labora en el Instituto de Ingeniería y que contribuyó de cualquier forma durante esta investigación.

Al personal que labora en la planta para tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria por las facilidades brindadas.

## INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   | <b>1</b>  |
| Objetivos y alcances   | 2         |
| <b>2. ANTECEDENTES</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2.1 Composición del agua residual</b>   | <b>3</b>  |
| <i>2.1.1 Contaminación generada por sustratos orgánicos</i>                      | 4         |
| <i>2.1.2 Contaminación generada por compuestos nitrogenados</i>                  | 4         |
| <i>2.1.3 Contaminación generada por compuestos de fósforo</i>                    | 4         |
| <b>2.2 Desarrollo función y ecología de películas biológicas</b>                 | <b>5</b>  |
| <i>2.2.1 Desarrollo y función</i>  | 5         |
| 2.2.1.1 Ingestión de sustratos   | 5         |
| 2.2.1.2 Desarrollo fisicoquímico   | 5         |
| 2.2.1.3 Desarrollo microbiológico  | 7         |
| <i>2.2.2 Ecología</i>  | 8         |
| 2.2.2.1 Especies y su distribución   | 8         |
| <i>2.2.3 Protozoarios y metazoarios</i>  | 9         |
| 2.2.3.1 Protozoarios   | 10        |
| 2.2.3.2 Metazoarios  | 10        |
| <b>3. MICROBIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA</b>   | <b>12</b> |
| <b>3.1 Procesos metabólicos</b>  | <b>12</b> |
| <i>3.1.1 Clasificación metabólica de los organismos</i>                          | 13        |
| <i>3.1.2 Metabolismo alterno de acumulación de sustratos orgánicos y fósforo</i> | 14        |
| 3.1.2.1 Microorganismos acumuladores de fósforo                                  | 14        |
| <b>3.2 Bioquímica de la remoción de fósforo</b>                                  | <b>15</b> |
| <i>3.2.1 Modelo Comeau/Wentzel</i>   | 15        |
| 3.2.1.1 Transporte de sustrato   | 16        |
| 3.2.1.2 Condiciones anaerobias   | 16        |
| 3.2.1.3 Condiciones aerobias   | 18        |
| <i>3.2.2 Modelo de Mino</i>  | 18        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.2.1   | Condiciones anaerobias   | 18        |
| 3.2.3     | <i>Modelo de Mino modificado por Wentzel</i>                     | 19        |
| 3.2.3.1   | Condiciones anaerobias   | 18        |
| 3.2.3.2   | Condiciones aerobias   | 19        |
| 3.2.4     | <i>Sustrato diferente de acetato</i>                             | 19        |
| 3.2.5     | <i>Modelo de Tracy y Flammino</i>                                | 20        |
| 3.2.5.1   | Condiciones anaerobias   | 20        |
| 3.2.5.2   | Condiciones aerobias   | 21        |
| 3.2.6     | <i>Modelo de Satoh y Mino</i>                                    | 22        |
| <br>      |  |           |
| <b>4.</b> | <b>DESARROLLO DE PROCESOS PARA REMOCIÓN BIOLÓGICA DE FÓSFORO</b> | <b>23</b> |
| <br>      |  |           |
| 4.1       | <b>Antecedentes</b>  | 23        |
| 4.2       | <b>Procesos</b>  | 24        |
| 4.2.1     | <i>Remoción únicamente de fósforo</i>                            | 24        |
| 4.2.1.1   | Proceso Phostrip   | 24        |
| 4.2.1.2   | Proceso A/O  | 26        |
| 4.2.2     | <i>Remoción de fósforo más nitrógeno</i>                         | 26        |
| 4.2.2.1   | Procesos Bardenpho/Phoredox/A <sup>2</sup> O                     | 26        |
| 4.2.2.2   | Procesos UCT/VIP   | 27        |
| 4.2.2.3   | Procesos Bio-Denitro/Bio-Denifho                                 | 29        |
| 4.3       | <b>Reactores discontinuos</b>                                    | 29        |
| <br>      |  |           |
| <b>5.</b> | <b>MATERIAL Y MÉTODO</b>   | <b>31</b> |
| <br>      |  |           |
| 5.1       | <b>Fundamentos de operación del proceso discontinuo</b>          | 31        |
| 5.2       | <b>División del ciclo</b>  | 32        |
| 5.3       | <b>Unidad experimental</b>                                       | 33        |
| 5.4       | <b>Plan general de la experimentación</b>                        | 35        |
| 5.5       | <b>Muestreo y análisis del agua</b>                              | 36        |
| 5.6       | <b>Muestreo y análisis de protozoarios y metazoarios</b>         | 37        |
| 5.7       | <b>Muestreo y análisis de lodos</b>                              | 38        |
| <br>      |  |           |
| <b>6.</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>                                    | <b>39</b> |
| <br>      |  |           |
| 6.1       | <b>Arranque de la planta piloto</b>                              | 39        |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6.1.1   | Consideraciones generales sobre la operación del reactor   | 40 |
| 6.1.2   | Competencia entre organismos poly-P y no poly-P  | 41 |
| 6.1.3   | Influencia de factores ambientales sobre la capacidad de remoción de ortofosfatos con biopelícula pobre de organismos poly-P | 46 |
| 6.1.3.1 | pH   | 46 |
| 6.1.3.2 | Oxígeno disuelto   | 47 |
| 6.1.3.3 | Temperatura  | 48 |
| 6.1.3.4 | Carga orgánica   | 49 |
| 6.1.4   | Influencia de factores ambientales sobre la capacidad de nitrificación en el proceso de remoción de fósforo                  | 51 |
| 6.1.4.1 | pH   | 53 |
| 6.1.4.2 | Oxígeno disuelto   | 53 |
| 6.1.4.3 | Temperatura  | 54 |
| 6.1.4.4 | Duración de la fracción anaerobia/aerobia  | 54 |
| 6.2     | <b>Modificación de la duración del ciclo y de la proporción anaerobia/aerobia</b>  | 55 |
| 6.2.1   | Eliminación de nutrientes durante la experimentación con ciclos de 12 h y 4 diferentes fases anaerobias                      | 55 |
| 6.2.2   | Eliminación de nutrientes en cada ciclo de tratamiento   | 58 |
| 6.2.2.1 | Fase anaerobia de 7.8 h (65%)  | 58 |
| 6.2.2.2 | Fase anaerobia de 6.0 h (50%)  | 59 |
| 6.2.2.3 | Fase anaerobia de 4.2 h (35%)  | 61 |
|         | a) Nitrificación y desnitrificación simultáneas  | 62 |
| 6.2.2.4 | Fase anaerobia de 9.6 h (80%)  | 62 |
| 6.2.2.5 | Eficiencia de remoción de sustratos orgánicos y fósforo  | 64 |
| 6.2.2.6 | Características generales de la biomasa  | 65 |
| 6.2.3   | Eliminación de nutrientes durante la experimentación con ciclos de 8 h y 3 diferentes fases anaerobias                       | 67 |
| 6.2.4   | Eliminación de nutrientes en cada ciclo de tratamiento   | 69 |
| 6.2.4.1 | Fase anaerobia de 5.2 h (65%)  | 69 |
| 6.2.4.2 | Fase anaerobia de 4.0 h (50%)  | 72 |
| 6.2.4.3 | Fase anaerobia de 2.8 h (35%)  | 73 |
| 6.2.4.4 | Eficiencia de remoción de sustratos orgánicos y de fósforo   | 73 |
| 6.2.4.5 | Características generales de la biomasa y contenido de fósforo en los lodos  | 74 |
| 6.3     | <b>Duración de la etapa anaerobia y consumo aerobio de N-NH<sub>4</sub></b>  | 80 |
| 6.4     | <b>Efecto de la relación DQOs/P-PO<sub>4</sub> sobre la excreción y remoción de P-PO<sub>4</sub></b>                         | 80 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6.5 Comportamiento de la relación P-PO<sub>4</sub> liberado/sustrato almacenado</b> | <b>81</b> |
| <b>7. CONCLUSIONES</b>   | <b>83</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>85</b> |

## RESUMEN

Con base en información recopilada en la literatura, se presenta un análisis de las características de los procesos que permiten la eliminación biológica de fósforo, así como de sus bases microbiológicas y bioquímicas. También se describen los mecanismos que permiten la transformación de contaminantes en reactores con película biológica.

En una planta piloto se estudió el efecto de los desplazamientos biocenóticos sobre la capacidad de remoción de nutrientes en aguas residuales de tipo municipal utilizando un reactor con biopelícula alimentado en forma discontinua. La secuencia de operación involucra 4 etapas que constituyen un ciclo: llenado, anaerobia, aerobia y vaciado.

Se experimentó durante 400 días. Del día 0 al 140 la estrategia de control se basó en modificar la carga orgánica, durante el resto de la experimentación se estudio el efecto que la duración del ciclo y el tiempo de reacción anaerobio/aerobio tienen sobre la eficiencia de remoción de nutrientes.

Los resultados muestran que el sistema es eficiente para eliminar material orgánico, fósforo y nitrógeno amoniacal. Los principales factores que afectan al proceso son: valores de pH menores que 6, cargas orgánicas mayores que 5 gDQOS/m<sup>2</sup>d, etapas anerobias mayores que 80% de la duración del ciclo.

Una operación alternadamente anaerobia/aerobia y un mayor consumo de sustratos carbonosos en etapa anaerobia son condiciones necesarias pero no suficientes para obtener un comportamiento eficiente de degradación de nutrientes.



## **1. INTRODUCCIÓN**

Gran parte del volumen de aguas residuales que se generan en México no recibe ningún tratamiento previo a su descarga en cuerpos naturales de agua (ríos, lagos y canales) o antes de que sean utilizados en la agricultura, riego de áreas verdes y zonas de recreo (lagos artificiales). a través del tratamiento del agua residual es posible reducir los efectos de la contaminación y mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

Utilizando la tecnología convencional se logra remover material orgánico del agua de desecho. Sin embargo, permanecen compuestos de fósforo y nitrógeno. Ambos elementos incrementan la productividad y son responsables de eutroficación en los cuerpos receptores. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de nuevos procesos que permitan eliminar los compuestos mencionados para prevenir la eutroficación y aumentar la calidad de los efluentes. Esto se logra a través de la aplicación de procesos para remoción biológica de fósforo (RBF), los cuales basan su funcionamiento en la selección ecológica de un grupo específico de microorganismos denominados poly-P.

El proceso RBF se caracteriza por la introducción de una fase anaerobia y una subsecuente fase aerobia. Los microorganismos poly-P (estrictos aerobios) son

capaces de acumular grandes cantidades de fosfatos en la fase aerobia y los hidrolizan en la anaerobia. Esta hidrólisis provee la energía para capturar y almacenar sustratos orgánicos, los cuales son metabolizados en la fase aerobia.

La tecnología más ampliamente estudiada utiliza sistemas de flujo continuo con biomasa suspendida. Los procesos con operación discontinua y biomasa adherida constituyen una buena alternativa al sistema anterior debido a que la secuencia de operación ocurre en tiempo y no en espacio, se produce menor cantidad de lodos, además de que la flexibilidad y facilidad de la operación se incrementan mediante la utilización de controladores automáticos. La mayoría de estos estudios se han limitado a experimentos a nivel laboratorio con sustratos sintéticos simulando agua residual. La evaluación del proceso RBF utilizando agua municipal y un reactor con operación discontinua y biomasa adherida es fundamental para aplicar nuevas tecnologías con grandes ventajas en el tratamiento de agua residual.

### **Objetivos**

- a) Conocer el efecto de los desplazamientos biocenóticos sobre la capacidad de eliminación de materia orgánica, fósforo y nitrógeno en un reactor con biopelícula y operación discontinua.
- b) Probar si el proceso biológico para remoción de fósforo, puede llevarse a cabo de forma eficiente, bajo las condiciones bióticas y abióticas, que normalmente se presentan en el tratamiento de aguas residuales.
- c) Identificar las condiciones de operación y ambientales (no controladas) que determinan el funcionamiento del proceso biológico para remoción de fósforo.

### **Alcances**

Este trabajo considera la eliminación de sustratos orgánicos, fósforo y nitrógeno amoniacal utilizando agua residual de tipo municipal y dos fases de tratamiento, alternadamente anaerobia/aerobia.

El análisis de los desplazamientos se fundamenta en a) revisión de literatura especializada, principalmente parámetros de operación propuestos y simulación de éstos en el reactor utilizado en este trabajo, b) variación de la carga orgánica, c) variación del ciclo de tratamiento y del tiempo de reacción anaerobio/aerobio d) influencia de protozoarios y metazoarios en la eficiencia del proceso.

## **2. ANTECEDENTES**

En este capítulo se describen las características de la contaminación orgánica, nitrogenada y de fósforo contenida en el agua residual de tipo doméstico, así como los procesos que contribuyen al desarrollo fisicoquímico y microbiológico de las películas biológicas. También se mencionan algunos aspectos de la ecología y de las poblaciones involucradas en sistemas de biopelícula.

### **2.1 Composición del agua residual.**

Los contaminantes del agua residual se clasifican en tres categorías: a) químicos, b) físicos y c) biológicos. Los contaminantes químicos comprenden material orgánico e inorgánico. La contaminación física incluye: a) cambios de temperatura (contaminación térmica), b) color, c) turbiedad y d) sólidos. La contaminación biológica está constituida por microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico y organismos patógenos transmisores de enfermedades como cólera, tifoidea, disentería y amibiasis.

### **2.1.1 Contaminación generada por sustratos orgánicos.**

La fuente principal de compuestos en las aguas residuales domésticas proviene de desechos resultantes de la actividad humana. La mayor parte de estos desechos son proteínas (aminoácidos) y carbohidratos tales como, glucosa, lactosa y galactosa, de los cuales aproximadamente el 60% se encuentran en forma soluble (Levine *et al*, 1985). Estos compuestos se asimilan más fácilmente por una gran variedad de especies a diferencia de otros insolubles, tales como, celulosa, algunos polipéptidos y grasas, los cuales son más difíciles de degradar.

### **2.1.2 Contaminación generada por compuestos nitrogenados.**

Las fuentes de contaminación nitrogenada (compuestos orgánicos e inorgánicos de nitrógeno) están presentes en los desechos domésticos agrícolas y en algunos desechos industriales. El nitrógeno en las aguas residuales se presentan principalmente como amoníaco (60%) y nitrógeno orgánico (40%) con cantidades muy pequeñas de nitratos y nitritos (menos de 1%). Esta proporción puede variar por contribución de aguas industriales (Barnes y Bliss, 1983).

El amoníaco es un producto característico de la materia orgánica y se puede oxidar microbiológicamente a nitratos y nitritos. Estos procesos ocurren en las corrientes de agua naturales y constituyen una importante contribución a los procesos de autopurificación.

Entre otros problemas, el amoníaco es un contaminante que ejerce una demanda muy alta de oxígeno, requiere más de 4.5 veces su peso de oxígeno para su completa oxidación. (Christensen y Harremoës, 1978)



Este proceso llamado nitrificación, es 3 ó 4 veces más lento que la descomposición heterótrofa de los carbohidratos.

### **2.1.3 Contaminación generada por compuestos de fósforo.**

Las fuentes principales de fósforo en las aguas residuales proceden de residuos humanos, del vertido de residuos alimenticios a las alcantarillas y de los fosfatos utilizados en los detergentes. También son fuente de contaminantes los desechos de la industria de fertilizantes y el uso de éstos en la agricultura.

Los compuestos de fósforo que se encuentran en las aguas residuales son de tres tipos principales: ortofosfatos ( $\text{PO}_4$ ), polifosfatos ( $\text{PO}_7$ ) y fósforo orgánico. Los polifosfatos y el fósforo orgánico son hidrolizados por microorganismos para formar ortofosfatos, los cuales son asimilados por la biomasa. Las cantidades variables de fósforo de los detergentes y la contribución de aguas de desecho

industriales originan una fluctuación en la concentración de fósforo que varía de 3.5 a 20 mg/l en aguas de tipo municipal (Levine *et al*, 1985).

Otros elementos importantes que contiene el agua residual y que son necesarios para mantenimiento, crecimiento y biosíntesis celular son las sales inorgánicas, tales como potasio, magnesio, manganeso y calcio además de elementos traza como hierro, cobalto, cobre, zinc y molibdeno.

## **2.2 Desarrollo, función y ecología de las películas biológicas.**

### **2.2.1 Desarrollo y función.**

#### **2.2.1.1 Ingestión de sustratos.**

El tratamiento de aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto estas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película adherida a la superficie de un medio de soporte sólido e inerte. Los nutrientes y el oxígeno contenidos en el agua residual llegan al interior de la biopelícula por difusión. Los microorganismos metabolizan dichos nutrientes y los productos finales del metabolismo se transfieren por difusión, hacia la fase líquida que se forma sobre la biopelícula, en dirección contraria a la entrada de sustratos. En la figura 2.1 se ilustran los fenómenos involucrados en la transferencia de nutrientes y productos.

Los compuestos coloidales insolubles y las grandes moléculas orgánicas que por su tamaño no pueden atravesar la pared celular, se hidrolizan por enzimas extracelulares o enzimas ligadas a la superficie celular. Las pequeñas moléculas resultantes de la hidrólisis se introducen entonces a la célula por diferentes mecanismos que van desde la difusión hasta el transporte activo por permeasas. Una vez en la célula, el sustrato se transforma y metaboliza por una serie de sistemas multienzimáticos hidrolíticos, oxidativos y de síntesis.

#### **2.2.1.2 Desarrollo fisicoquímico.**

El desarrollo de la película de microorganismos sobre una superficie sólida depende principalmente de dos factores fisicoquímicos:

El primero se refiere a un fenómeno electrostático. Los microorganismos pueden ser considerados como partículas con carga, la cual es provocada por disociación eléctrica de radicales amino, carboxil y fosfato. Este estado de carga eléctrica se ve afectado por el pH del agua; Iwai y Kitao (1994) proponen que en un medio acuoso casi neutral los microorganismos actúan como partículas con carga eléctrica negativa. La superficie de soporte actúa con carga eléctrica positiva; por lo tanto, la fuerza electrostática que existe entre los

microorganismos y el medio de soporte provoca que las células microbianas puedan adherirse fácilmente.

El segundo factor fisicoquímico es la adsorción de los microorganismos a la superficie. La adsorción puede llevarse a cabo mediante un mecanismo llamado "interacción hidrofóbica". En este mecanismo, la unión de dos sustancias hidrofóbicas o dos sustancias hidrofílicas, es muy estable desde el punto de vista de energía libre (Iwai y Kitao, 1994). Por lo tanto, considerando el cambio de energía libre por adsorción, se concluye que las superficies con material altamente hidrofóbico, tal como poliestireno, polietileno y poliamida adsorben fácilmente a organismos hidrofóbicos y que la mayoría de los microorganismos que se encuentran en el agua residual presentan características hidrofóbicas.

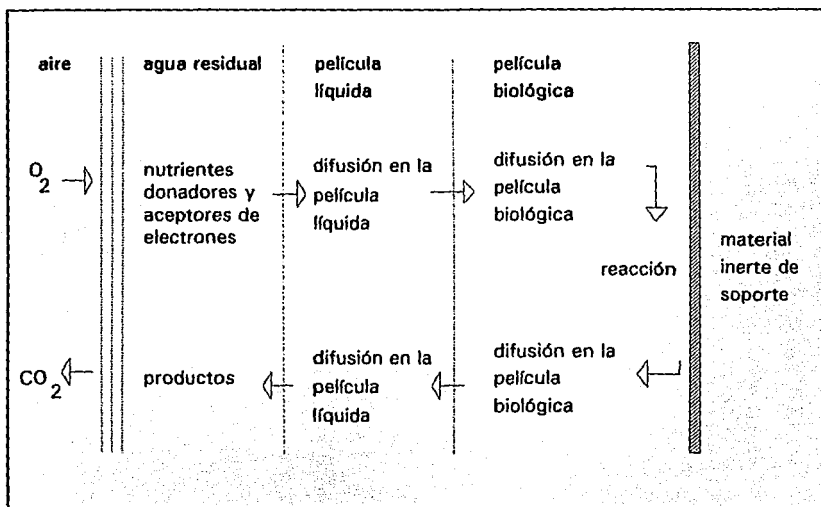


Figura 2.1 Procesos involucrados en el fenómeno de transporte en la película biológica. (Arvin y Harremoës, 1990).

Otros factores que contribuyen a la acumulación de la biopelícula se refieren al transporte de microorganismos en la superficie. El transporte de las partículas microbianas del agua a la superficie de contacto, depende de las condiciones del líquido. En régimen turbulento, la difusión molecular y el transporte en forma de aglomerados moleculares son mecanismos viables. En flujo laminar es posible la quimitaxis, fenómeno por el cual, las moléculas grandes arrastran a las pequeñas.

El crecimiento de la biopelícula se debe al efecto combinado de reproducción celular y producción de exopolisacáridos. Los polisacáridos o polímeros ayudan a mantener unidas a las células entre sí y al medio de soporte. La acumulación de la biopelícula es resultado de la rapidez de los fenómenos mencionados, los cuales ocurren simultáneamente y se ilustran en la figura 2.2.

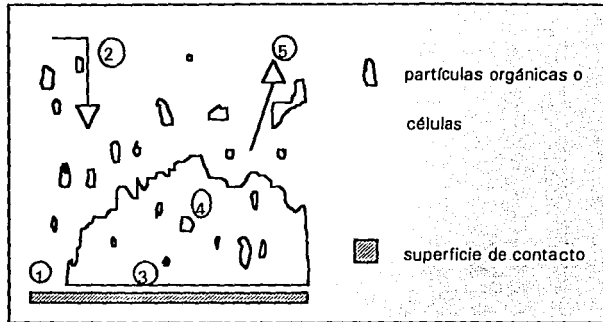


Figura 2.2 Procesos de desarrollo de la biopelícula: 1. adsorción, 2. transporte, 3. adhesión, 4. crecimiento, 5. arrastre (Truelar y Characklis, 1982).

### 2.2.1.3 Desarrollo microbiológico.

Microbiológicamente, el desarrollo de la biopelícula se puede dividir en 3 etapas: 1) fase de inducción, 2) fase de acumulación y 3) fase "Plateau".

1) *Fase de inducción*, esta fase comprende la adsorción orgánica seguida del transporte y adhesión de las bacterias sobre la superficie, la biopelícula es muy delgada y frecuentemente no cubre toda la superficie de contacto.

2) *Fase de acumulación*, durante esta fase hay un aumento logarítmico de la población bacteriana con una tasa de acumulación casi constante. El crecimiento se lleva a cabo hasta alcanzar un espesor crítico de biomasa, el cual se caracteriza porque la utilización de sustratos alcanza un valor de régimen permanente, donde una adición extra o acumulación de sustratos no afecta el crecimiento. En este punto, Iwai y Kitao (1994) proponen una fase de disminución en la velocidad del crecimiento, debida a un consumo de sustratos, exclusivamente para mantenimiento celular, presentándose un balance entre la tasa de consumo y el suministro de sustrato.

3) *Fase "Plateau"* en esta fase la película biológica desprendida y la producida se encuentran en equilibrio dinámico, el crecimiento de una nueva capa se iguala a

la biopelícula que esta siendo desprendida, por lo tanto, se mantiene constante el espesor de la biopelícula.

En el transcurso del crecimiento de la biopelícula, hay cambios referidos tanto en su espesor como en su composición. El sistema se construye por colonización inicial de diversas poblaciones bacterianas, seguida de crecimiento de protozoarios y más tarde comienza el desarrollo de metazoarios (figura 2.3).

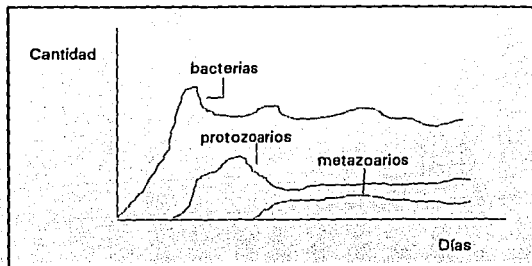


Figura 2.3 Desarrollo y proporción de bacterias, protozoarios y metazoarios en películas biológicas. (Iwai y Kitao, 1994; modificado).

### 2.2.2 Ecología.

La biopelícula está compuesta por una gran diversidad de organismos, los cuales están sujetos a complejas interacciones ecológicas que involucran diversos aspectos bióticos y abióticos.

Los aspectos abióticos que afectan la estructura de la comunidad se pueden dividir en: a) físicos, los cuales se refieren, principalmente, a las condiciones de operación del sistema tales como, temperatura, oxígeno disuelto, tiempo de retención hidráulico, entre otros y b) químicos, se refieren principalmente a la composición química del agua residual y a productos derivados del metabolismo microbiano.

Los aspectos bióticos involucran relaciones intraespecíficas e interespecíficas; dentro de estas, la competencia, la depredación la sucesión ecológica y la cadena de los alimentos, son determinantes en la composición de la biopelícula.

#### 2.2.2.1 Especies y su distribución.

La biopelícula puede ser vista como una serie de segmentos donde la distribución espacial de los microorganismos depende de la concentración y calidad de los nutrientes que éstos reciben, de la disponibilidad de oxígeno y de su tasa de reproducción, lo cual determina la composición de la capa



subsecuente. En general pueden distinguirse tres zonas: a) una capa externa aerobia con oxidación heterótrofa de materia orgánica, b) una capa microaerofila con oxidación autótrófa de amoníaco y c) una capa anaerobia adyacente al material de soporte con desnitrificación y fermentación. En la figura 2.4 se muestran las diferentes zonas que se generan en la biopelícula.

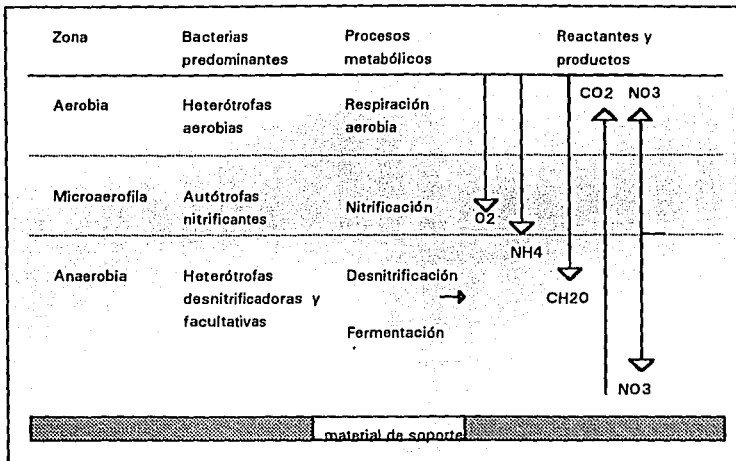


Figura 2.4 Diagrama esquemático con diferentes zonas en la biopelícula. (Arvin y Harremoës, 1990; modificado)

La profundidad de la biopelícula está determinada por la disponibilidad de oxígeno y de nutrientes. Los nutrientes tales como, nitrógeno, fósforo y elementos traza generalmente no llegan a ser un factor limitante del crecimiento.

Una posición alta en el ecosistema ó una pequeña tasa específica de crecimiento, significan un crecimiento lento de la población. Las bacterias nitrificantes y aquellas que utilizan sustratos complejos crecen a una tasa menor respecto de microorganismos heterótrofos que utilizan sustratos fácilmente degradables. La presencia de protozoarios y metazoarios en el sistema contribuye a disminuir el contenido de lodos en el efluente, debido a su actividad depredadora.

### 2.2.3 Protozoarios y metazoarios.

Las características ambientales que se crean en los sistemas biológicos para tratamiento de agua residual favorecen el desarrollo de un gran número de especies de protozoarios y metazoarios. Algunos investigadores han señalado

que la presencia y el predominio de una o varias especies, permite predecir la calidad de los efluentes (Kinner y Curds, 1988).

### 2.2.3.1 Protozoarios.

Los protozoarios son en su inmensa mayoría organismos unicelulares, microscópicos y eucariontes. De acuerdo a su hábitat se clasifican en organismos de vida libre o parásitos. Las estructuras de locomoción que presentan son: pseudópodos, flagelos y cilios. Por la forma en que obtienen su alimento se agrupan en organismos autótrofos u holofíticos y heterótrofos, los cuales a su vez se dividen en organismos holozoicos y saprozoicos. En las plantas para tratamiento de agua residual están representados cuatro tipos de nutrición (Curds, 1975):

1) *Autótrofos u holofíticos*, estos organismos pertenecen a la clase Phytomastigophorea, son productores primarios capaces de sintetizar carbohidratos (azúcares) a partir de bióxido de carbono y agua en presencia de luz solar. *Euglena gracilis* es un ejemplo de este tipo de organismo.

2) *Saprozoicos*, a este grupo pertenecen un gran número de protozoarios flagelados pertenecientes a la clase Zoomastigophorea, los cuales utilizan sustratos orgánicos e inorgánicos disueltos en el agua. Estos organismos pueden competir con bacterias heterótrofas por los sustratos orgánicos.

3) *Fagótrofos*, la demanda nutricional de los protozoarios fagotróficos es abastecida principalmente por bacterias. Sin embargo, las bacterias no constituyen la única fuente de alimento para dichos protozoarios, también pueden consumir material orgánico en suspensión. Este grupo está compuesto principalmente por protozoarios ciliados.

4) *Predadores*, muchos protozoarios ciliados pertenecen a este grupo, tales como, *Litonotus*, *Amphileptus*, y *Hemiophrys* entre otros, los cuales depredan protozoarios sésiles como peritricos. Los organismos de la subclase Suctorina también son capaces de alimentarse de otros protozoarios.

### 2.2.3.2 Metazoarios.

Los metazoarios son organismos pluricelulares móviles, heterótrofos, que se desarrollan a partir de embriones. De acuerdo al desarrollo embrional se distinguen dos grupos: Protostomados y Deuterostomados. Las especies que se encuentran en los sistemas biológicos para tratamiento de agua residual pertenecen al grupo de los Protostomados y los phyla observados en este trabajo son: Gastrotrichia, Rotifera, Nematoda y Anélida. A continuación se hace una breve descripción de las características de los phyla mencionados.

Phylum Gastrotrichia. Cuerpo ligeramente alargado con superficie ventral ciliada y aplanada; frecuentemente con cutícula ornamentada. Microscópicos, marinos (*Macrodasyida sp.*) y dulceacuícolas (*Chaetonotida sp.*), habitantes de zonas lodosas y ricas en detritus. Sus movimientos son semejantes a los de las sanguijuelas o pueden ser temporalmente sésiles.

Phylum Rotifera. Los organismos se caracterizan por la presencia de una corona ciliada en el extremo anterior del cuerpo, mientras que el posterior se adelgaza gradualmente hasta formar un pie. Faringe con piezas cuticulares móviles. Microscópicos, la mayoría dulceacuícolas de vida libre comprendidos en los ordenes Bdelloidea y Monogononta. Los primeros se alimentan únicamente de bacterias

Phylum Nematoda. Gusanos redondos, cilíndricos con extremo anterior y posterior afilados, cutícula frecuentemente ornamentada, de vida libre y parásitos. Ampliamente distribuidos dominando una gran variedad de hábitats acuáticos y terrestres. Casi todos los nemátodos se mueven mediante contracciones musculares ondulatorias de las fibras longitudinales de la pared del cuerpo. Muchos nemátodos de vida libre son carnívoros y se alimentan de pequeños metazoarios, incluyendo otros nemátodos. Schiemer (1975), considera que los nemátodos juegan un papel muy importante en los procesos de descomposición. Sin embargo, la investigación acerca de su función y el efecto que tienen sobre los sistemas biológicos es muy limitada.

Se han observado nemátodos en prácticamente todos los sistemas aerobios para tratamiento de agua residual. Generalmente son más abundantes en filtros rociadores que en lodos activados. La diversidad de los nemátodos es baja y se limita a un número pequeño de especies representadas en la subfamilia Diplogasterinae y Rhabditinae. Las especies comprendidas en ambas familias se alimentan de bacterias y materia orgánica disuelta.

Phylum Anélida. Comprende los gusanos segmentados e incluye un gran número de especies marinas y dulceacuícolas. Únicamente dos familias de anélidos, Enchytraeidae y Lumbricidae se han reportado en aguas residuales (Solbé, 1975).

### **3. MICROBIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA**

En este capítulo se describen aspectos básicos del metabolismo microbiano. Se hace un análisis de los fundamentos biológicos y de los mecanismos bioquímicos involucrados en la remoción biológica de fósforo. Se presentan los modelos bioquímicos propuestos por Comeau/Wentzel, Mino, Mino modificado por Wentzel y Tracy y Flammino. Todos estos modelos se basan en observaciones experimentales y en el estudio de la microbiología del proceso. Se hace énfasis en diferenciar la bioquímica de la etapa anaerobia de la aerobia. Así como de los sistemas de transporte utilizados por el sustrato.

#### **3.1 Procesos metabólicos.**

Metabolismo es un término que involucra a todas las reacciones por medio de las cuales la célula procesa su alimento para obtener energía y los compuestos necesarios para formar nuevos componentes celulares. Este proceso tiene lugar a través de secuencias de reacciones consecutivas catalizadas enzimáticamente, en las cuales participan muchos compuestos intermedarios. El metabolismo tiene cuatro funciones específicas: a) obtención de energía de uniones químicas o de energía solar absorbida, b) conversión de nutrientes exógenos en moléculas utilizables en la síntesis de material celular, c) ensamblaje de dichas moléculas,

para formar proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, y otros componentes celulares y d) formación y degradación de biomoléculas que se requieren en funciones especializadas de la célula.

El metabolismo se divide en catabolismo y anabolismo:

1) **Catabolismo**, se refiere a la fase degradativa del metabolismo. Las moléculas grandes de nutrientes como carbohidratos, lípidos y proteínas se degradan a productos más pequeños y sencillos (por ejemplo, ácido acético o anhídrido carbónico). El catabolismo va acompañado de liberación de energía, la cual se conserva en forma de trifosfato de adenosina (ATP).

2) **Anabolismo** es la fase de construcción o fase sintética del metabolismo, también se llama de biosíntesis. En el anabolismo las moléculas pequeñas de los precursores se ordenan para llegar a constituir los componentes moleculares relativamente grandes de las células tales como polisacáridos, ácidos nucleicos, proteínas y lípidos. La biosíntesis ocasiona un incremento en el tamaño y en la complejidad de la estructura, por lo tanto, precisa de energía libre, la cual es aportada por la escisión de ATP. El catabolismo y el anabolismo suceden simultáneamente en las células.

### **3.1.1 Clasificación metabólica de los microorganismos.**

Los microorganismos se clasifican dependiendo de sus fuentes de energía, de carbono, de donadores y receptores de protones.

Dependiendo de su fuente de energía, se pueden dividir en fotótrofos, aquellos que obtienen energía de la energía radiante (sol) y en quimiótrofos, los que obtienen su energía de reacciones químicas de oxidación-reducción.

Según su fuente de protones, se dividen en litótrofos (los protones provienen de donadores inorgánicos) y organótrofos (los protones provienen de donadores orgánicos).

Según su fuente de carbono pueden dividirse en dos grandes grupos: autótrofos, los que obtienen carbono de sustancias inorgánicas ( $\text{CO}_2$ ) y heterótrofos, los que obtienen carbono de uniones químicas de tipo orgánico. Ambos pueden ser divididos en tres tipos:

1) **Aerobios**, los cuales requieren oxígeno disuelto como aceptor de electrones.

2) **Anaerobios**, donde la ausencia de oxígeno constituye una condición necesaria para su crecimiento. Utilizan moléculas orgánicas como aceptores de electrones.

3) *Facultativos*, los electrones son transferidos a través de la cadena respiratoria a nitratos, sulfatos o alguna otra molécula distinta al oxígeno, la cual actúa como aceptor de electrones en ausencia de oxígeno.

### 3.1.2 Metabolismo alterno de acumulación de sustratos orgánicos y fósforo.

Este es un mecanismo de supervivencia que se caracteriza por la capacidad que tienen algunos microorganismos aerobios de almacenar fosfatos y carbón en condiciones adversas (ausencia de oxígeno molecular).

Bajo condiciones anaerobias se captura y almacena material orgánico en forma de poli- $\beta$ -hidroxibutirato (PHB), a expensas del ATP que se forma por la ruptura de los enlaces químicos de poli-P, al mismo tiempo que se libera ortofosfato al medio (excreción), aumentando su concentración en el líquido. En condiciones aerobias, se almacena nuevamente fósforo en forma de polifosfatos (poli-P) en cantidades superiores a las requeridas para crecimiento celular y a la cantidad excretada en condiciones anaerobias. Simultáneamente se metabolizan los sustratos orgánicos almacenados. En la figura 3.1 se muestran los perfiles de eliminación de DQO y P- $PO_4$  en un reactor anaerobio/aerobio con biopelícula.

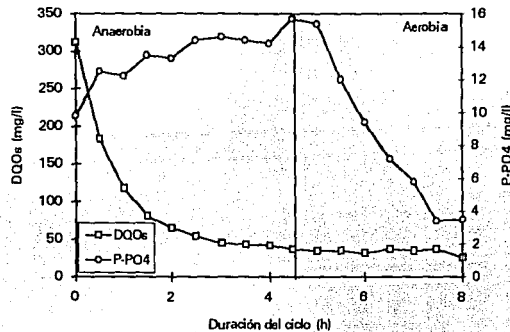


Figura 3.1 Comportamiento típico de eliminación de DQO y P- $PO_4$  en un reactor anaerobio/aerobio con biopelícula (González, 1989)

Es un hecho experimental (ver figura 3.1) que los organismos acumuladores de fosfatos (poly-P) deben capturar una gran cantidad de sustratos orgánicos en condiciones anaerobias, lo cual impide la disponibilidad de sustratos para organismos aerobios y facultativos que no acumulan fósforo.

#### 3.1.2.1 Microorganismos acumuladores de fósforo.

En la literatura se ha reportado una gran diversidad de bacterias identificadas como capaces de acumular y liberar fósforo entre las cuales están:

*Pseudomonas sp.*, *Klebsiella sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Pasteruela sp.*, *Enterobacter sp.*, y *Micrococcus sp.* Algunas de ellas son estrictas aerobias y otras son facultativas, utilizan como fuente de carbono acetato o glucosa u otras moléculas orgánicas de bajo peso molecular. (Levin y Shapiro, 1965; González; 1989 y Doria *et al.*, 1992).

Durante la etapa anaerobia las bacterias facultativas pueden transformar una molécula de glucosa a lactato piruvato y acetato con una ganancia de 2 moléculas de ATP. Este acetato es almacenado por las bacterias acumuladoras utilizando la energía de hidrólisis de los polifosfatos.

Durante la fase aerobia, el exceso de materia orgánica es metabolizado por las facultativas a través del ciclo de los ácidos tricarbóxicos (CAT); mientras que las acumuladoras degradan el acetato almacenado en la fase previa (por la misma vía metabólica) y vuelven a llenar sus reservas de polifosfatos. Así se forman 11 ATPs, uno de los cuales se requiere para almacenar una molécula de acetato la ganancia es de 10 ATPs.

El mecanismo anterior permite competir eficientemente a las acumuladoras con organismos facultativos durante la fase anaerobia, predominando en el reactor bacterias del género *Acinetobacter*. Sin embargo, se ha reportado una eficiente remoción de fosfatos y una cantidad de *Acinetobacter* insignificante (Doria, *et al.*, 1992).

En el caso de organismos que utilizan glucosa, se ha propuesto que, por cada dos moléculas de glucosa (que se transporta y almacena en forma de glucógeno), se utiliza 1 ATP, otra posibilidad es que la glucosa se active a 6P para su transporte y almacenamiento utilizando la energía de hidrólisis de poli-P. Durante la fase aerobia, la glucosa se oxida para producir el ATP necesario para la reproducción celular y la síntesis de poli-P (González, 1989).

## **3.2 Bioquímica de la remoción de fósforo.**

### **3.2.1 Modelo Comeau/Wentzel.**

Este modelo y el siguiente (Mino modificado por Wentzel) consideran a bacterias del género *Acinetobacter* como responsables de la remoción de fósforo, estas bacterias son gram negativas, no móviles, estrictamente aerobias y utilizan acetato como fuente de carbono. Los dos modelos mencionados coinciden en las reacciones involucradas en la síntesis de acetato a PHB y en la importancia del poli-P en el proceso.

### 3.2.1.1 Transporte de sustrato.

El acetato es transportado al interior de la membrana por difusión facilitada mediante un mecanismo de fuerza protón-motriz, (fpm), dicha fuerza se compone de un gradiente de cargas y un gradiente de pH del exterior al interior de la membrana. Es importante mantener la fpm para que el acetato pueda ser transportado y almacenado por la célula.

El pH que normalmente se registra en el agua residual (6.5-7.5) permite que el acetato se encuentre en su forma anionica ( $\text{Ac}^-$ ). El  $\text{Ac}^-$  es transportado junto con un protón  $\text{H}^+$ , el  $\text{Ac}^-$  se activa a acetilCoA a expensas del ATP que se forma por ruptura de enlaces de poli-P. Esta reacción libera cationes (usualmente  $\text{K}^+$  o  $\text{Mg}^+$ ), los cuales salen de la célula por un mecanismo de difusión antipuerto. La salida de  $\text{K}^+$  o  $\text{Mg}^+$  obliga a la entrada de un segundo protón que es utilizado por un Pi para formar el anión  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . La molécula  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  sale por difusión antipuerto, se disocia y libera protones que se ocupan para restablecer la fpm permitiendo la entrada de  $\text{Ac}^-$ . En la figura 3.2 se presenta un diagrama del comportamiento anterior.

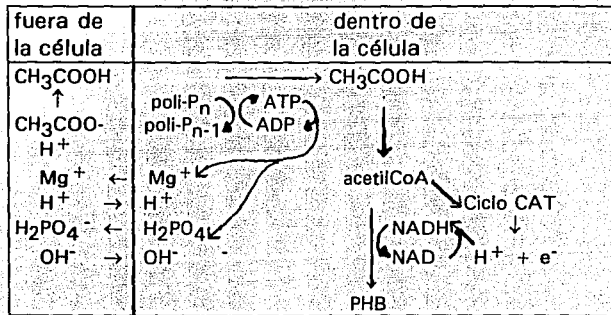
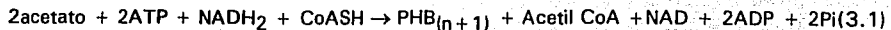


Figura 3.2. Diagrama esquemático del transporte de acetato al interior de la célula (Wentzel et al, 1991).

### 3.2.1.2 Condiciones anaerobias.

La fuente de energía requerida para metabolizar el acetato hacia acetilCoA proviene de la síntesis de ATP, la cual se genera por el rompimiento de la cadena de poli-P. Estas reacciones, junto con las de conversión de acetilCoA a PHB, se presentan en la figura 3.3.

Entonces:





La diferencia fundamental entre este modelo y el de Mino es el origen del NADH necesario para la reducción de acetato a PHB. Wentzel *et al* (1991) consideran que el ciclo de los ácidos tricarbóxicos (CAT) está activo durante la fase anaerobia y que es esta vía la que suministra los NADH necesarios para originar el potencial reductor.

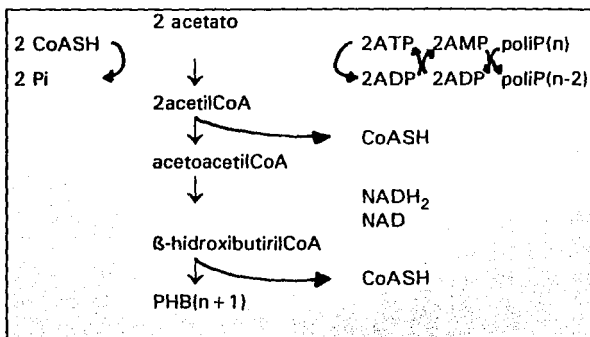
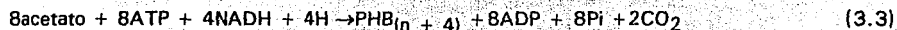


Figura 3.3 Síntesis de PHB a partir de acetato (Doria *et al*, 1992).

El metabolismo del acetato vía CAT puede resumirse como:



Analizando la ecuación (3.1), se observa que la incorporación de 2 moléculas de acetato a PHB requiere de 2 moléculas de ATP y 1 de NADH + H y metabolizar una molécula de acetato vía CAT requiere 1 ATP y genera 4 moléculas de NADH + H. Si todo el NADH + H generado durante el CAT se utiliza para síntesis de PHB, la ecuación (3.2) debe ser:



Considerando las ecuaciones 3.2 y 3.3, entonces:



La relación acetato consumido fosfato liberado es 9:8 ó 1:1.1

### 3.2.1.3 Condiciones aerobias.

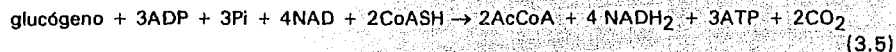
En el catabolismo, el PHB se rompe a acetilCoA. Esta molécula entra al CAT y se asocia al ciclo del glioxilato. Los NADH<sub>2</sub> generados en esta vía son subsecuentemente oxidados vía transferencia de electrones (fosforilación

oxidativa), generando ATP. El ATP que se produce es utilizado como fuente de energía para síntesis de poli-P.

### 3.2.2 Modelo de Mino.

#### 3.2.2.1 Condiciones anaerobias.

Mino *et al* (1987) consideran que el CAT permanece inactivo bajo condiciones anaerobias, debido principalmente a la inactividad de la enzima succinato deshidrogenasa. El NADH requerido para la reducción de acetato a PHB es proporcionado por el consumo de carbohidratos (glucógeno) a ácido pirúvico, vía Embden Meyerhoff Parnas (EMP). Posteriormente, el ácido pirúvico se transforma a acetilCoA, con producción de CO<sub>2</sub>. La reacción de glucógeno a acetilCoA es la siguiente:



3 ATP se generan por mol de carbohidrato consumido.

Combinando la reacción de consumo de glucógeno en la activación y conversión de acetato a PHB se tiene que:

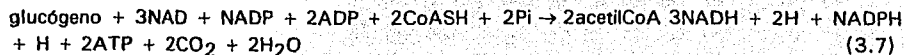


La relación acetato consumido fósforo liberado que reportan Mino *et al*, (1987) es de 3.4:1. Una relación tan alta es provocada por la presencia de nitratos en fase anaerobia, los cuales generan procesos de desnitrificación con consumo de acetato como fuente de carbono, sin una concomitante liberación de fósforo (Wentzel *et al*, 1991).

### 3.2.3 Modelo de Mino modificado por Wentzel.

#### 3.2.3.1 Condiciones anaerobias.

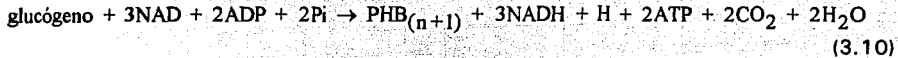
El modelo de Mino asume que todos los organismos poly-P poseen la vía EMP. Sin embargo, *Acinetobacter* no posee esta vía (Wentzel *et al* 1991). *Acinetobacter*, en cambio, puede oxidar carbohidratos utilizando la vía Enter-Dudoroff. La siguiente ecuación muestra el metabolismo de glucógeno por dicha vía.



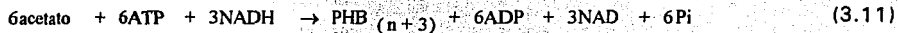
y como:



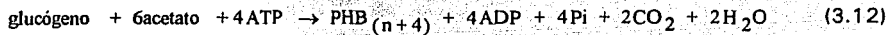
sumando (3.7), (3.7) y (3.9)



Si todo el NADH es utilizado en (3.1) entonces:



Sumando las dos ecuaciones anteriores



La relación acetato:Pi es 6:4 o 1.5:1

Comparando la ecuación EMP (3.6) y ED (3.12), se observa que en EMP, 6 acetatos se consumen para liberar 3 fosfatos. La relación acetato consumido/fósforo liberado es 2:1. En la vía ED, por cada 6 moles de acetato consumido, se liberan 4 de fósforo la relación cambia a 1.5:1.

### 3.2.3.2 Condiciones aerobias.

Bajo condiciones aerobias no hay disponibilidad de fuente externa de carbón. Por lo tanto, la regeneración de carbohidratos se lleva a cabo a partir de PHB. La regeneración involucra la formación de glucosa a partir de acetilCoA. En los organismos donde esta conversión ocurre, el acetato sufre una secuencia anabólica conocida como ciclo del glioxilato. El mecanismo de regeneración de carbohidratos que se propone es el siguiente: a partir del rompimiento de los enlaces de PHB, se forma acetilCoA; esta molécula se convierte a fosfoenolpiruvato vía malato y oxalacetato. El fosfoenolpiruvato también es un intermediario en la vía ED y puede convertir los carbohidratos por la vía ED en reversa.

### 3.2.4 *Sustrato diferente de acetato.*

En los tres modelos anteriores (Comeau/Wentzel, Mino, Mino modificado por Wentzel) el acetato o algún ácido graso de bajo peso molecular (AGBPM) sirven como única fuente externa de carbono durante la fase anaerobia. Sin embargo, la concentración de acetato o de AGBPM en el agua residual es muy pequeña.

La glucosa y otros carbohidratos constituyen la fuente más común de carbono para la biomasa. *Acinetobacter* no puede degradar glucosa bajo condiciones anaerobias, es necesario modificar dicha molécula antes de poder ser utilizada por organismos poly-P (Mino *et al*, 1987 y Wentzel *et al*, 1991).

La glucosa es transformada en la etapa anaerobia por microorganismos fermentativos, los cuales producen AGBPM (entre ellos el acetato que requiere *Acinetobacter*) Wentzel *et al* (1987) desarrollaron un modelo cinético en donde la etapa que limita la velocidad del proceso de remoción de fósforo, es la degradación de sustratos fácilmente degradables por microorganismos no poly-P.

### 3.2.5 Modelo de Tracy y Flammino.

Este modelo toma en cuenta microorganismos que utilizan glucosa como única fuente de carbono. En la figura 3.4 se presenta la vía bioquímica propuesta por Tracy y Flammino (1987) para explicar la remoción de fósforo.

#### 3.2.5.1 Condiciones anaerobias.

Durante su transporte, la glucosa es activada a glu-6P, utilizando la energía generada por la hidrólisis de poli-P. Una vez en el interior de la célula, la glu-6P se transforma a glu-1-P. La enzima fosfoglucomutasa cataliza la reacción (que es reversible y fuertemente a favor de la formación de glu-6-P). Por lo tanto, para que se forme glu-1-P, se requieren grandes cantidades de glu-6-P.

Posteriormente, la glu-1-P se combina con ATP y forma ADP glucosa. La enzima que cataliza la reacción es una pirofosforilasa. Se forma pirofosfato (PPi) como producto secundario de la reacción, el cual puede ser utilizado para regenerar el fosfoenolpiruvato necesario para el transporte de sustrato. Un ortofosfato se mantiene en la molécula de fosfoenolpiruvato y otro sale de la célula, permitiendo el equilibrio de la presión osmótica. Debido a lo anterior, la relación glucosa consumida/ fósforo liberado es 1:1.

La molécula de glucosa se transforma a glucógeno. La fuente de energía de la reacción la proporcionan los enlaces de alta energía de la ADP-glu. La enzima que cataliza la reacción es una glucogenosintetasa. De tal forma que la glucosa se almacena como glucógeno y no como PHB.

La molécula UDP-glu es mejor sustrato que la ADP-glu para la enzima glucogenosintetasa. Sin embargo, se alcanza una tasa máxima de 50% de transformación con ADP-glu, respecto de UDP-glu.



actividad metabólica suficiente para que la reacción inversa se lleve a cabo, lo cual favorece la remoción biológica de fósforo.

### 3.2.6 Modelo de Satoh y Mino.

Este modelo se desarrolló como respuesta a un comportamiento de eliminación de sustratos orgánicos, no asociado a liberación de fósforo.

Satoh *et al* (1992) proponen que algunas bacterias acumulan sustratos carbonosos como polihidroxialcanoato (PHA) en vez de polihidroxibutirato (PHB). El NADH y la energía requeridos para la formación de PHA a partir de sustratos tales como, glucosa, acetato y propionato son proporcionados por consumo intracelular de carbohidratos a través de la glucólisis, la cual utiliza glucógeno como sustrato. En la glucólisis, 1 molécula de glucógeno suministra 4 moléculas de NADH<sub>2</sub> y 2 ó 3 moléculas de ATP. Por lo tanto, la glucólisis proporciona energía y el agente reductor necesarios para acumular sustratos carbonosos sin utilizar polifosfatos.

Satoh *et al* (1992) proponen que la acumulación de PHA en vez de PHB está influenciada por las siguientes observaciones:

a) Suponen que los polifosfatos son químicamente más inestables que el glucógeno.

b) Consideran que el glucógeno actúa no sólo como fuente de energía sino también de carbón, la ausencia ocasional de sustrato orgánico en etapa aerobia provoca la acumulación de glucógeno

c) Un alto contenido de sacaridos en el influente, tal como glucosa, provoca que los microorganismos prefieran acumular PHA en vez de PHB. En este sentido cabe resaltar que la presencia de organismos facultativos con actividad fermentativa, en la fase anaerobia, beneficia el proceso RBF porque transforman dichos sustratos como glucosa impidiendo que se puedan acumular como PHA.

#### **4. DESARROLLO DE PROCESOS PARA REMOCIÓN BIOLÓGICA DE FÓSFORO**

El objetivo de este capítulo es describir los antecedentes de los sistemas para remoción biológica de fósforo. También se hace un análisis de los procesos conocidos a nivel industrial que permiten remover fósforo del agua residual.

##### **4.1 Antecedentes.**

Stensel (1991) menciona que a principios de los 60s Srinath y Alarcón, fueron los primeros investigadores que reportaron la remoción biológica de fósforo (RBF), observada en una planta para tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico con lodos activados. Sin embargo, no proporcionaron una explicación de éste fenómeno.

Levin y Shapiro (1965) propusieron el término "luxury uptake" (captura de lujo) después de observar un incremento en la RBF. Estos autores reportaron la presencia de gránulos de volutina en las células de la biomasa, los cuales contienen polifosfatos. No ofrecieron una explicación de la remoción de fósforo observada. Sin embargo, su trabajo fue la base para desarrollar el primer proceso comercial de RBF denominado Phostrip.

Una guía empírica de diseño fue propuesta a fines de los 60s (Stensel, 1991), En esta guía se señalan dos condiciones de operación para favorecer la RBF: a) utilizar un reactor de flujo pistón con alimentación de agua residual solamente en la entrada y b) proporcionar, al final del reactor, aeración suficiente para alcanzar más de 2 mg/l de oxígeno disuelto. La guía propuesta reafirmó la importancia de establecer condiciones alternadamente anaerobias/aerobias y la necesidad de suministrar sustrato en la zona anaerobia.

El proceso Phostrip se desarrolló con base en las condiciones de operación mencionadas por Barnard (1974), quien propone que, una eficiente remoción de fósforo se obtiene en sistemas de lodos activados sometiendo a la biomasa a un estado anaerobio, seguido de aeración. Tiempo después Barnard (1976) propuso separar las zonas anaerobia y aerobia en plantas con lodos activados a nivel planta piloto, denominando Phoredox a este proceso.

La planta piloto diseñada por Barnard (1976) fue modificada colocando aeradores de superficie en la zona de alimentación, los cuales se apagan o encienden para generar las condiciones anaerobias/aerobias que requiere el tratamiento. Con base en este trabajo se originó el proceso Bardenpho.

Nicholls y Osborn (1979) propusieron un modelo bioquímico para explicar la RBF, el cual involucra el almacenamiento de sustratos carbonosos como polihidroxibutirato (PHB) de forma simultánea a la liberación de fósforo. Estos autores recomendaron alimentar el sistema con el sobrenadante de un proceso de digestión anaerobia, el cual contiene sustratos producidos por fermentación fácilmente capturables.

## **4.2 Procesos.**

Los procesos industriales existentes para la RBF son modificaciones del sistema de lodos activados y pueden ser diseñados para eliminar también nitrógeno. Se clasifican en sistemas de corriente principal y corriente paralela. Los primeros se caracterizan porque el fósforo se elimina con los lodos de desecho. En los procesos de corriente paralela, los fosfatos se separan de los lodos en un tren paralelo cuyo caudal es pequeño comparado con el caudal principal. El fosfato extraído es precipitado con cal formando fosfato de calcio.

### **4.2.1 Remoción únicamente de fósforo .**

#### **4.2.1.1 Proceso Phostrip.**

Este proceso fue propuesto por Levin y Shapiro (1965) y combina la remoción biológica y química de fósforo. El diagrama esquemático del proceso Phostrip se presenta en la figura 4.1. Una parte de los lodos de recirculación (10-30%) son expuestos a condiciones anaerobias provocando la liberación de fósforo, el



tiempo de retención en este tanque es de 10 a 12 horas. Dichos lodos se recirculan al tanque aerobio, después de combinarse con otra corriente conteniendo bajas concentraciones de fosfato, la cual proviene del sobrenadante del tratamiento químico y del sedimentador primario. En el tanque aerobio tiene lugar la captura de fósforo del agua residual influente. El sobrenadante del tanque anaerobio pasa continuamente a un tanque donde se adiciona cal para precipitar el fósforo.

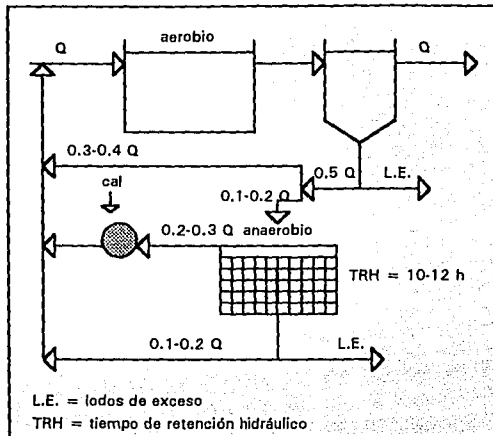


Figura 4.1 Diagrama esquemático del proceso Phostrip para remoción de fósforo (Digger y Stevensen, 1991; modificado)

Una alternativa para reducir el largo período de retención en el tanque anaerobio, es dosificar ácidos grasos volátiles para favorecer la liberación de fósforo (Cooper et al, 1994).

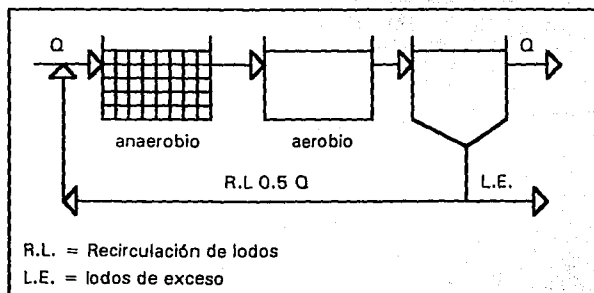


Figura 4.2 Diagrama esquemático del proceso A/O (Digger y Stevensen, 1991; modificado).

#### 4.2.1.2 Proceso A/O.

Este proceso utiliza dos zonas: una anaerobia seguida de una aerobia. Generalmente la zona anaerobia se divide en tres compartimientos del mismo tamaño y la aerobia en cuatro. Bajo condiciones anaerobias ocurre liberación de fósforo y consumo de materia orgánica. El agua pasa al reactor aerobio donde se obtiene remoción de fósforo, provocada por la captura microbiana. Un sedimentador secundario recibe el flujo de agua del reactor aerobio donde sedimentan lodos ricos en fósforo, los cuales regresan mediante recirculación al reactor anaerobio. A pesar de que este proceso no fue diseñado para eliminar nitrógeno, las características de operación permiten que se lleve a cabo nitrificación en la zona aerobia. En la figura 4.2 se muestra el diagrama esquemático del proceso A/O.

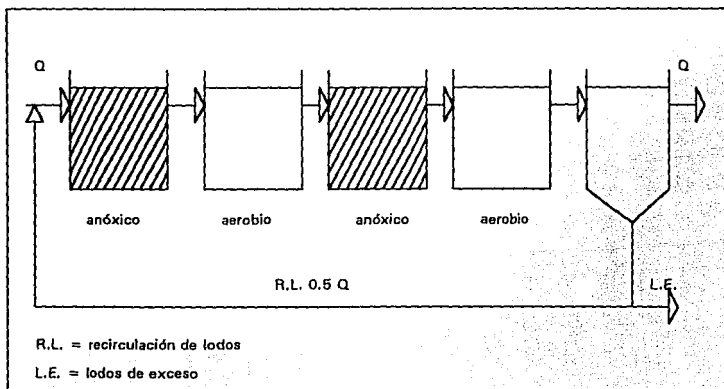


Figura 4.3 Diagrama esquemático del proceso Bardenpho (4 etapas) para remoción de fósforo (Cooper et al, 1994)

#### 4.2.2 Remoción de fósforo más nitrógeno.

##### 4.2.2.1 Procesos Bardenpho/Phoredox/A<sup>2</sup>O.

Estos tres procesos tienen características similares. El proceso Bardenpho se compone de dos zonas anóxicas y dos aerobias. La figura 4.3 muestra el arreglo de este proceso. En la primera zona anóxica, los nitratos provenientes de los lodos de recirculación se reducen a nitrógeno molecular (desnitrificación) y se metabolizan sustratos orgánicos del influente utilizando el oxígeno de los nitratos. En la primera zona aerobia se presentan reacciones de nitrificación, de remoción de sustratos orgánicos y de captura de fósforo, en la segunda zona anóxica ocurre una desnitrificación adicional mediante respiración endógena, provocada por la ausencia de material carbonoso; la última zona aerobia sirve

para garantizar la eliminación de sustratos carbonosos y el almacenamiento de fósforo que no fue capturado en las etapas anteriores

El proceso Phoredox consiste en agregar una etapa anaerobia inicial al proceso anterior. En esta etapa se mezclan lodos de recirculación ricos en fósforo, con el agua residual influente, provocando reacciones de fermentación cuyos productos pueden ser fácilmente capturados, al mismo tiempo que se libera el fósforo almacenado. La concentración de nitratos y nitritos que entran a esta zona debe ser mínima para garantizar un funcionamiento óptimo. Para ello se recircula agua del primer tanque aerobio (nitrificación) al primer tanque anóxico (desnitrificación). En la figura 4.4 se presenta el diagrama del proceso.

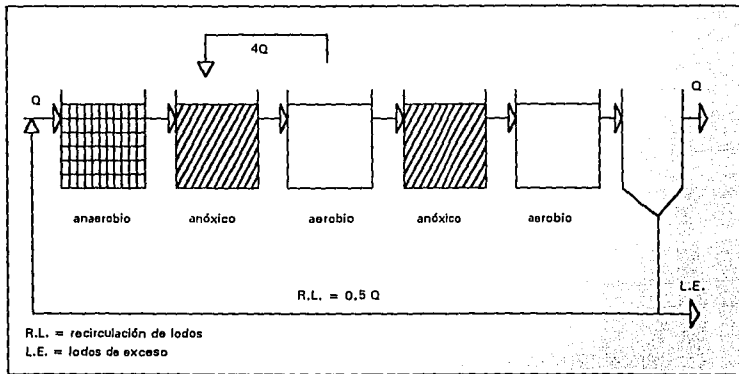


Figura 4.4 Diagrama esquemático del proceso Phoredox (5 etapas) para remoción de fósforo (Stensel, 1991)

La baja tasa de desnitrificación que se obtiene en la segunda zona anóxico origina una tercera modificación del proceso Bardenpho y genera el desarrollo de un tercer proceso denominado A<sup>2</sup>/O. El tren de tratamiento consiste de las siguientes etapas: anaerobia/anóxico/aerobia. La figura 4.5 muestra el diagrama general del proceso. La finalidad de la zona anóxico es reducir los nitratos producidos en la zona aerobia, evitando la entrada de nitratos con los lodos de recirculación a la zona anaerobia.

#### 4.2.2.2 Procesos UCT/VIP.

El proceso UCT (University Capetown) fue diseñado para evitar la entrada, en la zona anaerobia, de nitratos, nitritos y oxígeno disuelto provenientes de los lodos de recirculación. Este proceso incluye tres zonas: anaerobia/anóxico/aerobia. Los lodos provenientes del sedimentador secundario entran a la zona anóxico en vez de la anaerobia inicial y se recircula agua del tanque anóxico al anaerobio, lo

cual se puede observar en la figura 4.6. También se recircula agua del tanque aerobio al anóxico para prevenir la entrada de nitratos al sedimentador secundario y de éste al reactor anaerobio.

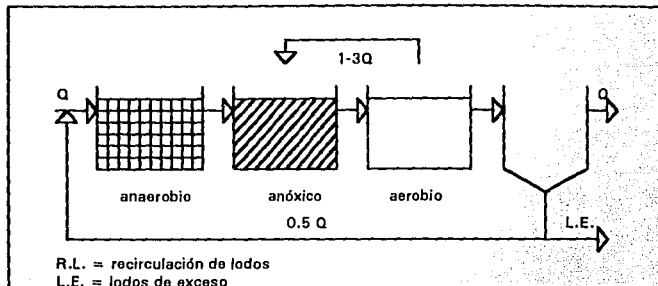


Figura 4.5 Diagrama esquemático del proceso A<sup>2</sup>/O (Cooper, et al, 1994).

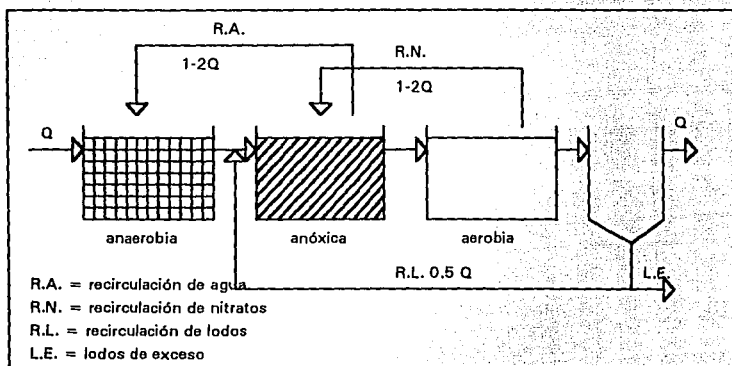


Figura 4.6 Proceso UCT para remoción de nutrientes (Cooper, et al, 1994).

Se hizo una modificación posterior al proceso UCT, la cual consistió en separar en dos unidades a la zona anóxica. La primera unidad recibe los lodos de recirculación, por lo tanto, en esta zona se reducen los nitratos provenientes de dicha recirculación. La segunda unidad recibe agua del tanque aerobio donde se lleva a cabo desnitrificación. La presencia de ambos tanques limita la cantidad de nitratos que puedan entrar al reactor anaerobio.

El proceso VIP (Virginia Initiate Plant) es muy similar al UCT. Las diferencias fundamentales son:

1) Se utiliza una mezcla múltiple y completa de microorganismos en cada una de las etapas del tratamiento, aumentando la rapidez de captura de fósforo debido a una alta concentración de residuos orgánicos almacenados en el tanque aerobio. (Sedlek, 1991).

2) El proceso opera a una alta velocidad, incrementando la proporción de la biomasa activa y, en consecuencia, aumenta la rapidez de remoción de fósforo, lo cual sirve para reducir el tamaño de los reactores. El proceso VIP se diseña para tiempos de retención celular entre 5 y 10 días y el UCT entre 13 y 25 días.

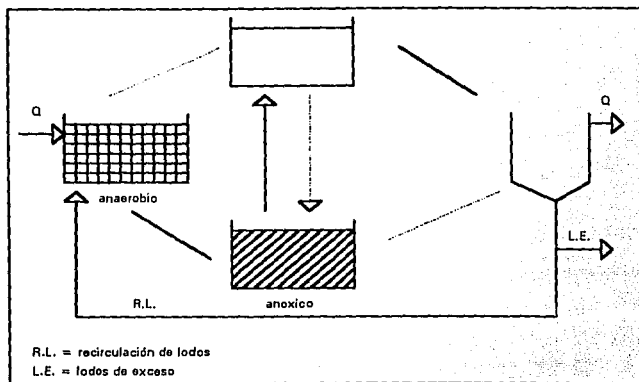


Figura 4.7 Diagrama esquemático del proceso Bio-Denitro para remoción de nutrientes (Stensel, 1991 y Cooper et al, 1994)

#### 4.2.2.3 Proceso Bio-Denitro/Bio-Denitro.

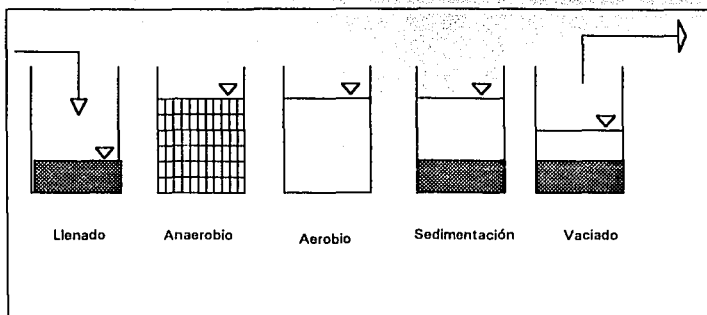
La figura 4.7 muestra el diagrama esquemático del proceso Bio-Denitro. El tanque anaerobio y el sedimentador secundario no cambian su función. Sin embargo, cada uno de los otros dos tanques que componen al sistema pueden operar bajo condiciones aerobias ó anóxicas indistintamente. Por lo tanto, ambos tanques están equipados con sistemas de mezclado y aeración. El proceso Bio-Denitro se basa en el mismo principio, pero las condiciones alternativas (anóxico/aerobia) ocurren de forma secuencial en un período de tiempo y no en un reactor.

#### 4.3 Reactores discontinuos.

Los reactores de operación discontinua (ROD) fueron utilizados por primera vez hace más de 100 años. Sin embargo, la problemática asociada a la operación manual del proceso impidió el uso extensivo de dichos reactores. Los trabajos de Irvine y Davis a principios de 1970s fueron la base del resurgimiento exitoso de

los reactores discontinuos. Originalmente, los objetivos del ROD no eran eliminar fósforo pero, las características de operación generan condiciones que favorecen la liberación y captura de fósforo.

El sistema se puede controlar por medio de relojes programables y microprocesadores, lo cual además de facilitar la operación, la hace versátil al permitir modificar la programación de la secuencia de pasos del proceso.



*Figura 4.8 Secuencia de etapas de un reactor discontinuo con biomasa suspendida (González, 1989).*

A diferencia de los sistemas continuos, el agua influente se introduce al reactor en un tiempo previamente definido. Las reacciones bioquímicas de degradación se llevan a cabo en un sólo tanque. Las fases del proceso son secuenciales y se repiten de forma periódica. El proceso inicia bajo condiciones anaerobias donde ocurre liberación de fósforo y captura de sustratos carbonosos, posteriormente se suministra oxígeno al reactor para provocar la captura de fósforo, al mismo tiempo que se metabolizan los sustratos orgánicos almacenados en la fase anterior. Además de las reacciones aerobias de captura de fosfatos y degradación de sustratos carbonosos, puede obtenerse nitrificación.

En la figura 4.8 se presentan las características de operación de un reactor con operación discontinua y biomasa suspendida. Este tipo de reactores han sido ampliamente estudiados, comparativamente con reactores de operación discontinua con biopelícula.

## **5. MATERIAL Y MÉTODO**

En este capítulo se hace una descripción de la unidad piloto instalada en la planta para tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, UNAM y de las características de operación del proceso biológico para remoción de fósforo.

Otros aspectos que se tratan en este capítulo se refieren a las determinaciones analíticas del agua y al equipo experimental utilizado. También se describe la metodología de los estudios sobre la población de protozoarios y metazoarios que se encuentran en la biomasa.

### **5.1 Fundamentos de operación del proceso discontinuo.**

Al proceso discontinuo lo distinguen tres características: a) repetición periódica de una secuencia de etapas bien definidas en cada ciclo de tratamiento: etapa de llenado, anaerobia, aerobia y vaciado. b) duración planeada de cada una de las etapas del proceso, en función de los requerimientos del tratamiento y; c) ocurrencia en un sólo tanque de los procesos metabólicos y físicos responsables de la degradación de los contaminantes.

## 5.2 División del ciclo.

El término llenado se refiere al tiempo durante el cual el reactor está recibiendo las aguas residuales. Al momento de iniciarse esta fase, el tanque ya contiene una población activa de microorganismos.

En teoría, una vez que el reactor se llena da inicio de forma inmediata la fase anaerobia. Sin embargo, el agua residual influente, con que se alimentó al reactor, contiene oxígeno molecular disuelto y nitratos. Este hecho, originó condiciones anóxicas e impidió el establecimiento de una condición anaerobia, inmediatamente después del llenado.

De acuerdo con González (1989) un medio anaerobio es aquel donde no hay concentraciones "medibles" de oxígeno disuelto ni de nitratos. Por lo tanto, el inicio de la fase anaerobia, transcurrió en realidad como anóxica. Sin embargo, se considera correcto utilizar el término anaerobio, para referir la primera parte del tratamiento, por las siguientes razones:

a) La condición anóxica no fue inducida intencionalmente y no se intentó controlar. El medio anóxico está limitado al tiempo necesario para abatir el oxígeno disuelto y reducir el nitrato del agua (ver secciones 6.1.2.2 b y 6.1.2.3).

b) En la literatura (Shön *et al*, 1992) mencionan que una concentración inferior a 0.5mg/l de oxígeno disuelto ó de nitratos, en el medio, es suficiente para provocar en la biomasa una respuesta típicamente anaerobia.

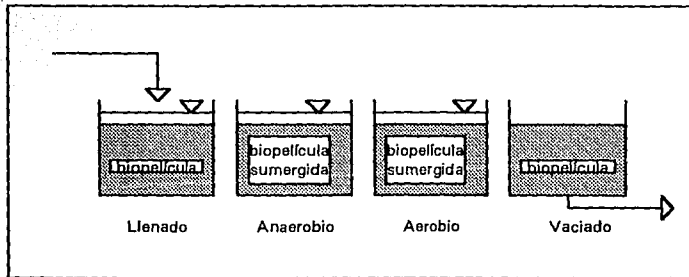


Figura 5.1 Secuencia de fases del reactor anaerobio/aerobio (a/o) con operación discontinua utilizado en esta investigación.

Al concluir la fase anaerobia inicia la aerobia. Durante ambas fases se mantuvo un régimen de mezclado completo dentro del tanque. Para ello, se proporcionó una distribución homogénea del líquido en el reactor, la cual fue inducida, mediante una alimentación desde la parte inferior y central que sube



a través de todo el tanque. Posteriormente se mantuvo mezclado al sistema debido a la recirculación interna de agua, que fue controlada con un sistema "by-pass".

El ciclo de tratamiento termina con una fase de vaciado y el tanque está listo para recibir una nueva carga de agua. Un diagrama del proceso se presenta en la figura 5.1

### 5.3 Unidad experimental.

Se utilizó un reactor a nivel planta piloto con biomasa adherida y completamente sumergida. En el centro del tanque se instaló un cilindro de 20 cm de diámetro. Alrededor de éste se colocaron 9912 anillos pall de 4 cm ordenados de forma vertical. El área superficial de los anillos fue de  $92.5 \text{ m}^2$ , El área superficial de los anillos más las paredes del reactor y del cilindro fue de  $105.5 \text{ m}^2$ .

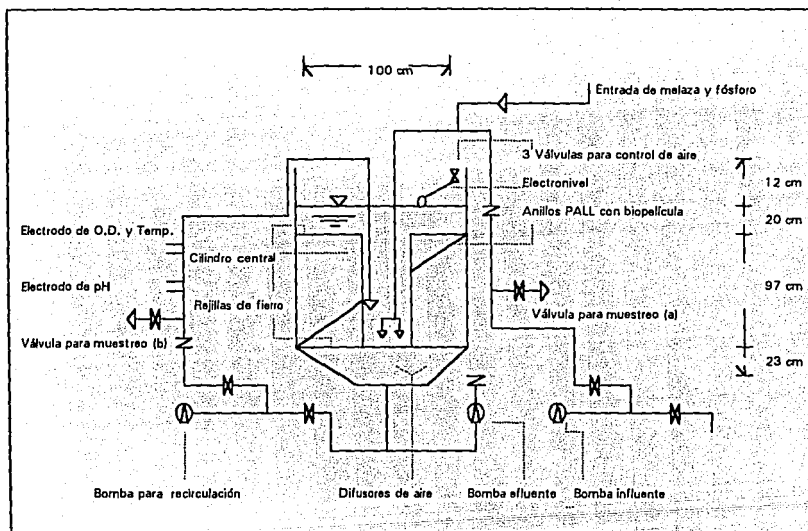


Figura 5.2 Diagrama esquemático del reactor. Volumen sin anillos ni biopelícula 1100 l; volumen con anillos y biopelícula 730 l, área de los anillos  $95.4 \text{ m}^2$  área de anillos más paredes del reactor y del cilindro  $105.5 \text{ m}^2$ , tasa de recirculación  $66.6 \text{ l/m}$  con operación discontinua y biopelícula.

El cilindro y los anillos pall estuvieron soportados en la parte inferior y cubiertos en la superior por una rejilla de hierro. Este arreglo sirvió para mantener ordenado el material de empaque e impedir que flotara en el agua.

La alimentación del reactor fue de forma discontinua con aguas de desecho de C.U. después del paso por desarenador. Se instaló un electronivel para interrumpir el flujo de agua a un volumen útil aproximado a 730 l y se colocó una tapa de unicel justo sobre la línea de agua para impedir la aeración del sistema. El volumen del reactor sin material de empaque ni biopelícula fue de 1100 l.

La planta piloto contó con el siguiente equipo: bomba influente, efluente y de recirculación; bombas dosificadoras de melaza y de fósforo y compresora para suministro de aire. La programación del proceso se controló con un "timer" o reloj programable de seis canales.

La operación del proceso involucró los siguientes aspectos:

1) *Sistema de llenado.* La línea de llenado se introdujo hacia el fondo y al centro del tanque, como se muestra en la figura 5.2. También se instaló una válvula (a) de mariposa para toma de muestras.

2) *Dosificación de melaza y de fósforo.* Junto con el agua de desecho se suministró una solución de melaza y de fósforo. El enriquecimiento del influente fue necesario debido a las bajas concentraciones de materia orgánica y de fósforo que contiene el agua de C.U. (ambas inferiores a la concentración característica del agua residual de tipo doméstico). En la tabla 5.1 se presentan las características del agua cruda con que se alimentó al reactor.

TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL CRUDA SIN ADICIÓN DE SOLUCIÓN ENRIQUECEDORA DE MELAZA Y FÓSFORO

| Parámetro                | Máximo* | Mínimo* | Promedio* |
|--------------------------|---------|---------|-----------|
| DQOt (mg/l)              | 346     | 93      | 190       |
| DQOs (mg/l)              | 317     | 30      | 66        |
| COT (mg/l)               | 77      | 9.6     | 17        |
| P-PO <sub>4</sub> (mg/l) | 3.8     | 1.2     | 2.1       |
| N-NH <sub>4</sub> (mg/l) | 13.6    | 2.2     | 7         |
| N-NO <sub>3</sub> (mg/l) | 4.12    | 1.3     | 2.8       |
| pH                       | 8       | 7.1     | 7.6       |
| O.D. (mg/l)              | 4.5     | 1.0     | 3.2       |
| T (°C)                   | 20.5    | 16      | 18.7      |

\* Los resultados se basan en muestras tomadas entre 07:30 y 10:00 A.M. durante un año.

3) *Sistema de mezclado.* Se proporcionó mezclado al sistema, a través de la recirculación interna de agua. El mezclado con recirculación fue controlado

con un sistema "by-pass". La salida del agua de recirculación, se encuentra próxima al fondo y al centro del reactor.

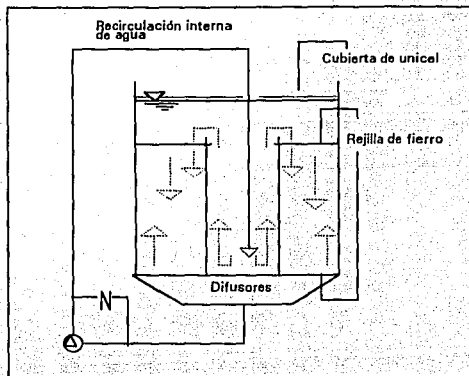


Figura 5.3 Representación esquemática del sistema de recirculación de agua en el reactor.

Con la recirculación se provocaron corrientes ascendentes dentro del cilindro, originadas por el choque del agua con el fondo de éste. Posteriormente, el líquido desciende por los bordes del cilindro y en dirección radial. La figura 5.3 muestra el comportamiento descrito. Se recirculan 66.6 l/m. En la línea de recirculación se instaló una válvula (b) de mariposa para toma de muestras.

4) *Fases anaerobia/aerobia.* Las fases anaerobia/aerobia están relacionadas con la eliminación o el suministro de aire, respectivamente.

5) *Sistema de aeración.* Durante la fase aerobia se suministró aire con una compresora. Se produjeron burbujas finas de aire con difusores de membrana marca Roediger, colocados en el fondo del reactor. Este arreglo permite difundir aire desde el fondo del tanque provocando que las burbujas suban atravesando el empaque plástico

6) *Sistema de vaciado.* El agua tratada sale por la parte inferior y central del reactor.

#### 5.4 Plan general de la experimentación.

Los procesos metabólicos responsables de la eliminación de materia orgánica y de fósforo están afectados por la duración del ciclo y la proporción de reacción anaerobia/aerobia. En este trabajo se experimentó con ciclos de 8 y 12 horas con 3 y 4 diferentes fases de reacción anaerobia/aerobia,

respectivamente. El orden de los experimentos, la duración de las fases y de los ciclos se presentan en la tabla 5.2. Los valores de las columnas en porcentaje (%) se calcularon respecto de la duración total del ciclo.

TABLA 5.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL REACTOR PILOTO. DURACIÓN DE LOS CICLO Y DE LAS FASES, CARGA ORGÁNICA Y ORDEN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS.

| Corrida  | Duración de las corridas (días) | Duración del ciclo (horas) | Carga orgánica promedio, como: |                           | Duración de las fases |        |           |        |
|----------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------|-----------|--------|
|          |                                 |                            | DQOt (g/m <sup>2</sup> d)      | DQOs (g/m <sup>2</sup> d) | anaerobia*            |        | aerobia** |        |
|          |                                 |                            |                                |                           | (horas)               | (%)*** | (horas)   | (%)*** |
| Arranque | 60                              | 8                          | -                              | 8.16                      | 4.0                   | 50     | 4.0       | 50     |
| 1        | 140                             | 8                          | -                              | 6.36                      | 5.2                   | 65     | 2.8       | 35     |
| 2        | 55                              | 12                         | 3.33                           | 1.93                      | 7.8                   | 65     | 4.2       | 35     |
| 3        | 45                              | 12                         | 3.64                           | 2.32                      | 6.0                   | 50     | 6.0       | 50     |
| 4        | 15                              | 12                         | 4.03                           | 2.83                      | 4.2                   | 35     | 7.8       | 65     |
| 5        | 15                              | 12                         | 3.8                            | 2.05                      | 9.6                   | 80     | 2.4       | 20     |
| 6        | 50                              | 8                          | 4.5                            | 2.85                      | 5.2                   | 65     | 2.8       | 35     |
| 7        | 30                              | 8                          | 3.97                           | 2.6                       | 4.0                   | 50     | 4.0       | 50     |
| 8        | 17                              | 8                          | 4.06                           | 2.63                      | 2.8                   | 35     | 5.2       | 65     |

\* La fase anaerobia incluye 0.25 horas de llenado

\*\* La fase aerobia incluye 0.33 horas de vaciado

\*\*\* Porcentaje respecto de la duración total del ciclo

### 5.5 Muestreo y análisis del agua.

Las muestras de agua se colectaron en dos puntos de la planta piloto:

1) *En la válvula de la línea de llenado.* El valor de DQO y de P-PO<sub>4</sub> del agua que fluye por este punto fue la base para ajustar la concentración y el tiempo de suministro de la solución de melaza y de fósforo que se agregaron al influente. La frecuencia del muestreo fue al menos dos veces por semana.

2) *En la válvula de la línea de recirculación,* el agua que fluye por este punto es representativa del agua que se encuentra en el tanque e indica la eficiencia del tratamiento. En este punto se tomaron muestras para observar el comportamiento de degradación de sustratos durante un ciclo completo.

Durante el tiempo de experimentación (días), la frecuencia de muestreo, fue de dos veces por semana. Se tomaron muestras del influente, del final de la fase anaerobia y del final de la fase aerobia o final del ciclo.

Durante cada ciclo (horas), se tomaron muestras cada hora desde el inicio hasta el final del ciclo. Esto se hizo una vez por ciclo con diferente duración de fase anaerobia/aerobia.

Las pruebas analíticas de laboratorio y la preservación de las muestras se realizaron de acuerdo con la metodología propuesta en APHA (1992). Las pruebas químicas se hicieron previa filtración de las muestras en membranas de nitrato de celulosa de 0.45 micras, excepto DQOt, SST y SSV.

La demanda química de oxígeno total y soluble (DQOt y DQOs), el fósforo en forma de ortofosfatos ( $P-PO_4$ ), el nitrógeno como nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4$ ) y el nitrógeno de nitratos ( $N-NO_3$ ) y nitritos ( $N-NO_2$ ) fueron determinados por fotometría. Se utilizaron reactivos de los tests analíticos Spectroquant de Merck y un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 3B de doble rayo.

El carbón orgánico total (COT) se determinó en un aparato modelo TOCOR 2E de Maihak, empleando además un muestreador automático MPW2 + MST4 de Maihak.

Los parámetros de pH, oxígeno disuelto (O.D.) y temperatura (T) fueron medidos con electrodos colocados en diferentes puntos de la línea de recirculación. Se utilizó un potenciómetro marca Orion 520A para medir el pH. El oxígeno disuelto y la temperatura se midieron con un oxímetro YSI 57. Estos tres parámetros se obtuvieron conectando el equipo de medición a un registrador Orion modelo 4500 Microscribe.

## **5.6 Muestreo y análisis de protozoarios y metazoarios.**

Se estudió el efecto que tres diferentes tiempos de reacción anaerobia/aerobia (corridas 3-8), tienen sobre la composición de la población de protozoarios y metazoarios en la biomasa. Estos estudios se realizaron de la forma siguiente:

Se hicieron preparaciones temporales raspando la biopelícula de al menos tres anillos pall y disgregándola en un portaobjetos. Estas preparaciones fueron examinadas en un microscopio Leitz Laborlux a un aumento de 200X. La identificación de protozoarios y metazoarios se llevó a cabo con las claves de identificación de Kudo (1969); Pennak (1978) y Streble y Krauter (1982).

La superficie expuesta al crecimiento de microorganismos por anillo es de 95  $cm^2$ . De ésta área se observaron únicamente 23.75  $cm^2$  en 25 campos visuales, por lo tanto  $23.75 \text{ cm}^2 \times 3 \text{ anillos} = 71.25 \text{ cm}^2$ .

En los experimentos 6-8 la cantidad de individuos observada de cada especie se multiplicó por el área total. El área total corresponde a 95  $cm^2 \times 3 \text{ anillos}$

extraídos del reactor =  $285 \text{ cm}^2$ . Por ejemplo: 198 *Aspidisca* fueron observados en  $71.25 \text{ cm}^2$  ¿cuántos individuos habría si se hubiera observado toda el área muestreada?, entonces:  $198 \times 285 \text{ cm}^2 / 71.25 \text{ cm}^2 = 792$  *Aspidisca*.

### **5.7 Muestreo y análisis de lodos.**

Se determinó el contenido de fósforo de la biomasa de los experimentos 6 a 8. La metodología consistió en coleccionar aproximadamente 100 l de agua tratada provenientes de la línea de vaciado. Los lodos de exceso se recuperaron después de una hora de sedimentación. Las pruebas analíticas que se hicieron fueron:

Fósforo total. FT como  $\text{P-PO}_4$  después de digestión con ácido perclórico.

Sólidos suspendidos totales. SST como masa seca de lodos a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

También se analizó el contenido de  $\text{P-PO}_4$  del agua con objeto de detectar una posible liberación de fósforo durante el tiempo de sedimentación de los lodos.

## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan y discuten los resultados que describen el comportamiento de la comunidad microbiológica, principalmente bacterias facultativas y acumuladoras de fósforo (poly-P), protozoarios y metazoarios. Se analizan las relaciones interespecíficas que se establecen entre las poblaciones mencionadas. También se analiza la influencia de la duración del tratamiento y del tiempo de reacción anaerobio/aerobio en la comunidad y su relación con la eficiencia del tratamiento.

### **6.1 Arranque de la planta piloto.**

El criterio para establecer las condiciones de operación en la etapa de arranque se basó en la investigación de González y Wilderer (1991). Estos autores analizaron el proceso de remoción de fósforo utilizando un reactor a nivel laboratorio con operación discontinua y biomasa adherida. Experimentaron con tres ciclos, cada uno con tres fases anaerobias diferentes; obteniendo eficiencias de remoción de DQO y de P-PO<sub>4</sub> superiores al 80%.

Como punto de partida se seleccionaron dos variables de operación: a) ciclos de 8 horas y b) etapa anaerobia de 4 horas (50% respecto de la duración total del ciclo). Como parámetros de control se determinaron la DQOs y el P-PO<sub>4</sub> del influente y del final de la fase anaerobia.

Esto se hizo considerando que durante la fase anaerobia debe eliminarse la mayor parte de los sustratos carbonosos (más del 70%) y liberarse el doble de la concentración inicial de fósforo.

El comportamiento anterior indica que la biopelícula se ha enriquecido en una buena proporción de organismos poly-P y puede considerarse que el reactor ha alcanzado el comportamiento esperado.

Durante el arranque, se observó un rápido crecimiento y posterior estabilización de la biopelícula. Sin embargo, después de 60 días de operación, ambos parámetros permanecieron sin cambios importantes entre el inicio del tratamiento y el final de la fase anaerobia.

### **6.1.1 Consideraciones generales sobre la operación del reactor**

Debido a la nula eliminación de materia orgánica y de fósforo del experimento anterior fue necesario reconsiderar la estrategia de control que debería seleccionarse para inducir el desarrollo de microorganismos poly-P. Para ello se contemplaron dos aspectos: a) aumentar el tiempo de contacto anaerobio de 50 a 65% y mantener el ciclo en 8 horas y b) ajustar la carga orgánica. Durante los primeros 62 días, a 8 gDQOs/m<sup>2</sup>d y posteriormente a 5 gDQOs/m<sup>2</sup>d hasta completar 140 días de experimentación.

La propuesta anterior se basó en los trabajos de Okada *et al* (1987); González y Wilderer (1991) y Gonçalvez y Rogalla (1992). Estos autores consideran que un tiempo de contacto anaerobio prolongado favorece el desarrollo de organismos poly-P. El aumento de 4.0 a 5.2 horas se hizo con base en el análisis estadístico de Fávila, (sin publicar) que a su vez se basa en los resultados del trabajo de González y Wilderer (1991). En dicho análisis se relaciona la duración de los ciclos y de la etapa anaerobia con la concentración DQOs y P-PO<sub>4</sub> influentes. Fávila concluye que una eliminación de nutrientes excelente se alcanza con ciclos de 8 horas (5 de ellas transcurren bajo condiciones anaerobias).

Las concentraciones de DQOs y de P-PO<sub>4</sub> del agua residual de C.U. presentan grandes variaciones estacionales relacionadas con la temporada de lluvias (drenajes combinados) y con el calendario escolar (período de vacaciones). Además de los cambios durante los horas del día y de la noche determinados por la actividad de la población tributaria. En términos generales la DQOs y el P-PO<sub>4</sub> presentan concentraciones inferiores a 66 y 2.1 mg/l, respectivamente.



(ver tabla 5.1). Debido a esto fue necesario adicionar un sustrato compuesto por melaza y ácido fosfórico para aumentar la concentración de ambos parámetros en el agua, simulando las condiciones de contaminación típicas de aguas residuales domésticas (Levine *et al*, 1985)

Es importante mencionar que el aumento de DQO provocado por la adición de melaza se mantuvo constante y que las variaciones de DQO en el reactor se deben a variaciones del agua cruda.

Además de la DQOs y P-PO<sub>4</sub>, se determinaron el COT, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, pH, O.D. y T. Esto se hizo para obtener mayor información del funcionamiento del sistema e identificar los factores que influyen en el desarrollo de organismos poly-P. También aumentó la frecuencia del muestreo de dos a tres puntos representativos del ciclo: a) influente b) final de la fase anaerobia y c) final de la fase aerobia o efluente.

Con objeto de observar el comportamiento de los parámetros mencionados, los valores obtenidos en un ciclo se graficaron respecto del tiempo de experimentación. También se obtuvieron gráficas del porcentaje de eliminación de sustratos orgánicos; restando los valores del influente y efluente x100/influente que se represen como curva total. La diferencia entre los valores influente y los del final de la fase anaerobia x100/influente, se representan como curva final de fase anaerobia y la resta entre el porcentaje de remoción total y de fase anaerobia se representa como curva final de fase aerobia.

En esta investigación, se experimentó con ciclos de 8 y 12 horas, presentándose 3 ó 2 ciclos en un día, respectivamente. Todas las gráficas de este trabajo se basan en los valores obtenidos durante los ciclos que inician en horas de la mañana (entre 07:30 y 10:00). La determinación de diferencias significativas entre los ciclos, se hizo con base en 4 muestreos de 24 horas, los cuales se realizaron con ciclos de 8 horas y 65% de etapa anaerobia (primera corrida de la tabla 5.2). Como resultado se observó que el comportamiento de degradación de nutrientes fue similar entre los ciclos, independientemente de la hora en que éstos inician. La diferencia más notable se refiere a la temperatura del agua influente del ciclo de la madrugada (02:00-10:00), la cual disminuyó hasta 7 °C con respecto al ciclo siguiente (10:00 - 18:00 )

### **6.1.2 Competencia entre organismos poly-P y no poly-P**

La carga orgánica y los perfiles de eliminación de DQOs, COT y P-PO<sub>4</sub>, obtenidos durante el experimento con 8 horas y 65% de fase anaerobia (corrida número 1 de la tabla 5.2) se presentan en la figura 6.1. Se

identificaron tres comportamientos, los cuales se describen y analizan a continuación.

Durante los días 0-62 (sección a figura 6.1), la carga orgánica aplicada fue la más alta de toda la experimentación posterior. La carga se ajustó a 8 gDQOs/m<sup>2</sup>d. Durante la fase anaerobia se eliminó en promedio 16% de la DQOs y COT. Durante la fase aerobia se eliminó en promedio 28% de la DQOs y de 30% de COT. La remoción total fue de 45% y 75% como DQOs y COT, respectivamente.

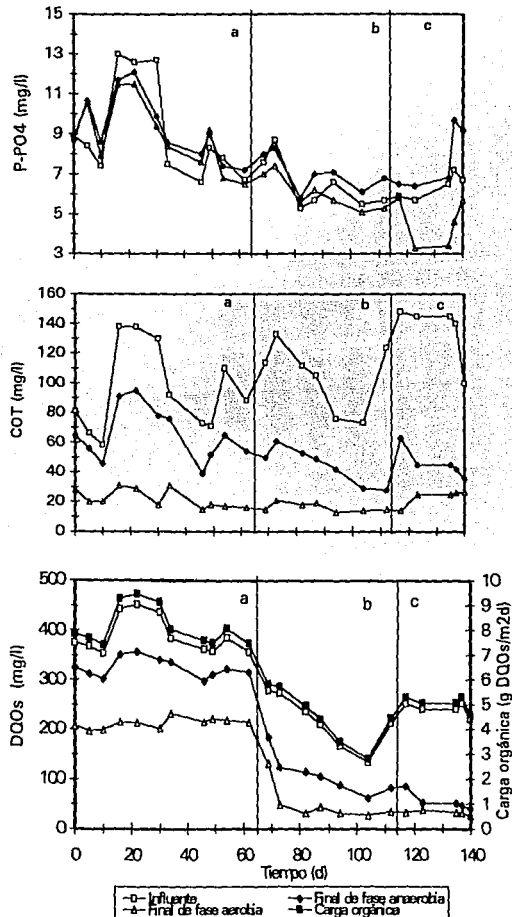


Figura 6.1 Perfil de eliminación de contaminantes, DQOs, COT P-PO<sub>4</sub> y carga orgánica aplicada, durante la primera corrida. Ciclos de 8 h con 5.2 h en fase anaerobia (65%).

La diferencia de la concentración de ortofosfatos entre el influente y el final de la fase anaerobia y del final de ciclo, no es consistente con un comportamiento de biomasa enriquecida con microorganismos poly-P.

El perfil de degradación de contaminantes, durante los días 0-62, indica que la actividad bioquímica de los microorganismos poly-P fue desplazada por otras rutas metabólicas, principalmente de fermentación y oxidativas aerobias, ambas utilizadas por bacterias facultativas. Esta afirmación se explica en los términos siguientes:

La actividad bioquímica de los organismos facultativos es extremadamente variable. Pueden llevar a cabo procesos hidrolíticos, fermentativos u oxidativos (Schlegel, 1988). Bajo condiciones anaerobias, las bacterias facultativas degradan los sustratos orgánicos a través de mecanismos de fermentación. Generalmente todos los sustratos excepto ácidos grasos volátiles (AGV) son degradados por la vía Embden-Meyerhoff-Parnas o Enter-Doudoroff generando AGV. Los AGVs, así producidos, son fácilmente capturados y almacenados en forma de PHB por bacterias poly-P (Comeau *et al*, 1985; Mino *et al*, 1987; Wentzel *et al*, 1991 y Doria *et al*, 1992).

El comportamiento anterior se alcanza en un nivel de equilibrio, donde ambas poblaciones coexisten de modo estable, generalmente en una proporción fija que evidentemente debe ser menor para organismos fermentativos y mayor para organismos poly-P. Los resultados indican una proporción de organismos inversa donde la mínima disminución obtenida de DQOs y COT se debe a la actividad de organismos facultativos. Los AGVs que se producen no compensan la fracción soluble de la DQO, se genera crecimiento celular que no puede ser detectado con la DQOs. Stensel (1991) menciona que los AGVs constituyen una fracción muy pequeña de la DQOs

Por otra parte, los valores altos de carga orgánica (promedio 8 gDQOs/m<sup>2</sup>d) favorecieron el crecimiento de microorganismos heterótrofos facultativos, los cuales se encuentran en la parte externa de la biopelícula, en contacto con el agua. Esta gran cantidad de sustratos provocó una renovación rápida de organismos facultativos que inhibió el establecimiento de bacterias poly-P.

Como consecuencia del bajo consumo de materia orgánica en etapa anaerobia, la fase aerobia inicio con una alta concentración de DQOs cercana a 300 mg/l y de COT superior a 40 mg/l (curva final de fase anaerobia). Una parte de esta gran cantidad de alimento, fue metabolizada por microorganismos heterótrofos facultativos y aerobios estrictos a través de la ruta de los ácidos tricarbóxicos y fosforilación oxidativa.

En conclusión la remoción biológica de fósforo, es un proceso selectivo para favorecer el desarrollo de organismos poly-P, con base principalmente en los

recursos alimenticios, los cuales deben ser capturados y almacenados en grandes cantidades durante las primeras horas del tratamiento a fin de inhibir el crecimiento de otros grupos de microorganismos que compiten por el mismo recurso. Como esto no ocurre y las poblaciones, que conforman la biopelícula, están empeñadas en el mismo fin (la obtención de alimento que pueda ser metabolizado con bajos requerimientos de energía), entonces, las bacterias facultativas en condiciones aerobias con abundancia de sustratos, lograron desplazar a las poly-P de la biopelícula.

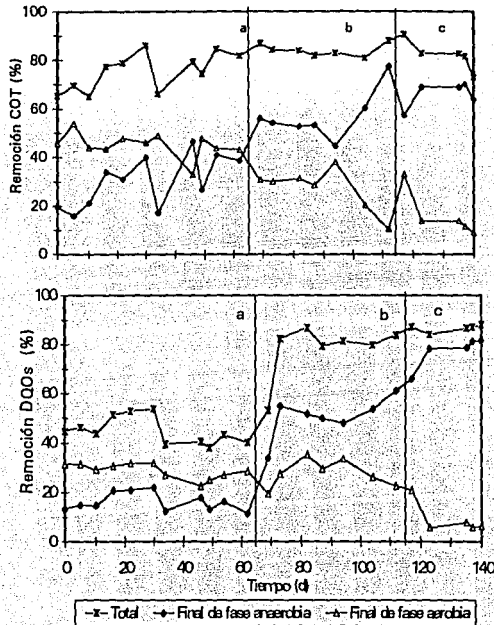


Figura 6.2 Eficiencia de remoción de sustratos orgánicos durante la primera corrida. Ciclos de 8h con 5.2 h en fase anaerobia (65%)

2) Durante los días 62-117 (sección b de la figura 6.1), se redujo el valor de carga orgánica, fue ajustado a 5 gDQOs/m<sup>2</sup>d. Bajo estas condiciones la eficiencia de remoción de DQOs y COT aumentó y fue mayor durante la fase anaerobia (promedio 50 y 57%) que aerobia (promedio 27% en ambos parámetros). No se observó una concomitante excreción y captura de ortofosfatos.

Un comportamiento similar fue observado por Cech *et al* (1993), quienes utilizaron dos reactores con características similares (excepto la composición del sustrato orgánico). Un reactor fue alimentado con acetato (F1) y otro con

una mezcla de acetato y glucosa (G1). Ambos reactores operaron de forma discontinua a nivel laboratorio con biomasa suspendida. Experimentaron con ciclos de 12 horas, 2 de ellas bajo condiciones anaerobias, 9 aerobias y 1 de sedimentación. Observaron el establecimiento de bacterias poly-P y otras a las que denominaron "G" en los reactores F1 y G1, respectivamente.

Las bacterias "G" fueron capaces de remover eficientemente sustratos orgánicos sin liberar fósforo. Con el fin de determinar si la glucosa fue un sustrato esencial para las bacterias "G", ésta fue reemplazada por acetato. Obtuvieron 95% de eliminación de acetato en condiciones anaerobias sin observar liberación de fósforo. Este fenómeno también fue observado por Satoh *et al* (1992), quienes proponen que algunos microorganismos utilizan glucógeno en lugar de polifosfatos como fuente de energía para crecer bajo una condición anaerobia/aerobia.

Con base en estudios realizados a nivel laboratorio con reactores de flujo continuo y discontinuo y con biomasa suspendida Satoh *et al* (1992) observaron que sustratos orgánicos tales como: glucosa, acetato y propionato fueron acumulados en los lodos como polihidroxialcanoato (PHA). El agente reductor requerido para la formación de PHA es proporcionado por el consumo intracelular de carbohidratos a través de glucólisis. El glucógeno es el sustrato requerido para la glucólisis. Por lo tanto, esta vía proporciona energía y el agente reductor necesarios para acumular sustratos orgánicos sin utilizar polifosfatos.

Satoh *et al* (1992) y Cech *et al* (1993), mencionan que una gran cantidad de sacáridos pueden inducir la acumulación de PHA en vez de PHB. De acuerdo con estos investigadores, el alto contenido de sácaridos contenidos en la melaza que se añadió al influente influyó negativamente en el proceso RBF.

3) Durante los días 117-140, se experimentó con un valor de carga promedio de 5 gDQOs/m<sup>2</sup>d (sección c). Durante este período aumentó la eliminación de la DQOs. Se removió 86 y 9% en las fases anaerobia y aerobia, respectivamente. Se obtuvieron ligeros incrementos de excreción y captura de ortofosfatos. Estos resultados indican un incremento de organismos poly-P, aunque todavía insuficiente para alcanzar niveles óptimos de remoción de P-PO<sub>4</sub>.

El comportamiento observado durante los 140 días que duró la primera corrida muestra claramente la influencia de factores ambientales en el crecimiento de organismos poly-P. Por lo que, a continuación, se hace un análisis del comportamiento de pH, O.D. y T.

### 6.1.3 Influencia de factores ambientales sobre la capacidad de remoción de ortofosfatos con biopelícula pobre de organismos poly-P.

#### 6.1.3.1 pH

En la figura 6.3 se observa que durante los primeros 30 días de la corrida 1, los niveles de pH fueron los más bajos de toda la experimentación posterior. El pH disminuyó a menos de 6 en fase anaerobia. Esta disminución puede deberse a la actividad de microorganismos con funciones de hidrólisis y fermentación. La acción conjunta de bacterias hidrolíticas y fermentativas pudo generar, entre otros productos, AGVs y  $H_2$ . Estos sustratos se acumularon en el medio debido a la ausencia de bacterias capaces de utilizarlos (poly-P e hidrogenolíticas).

También contribuyó a la disminución de pH el  $H_3PO_4$  que se añadió al influente. La mínima variación de los valores de  $P-PO_4$  de la figura 6.3 muestra que dicho sustrato no fue asimilado por bacterias poly-P. A partir del día 35 el  $H_3PO_4$  fue cambiado por  $K_2HPO_4$  para ajustar la concentración inicial de  $P-PO_4$ .

Comeau *et al* (1985) proponen que el transporte de sustrato al interior de la célula depende de un balance de protones. Por lo que, la disminución de pH en el medio, afectó dicho balance y consecuentemente la captura de fósforo.

El pH aumentó a casi 7 durante la aeración (curva final de fase aerobia). Esto se debe a la oxidación del sustrato residual y al producido en la fase anaerobia.

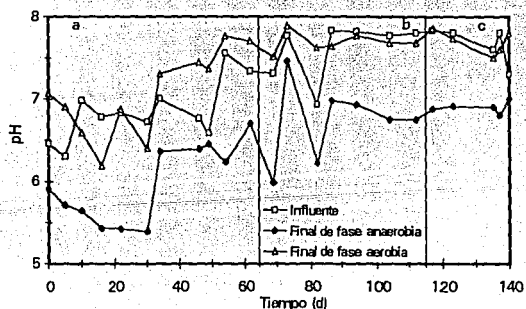


Figura 6.3 Variación de pH durante la primera corrida. Ciclos de 8 horas con 5.2 h en fase anaerobia (65%).

Levin y Shapiro (1965) estudiaron el efecto de pH sobre la captura de fósforo experimentando en la zona aerobia del proceso con 5, 6, 7, 8 y 9 unidades de pH. Observaron que la tasa de captura fue muy rápida en el intervalo 7-8,

disminuyendo drásticamente con 9, lo cual se debe a una precipitación química provocada por formación de fosfato de calcio. A niveles muy bajos de pH 5, no observaron liberación de fósforo.

Tracy y Flammino (1985) en Stensel (1991) mencionan que una óptima remoción de fósforo se obtiene en el intervalo 7.4 a 6.6 de pH. A valores más bajos de pH la remoción de fósforo decrece y no fueron estudiados valores de pH mayores de 7.6.

De acuerdo con los autores mencionados y tomando en cuenta los valores de pH obtenidos en esta parte de la investigación, a partir del día 90 y durante el resto de la experimentación, el reactor A/O presentó niveles de pH favorables para el desarrollo de organismos poly-P. El pH no disminuyó por abajo de 6.5 y aumentó a casi 8 en condiciones anaerobias y aerobias, respectivamente.

### 6.1.3.2 Oxígeno disuelto

La figura 6.4 muestra el perfil del comportamiento típico de oxígeno disuelto durante un ciclo. El agua cruda presenta una concentración aproximada a 4 mgO<sub>2</sub>/l, la cual decrece de forma lenta y gradual hasta que el oxígeno se agota por completo. Una concentración de 0 mgO<sub>2</sub>/l se alcanza después de 1.5 horas del llenado del tanque. Esto se traduce en una reducción del tiempo de reacción *anaerobio* originalmente propuesto y en una actividad no deseada de bacterias aerobias, las cuales utilizan sustratos carbonosos sin excretar fósforo.

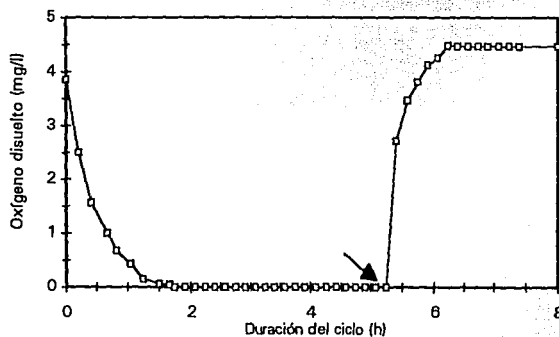


Figura 6.4 Comportamiento típico de oxígeno disuelto durante un ciclo de tratamiento. La concentración inicial corresponde al agua cruda influente. El aumento de concentración al iniciar la fase aerobia es inmediato y se debe al suministro de aire. La flecha indica el final de la fase anaerobia (izquierda) y el inicio de la aerobia (derecha).

Shön *et al* (1993) determinaron la influencia que tiene el O.D. sobre la captura de fósforo. Experimentaron en un reactor A/O a nivel laboratorio y con diferentes procesos a nivel industrial, todos ellos con biomasa suspendida. Observaron que para alcanzar una óptima liberación de fósforo, se requiere entre 0.1 y 0.5 mgO<sub>2</sub>/l. Levin y Shapiro (1965) mencionan que una buena liberación de fósforo se obtiene cuando el O.D. es igual o menor que 1 mg/l. En el trabajo de González y Wilderer (1991), el consumo de oxígeno es muy rápido y va de 8 a 0 mg/l en sólo 0.5 hora.

De acuerdo con estos investigadores y tomando en cuenta los valores de oxígeno disuelto, graficados en la figura 6.4, es necesario que transcurran al menos 0.5 h y máximo 1 h para observar liberación de fósforo, con 1 y 0.43 mg/l de O<sub>2</sub> respectivamente. Aun cuando el oxígeno se agotó del agua, en ningún muestreo de la primera corrida, se observó una buena liberación de fósforo. Sin embargo, en el transcurso de la investigación, se observa que, aun cuando se presentan concentraciones superiores a 1 mg/l de oxígeno disuelto, se liberan ortofosfatos. Esto ocurre únicamente si las bacterias poly-P se han establecido en el reactor. (sección 6.2)

Durante la fase aerobia, el nivel de O.D. se mantuvo entre 3.5 y 4.0 mg/l. De acuerdo con Levin y Shapiro (1965); González y Wilderer, (1991) y Stensel, (1991), dicha concentración es suficiente para que se lleve a cabo la degradación aerobia de sustratos orgánicos.

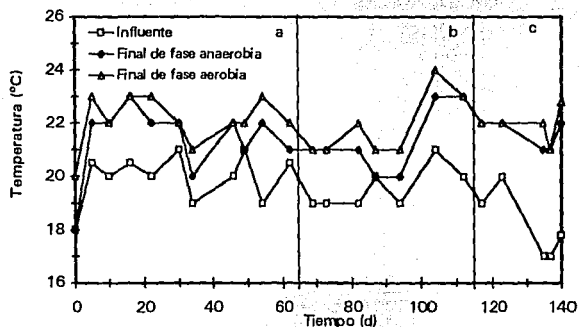


Figura 6.5 Variación de temperatura durante la primera corrida. Ciclos de 8 horas con 5.2 h en fase anaerobia (65%).

### 6.1.3.3 Temperatura

La temperatura es un parámetro que tiende a aumentar durante todo el ciclo, independientemente de la estación del año y de la hora en que éste inicie. Valores mínimos de 16 °C y máximos de 23 °C, se observaron en el agua



influyente del ciclo que inicia en la madrugada y en el agua efluente del ciclo que inicia por la mañana, respectivamente. Mamais y Jenkis (1992) mencionan que una exitosa aplicación del proceso biológico para remoción de fósforo se obtiene con intervalos de temperatura que fluctúan entre 5 y 30°C. González y Wilderer (1991) observaron que el efecto de la temperatura en el intervalo 15-25°C fue insignificante en la eficiencia del proceso. De acuerdo con ambos trabajos y tomando en cuenta los valores de temperatura obtenidos en este estudio (figura 6.5) se concluye que la temperatura no fue un factor que afectará el establecimiento de bacterias poly-P.

#### 6.1.3.4 Carga orgánica

La carga orgánica ha sido propuesta como criterio de diseño para sistemas con biopelícula. Este concepto involucra al caudal, la concentración de contaminantes y el área superficial (área expuesta al crecimiento de microorganismos). De manera cuantitativa, la carga orgánica se define como:

$$C.O. = \frac{Q S_o}{A} \quad (6.1)$$

donde:

- Q flujo de agua residual (m<sup>3</sup>/d)
- S<sub>o</sub> concentración de sustrato influente medido como DQOs o DQOt (mg/l o mg/m<sup>3</sup>)
- A área superficial expuesta al crecimiento de microorganismos (m<sup>2</sup>)

El flujo de agua residual, se calculó multiplicando el número de ciclos que se presentan en un día por el volumen del reactor.

En la figura 6.1 se observa que, durante los primeros 62 días de la experimentación, el sistema operó con una elevada carga orgánica, superior a 7 g/DQOs/m<sup>2</sup>d. Esta forma de operación coincide con un comportamiento indeseado e ineficiente de eliminación de sustratos orgánicos (mayor eliminación en fase aerobia que anaerobia)

Una vez analizado el conjunto de las condiciones de operación y los resultados de las pruebas fisicoquímicas del agua, se determinó que el proceso podría mejorar disminuyendo la carga orgánica. La elección del valor de carga se basó en el trabajo de González y Wilderer (1991). Ellos obtuvieron una eficiente remoción de materia orgánica y de fósforo experimentando con 5 gDQOs/m<sup>2</sup>d y la carga se ajustó a este valor, a partir del día 62 (figura 6.1).

Analizando la ecuación 6.1, para calcular la carga orgánica, se observa que manteniendo constantes la duración del ciclo y el área expuesta al crecimiento

microbiano, la posibilidad de disminuir la carga se restringe a dos factores: a) aumentar el volumen del tanque, lo cual se dificulta debido a las características de diseño del reactor y b) disminuir la concentración de material orgánico influente, lo cual se logra reduciendo el tiempo de suministro y la concentración de la solución de melaza que se añade al influente. Sin embargo, las variaciones intrínsecas de concentración de sustratos del agua residual cruda, dificultan y limitan el establecimiento de un valor constante de carga orgánica.

A partir del día 62 y hasta el 112, la carga se calculó tomando en cuenta la DQOs del influente, posteriormente y hasta finalizar la investigación fue calculada con base en la DQOt.

De acuerdo con los fundamentos bioquímicos del proceso A/O, el comportamiento de eliminación de sustratos carbonosos posterior al día 62 fue el esperado. Sin embargo, las reacciones de remoción de materia orgánica no ocurren simultáneamente con las de fósforo, a pesar de que se observa un aumento y posterior disminución de éste, la cantidad excretada y capturada fue muy pequeña (figura 6.1). La degradación de sustratos no asociada a la de fósforo se debe a la actividad de microorganismos no poly-P, los cuales se encuentran en mayor proporción que las bacterias poly-P. Las interacciones entre ambas poblaciones están influenciadas por dos factores principales, ambos ocurren bajo condiciones anaerobias y se refieren a lo siguiente:

1) En el agua residual de tipo doméstico, el contenido de acetato y otros AGVs es muy pequeña o no están presentes. (Stensel, 1991; Wentzel *et al* 1991 y Doria *et al* 1992). Autores como Stensel y Barnard (1992) señalan que la DQO influente contiene una fracción de sustratos fácilmente degradables (generalmente 93% de la DQO), los cuales son transformados a AGVs por organismos facultativos con metabolismo de fermentación. La tasa de conversión es mucho más lenta que la tasa de captura, limitando la disponibilidad de sustrato para organismos poly-P (Wentzel *et al*, 1987). Organismos no poly-P (probablemente bacterias "G" descritas por Cech *et al* (1993) son responsables de la eliminación de dichos sustratos u otros más complejos, influyendo negativamente en la excreción, la captura y la remoción de fósforo.

2) El agua residual de C.U. contiene aproximadamente 3 mg/l de O.D. y de  $\text{N-NO}_3$  (tabla 5.1). La presencia de nitratos se debe al aporte de instituciones de investigación química y bioquímica que se encuentran en el campus de C. U. Normalmente el agua residual de tipo doméstico no presenta nitratos (Barnes y Bliss, 1983). El contenido de O.D. y  $\text{N-NO}_3$  en el agua influente afectaron el desarrollo de organismos poly-P provocando reacciones de oxidación aerobia y anaerobia no asociadas a las de fósforo. Ambos parámetros constituyen una fuente de oxígeno para organismos heterótrofos no poly-P, los cuales

metabolizan la fracción fácilmente degradable de la DQO, reduciendo la cantidad de material orgánico susceptible de ser transformado a AGVs. (Wentzel *et al* 1991 y Stensel y Barnard 1992)

Stensel y Barnard (1992) señalan que 1 mg de O.D. y N-NO<sub>3</sub> bajo condiciones anaerobias utilizan 3 y 8.6 mg de la DQO respectivamente. Por lo tanto, el oxígeno y los nitratos presentes en la fase anaerobia, reducen la tasa de ácidos grasos disponibles para organismos poly-P y, en consecuencia, reducen la liberación, la captura y la remoción de fósforo.

#### 6.1.4 Influencia de factores ambientales sobre la capacidad de nitrificación en el proceso de remoción de fósforo.

La nitrificación tiene lugar en el proceso A/O, junto con la remoción heterotrófica de los nutrientes carbonosos y de los compuestos de fósforo. La nitrificación es una reacción secuencial en la cual se distinguen dos fases donde el N-NH<sub>4</sub> es oxidado por bacterias autótrofas nitrificantes en presencia de oxígeno disuelto para producir nitrógeno oxidado (nitritos y nitratos) (Christensen y Harremoës, 1978). La oxidación de amoníaco por bacterias nitrificantes se puede expresar como:



La reacción global es:



La nitrificación se presenta en la fase aerobia del tratamiento y se identifica por la disminución de N-NH<sub>4</sub> y el aumento de N-NO<sub>3</sub>. La eficiencia de la nitrificación está influenciada de dos formas: a) por factores ambientales, tales como: concentración de N-NH<sub>4</sub>, pH, O.D. y T (Rámirez 1988) y b) por parámetros de operación, los cuales se refieren a la carga orgánica y a la duración de la fracción aerobia del ciclo.

Con base en el análisis del comportamiento de los parámetros mencionados y del conjunto de las condiciones de operación, se identifican los principales factores que influyeron en el establecimiento del proceso de nitrificación durante la primera corrida.

Al iniciar la experimentación se consideró suficiente la determinación de N-NH<sub>4</sub> para observar nitrificación. Sin embargo, debido a la complejidad del proceso y para obtener mayor información, se hicieron determinaciones analíticas de N-NO<sub>3</sub> a partir del día 50.

La figura 6.6 muestra el comportamiento de  $N-NH_4$  durante la primera corrida. En la mayoría de los muestreos (16 de 21), el nitrógeno amoniacal aumentó durante la fase anaerobia y en la aerobia disminuyó casi en todas los muestreos (excepto en 2 de ellos). Sin embargo, dicha disminución fue insuficiente para alcanzar buenos niveles de remoción, debido a que en ninguna muestra se obtuvieron concentraciones inferiores a 4 mg/l de  $N-NH_4$  en el efluente.

El aumento en la fase anaerobia fue provocado por: a) procesos de amonificación donde se libera  $NH_4$  a partir de desechos orgánicos generados por lisis y descomposición bacteriana, b) por hidrólisis de compuestos nitrogenados como la urea y c) por desaminación de compuestos orgánicos nitrogenados. La disminución de  $N-NH_4$  en fase aerobia se debe a procesos de asimilación, lo cual es más probable que una nitrificación verdadera debido a la mínima cantidad de  $N-NH_4$  que se eliminó.

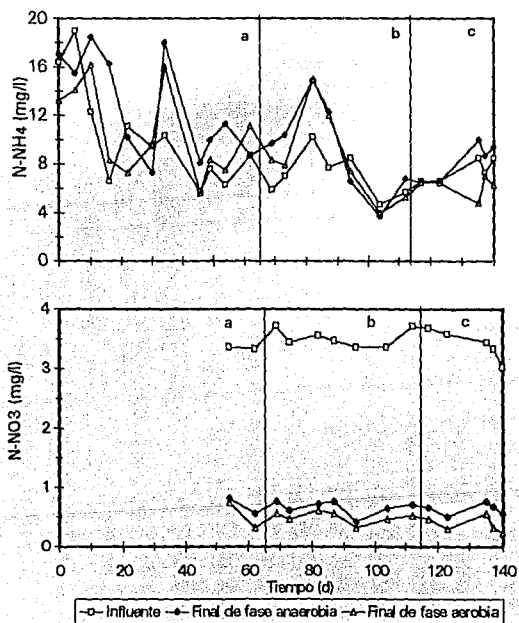


Figura 6.6 Variación de  $N-NH_4$  y  $N-NO_3$  durante la primera corrida. Ciclos de 8 h con 5.2 h en fase anaerobia (65%).

La comparación entre las curvas aerobias de las figuras 6.6 demuestra que la disminución de  $N-NH_4$  no corresponde con un aumento de  $N-NO_3$ . Este

comportamiento comprueba la ausencia de nitrificación durante los 140 días de experimentación de la primera corrida.

Se observa que el agua residual influente contiene entre 3 y 4 mg/l de  $\text{N-NO}_3$ . Las curvas anaerobia y aerobia de la figura 6.6, muestran que los nitratos disminuyeron durante todo el ciclo, alcanzando valores inferiores a 1 y 0.8 mg/l, respectivamente. La disminución en fase anaerobia puede deberse a lo siguiente:

Muchas bacterias facultativas son capaces de utilizar los nitratos como aceptor final de electrones en ausencia de O.D. Los nitratos se reducen liberando nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) (desnitrificadores). El proceso seguido corresponde a una respiración aerobia. La energía que se obtiene utilizando nitrato como aceptor de hidrógeno es únicamente 10% inferior a la que se obtendría utilizando el oxígeno (Schlegel, 1988)

El decremento de  $\text{N-NO}_3$  en la fase aerobia se debe, posiblemente, a procesos de asimilación autótrofa con bajos requerimientos de nitrógeno.

#### 6.1.4.1 pH

Los valores más bajos de pH se observan durante los primeros 30 días. Los ciclos iniciaron entre 6.3 y 6.8 de pH, el cual disminuyó durante la fase anaerobia a niveles entre 5.4 y 5.9 y aumentó entre 6.2 y 7.0 en la fase subsiguiente. El resto del tiempo, el pH no desciende por abajo de 6.5 y el ciclo finaliza con pH ligeramente inferiores a 8. Barnes y Bliss (1983) indican que el pH óptimo para el crecimiento de *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* varía entre 7.5 y 8.5. Christensen y Harremoës (1978) señalan que este valor fluctúa entre 8 y 9. Ramírez (1988) considera que ambos organismos pueden desarrollarse en el intervalo de 5.7 a 10.2. De acuerdo con estos autores, el pH observado durante la primera corrida fue óptimo en algunos ciclos, favorable la mayoría del tiempo y desfavorable durante los primeros 30 días.

#### 6.1.4.2 Oxígeno disuelto

La presencia de oxígeno disuelto es esencial para el crecimiento de *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. La influencia de la concentración de oxígeno ha sido descrita en términos de la ecuación de Monod. De acuerdo con dicha ecuación, Barnes y Bliss (1983) mencionan que la nitrificación no ocurre a valores inferiores a 0.2  $\text{mgO}_2/\text{l}$ . Christensen y Harremoës (1978) indican que la eficiencia de nitrificación aumenta notablemente entre 3 y 4  $\text{mgO}_2/\text{l}$  mejorando muy poco entre 5 y 6  $\text{mgO}_2/\text{l}$ .

La concentración de oxígeno aumenta inmediatamente que inicia la aeración hasta alcanzar un valor superior a 3  $\text{mgO}_2/\text{l}$  (figura 6.4), el cual se incrementa

ligera y gradualmente hasta finalizar el tratamiento. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la difusión de oxígeno al interior de la célula es desigual disminuyendo gradualmente del exterior al interior y agotándose por completo en la zona más profunda en contacto con el medio de soporte (ver figura 2.4). La nitrificación se lleva a cabo en la zona aerobia de la biopelícula. En dicha zona, además del crecimiento de bacterias autótrofas nitrificantes, se desarrollan bacterias heterótrofas con tasas de crecimiento comparativamente más rápidas

Una alta concentración de sustratos orgánicos favorece el crecimiento de organismos heterótrofos, los cuales oxidan dichos sustratos, consumiendo O.D. Este comportamiento impidió el establecimiento de microorganismos nitrificantes. Christensen y Harremoës (1978) mencionan que un 90% de nitrificación se obtiene cuando la concentración DBO fluctúa entre 5-15 mg/l. En este estudio, se observa que en ningún muestreo, la fase aerobia inició con menos de 30 mg/l de COT. (curva final de fase anaerobia de la figura 6.1).

#### 6.1.4.3 Temperatura

En la literatura se considera un amplio intervalo para el crecimiento de bacterias nitrificantes. Noruzian (1983) reporta un valor mínimo de 5°C y máximo de 35°C, con un óptimo cercano a 20°C. Otros autores como Barnes y Bliss (1983) mencionan que la velocidad de nitrificación aumenta muy poco en el intervalo de 5 a 30°C, Christensen y Harremoës (1978) mencionan que la variación de temperatura en el intervalo de 15 a 30°C tiene poco efecto sobre la nitrificación. En la figura 6.5 se observa que, durante el periodo de aeración, la temperatura varió entre 18 y 23°C. De acuerdo con Noruzian y Christensen y Haremoës, dicho intervalo de temperaturas favorece el desarrollo de bacterias nitrificantes.

#### 6.1.4.4 Duración de la fracción anaerobia/aerobia

Las características de operación del proceso A/O con biopelícula no deben impedir el crecimiento y establecimiento de microorganismos nitrificantes. Sin embargo, en ninguna muestra de la primera corrida, se observó nitrificación, aun cuando el pH, O.D. y T se mantuvieron en intervalos que favorecen su crecimiento y la disponibilidad de sustratos orgánicos para organismos no nitrificantes, fue muy limitada debido a la baja concentración con que inició la fase aerobia. Por lo tanto, el principal factor que pudo afectar a la población nitrificante fue el tiempo de aeración.

## 6.2 Modificación de la duración de los ciclos y de la proporción anaerobia/aerobia.

De la diversidad de poblaciones que se desarrollan en el proceso para remoción biológica de fósforo, la presencia de organismos poly-P es la más importante y su proporción en la biomasa debe ser suficiente para que se lleve a cabo de forma eficiente la eliminación de contaminantes. Cuando las condiciones no son adecuadas, el proceso puede fallar porque organismos no poly-P compiten y desplazan a los poly-P. Esto puede ocurrir considerando que los organismos poly-P son aerobios estrictos y por lo tanto solo se reproducen durante la fase aerobia, esta es una desventaja con respecto a organismos facultativos, los cuales pueden reproducirse durante las fases aerobia y anaerobia del proceso. Tomando esto en cuenta se hicieron experimentos variando la duración del ciclo y del tiempo de reacción anaerobio/aerobio, provocando desplazamientos poblacionales que influyendo en la capacidad de remoción del sistema. El análisis de los desplazamientos y la eficiencia de eliminación del proceso se presentan a continuación.

### 6.2.1 Eliminación de nutrientes durante la experimentación con ciclos de 12 h y 4 diferentes fases anaerobias.

Durante las corridas 2 a 5 la duración del ciclo fue de 12 h. Una vez que aumentó la duración del ciclo de 8 a 12 h, se presentó el comportamiento típico de RBF. Esto demuestra que la proporción de organismos poly-P en la biopelícula, se incrementó notablemente y que lograron establecerse y desplazaron a organismos no poly-P. Aumentar la duración del ciclo permitió mantener las concentraciones de DQOt y DQOs en valores similares a los que se presentan en un agua de tipo municipal (270 y 150 mg/l, respectivamente), así como disminuir la carga orgánica a menos de 5 gDQOs/m<sup>2</sup>d.

En la figura 6.7 se presenta el comportamiento de eliminación de nutrientes, DQOt, DQOs, COT y P-PO<sub>4</sub>, así como la carga orgánica aplicada durante los experimentos con ciclos de 12 h. Los valores de las secciones (a), (b), (c) y (d) corresponden a las corridas con 65, 50, 35 y 80% de fase anaerobia, respectivamente.

La diferencia entre las curvas anaerobia-aerobia de DQOt, DQOs y COT es mayor en los experimentos (b) y (c) que en (a) y (d), lo cual muestra que cuando el tiempo de reacción aerobio ocupa 50% o más del ciclo, la actividad de otros organismos aerobios diferentes a las bacterias poly-P contribuye de manera importante a la eliminación de sustratos orgánicos del agua.

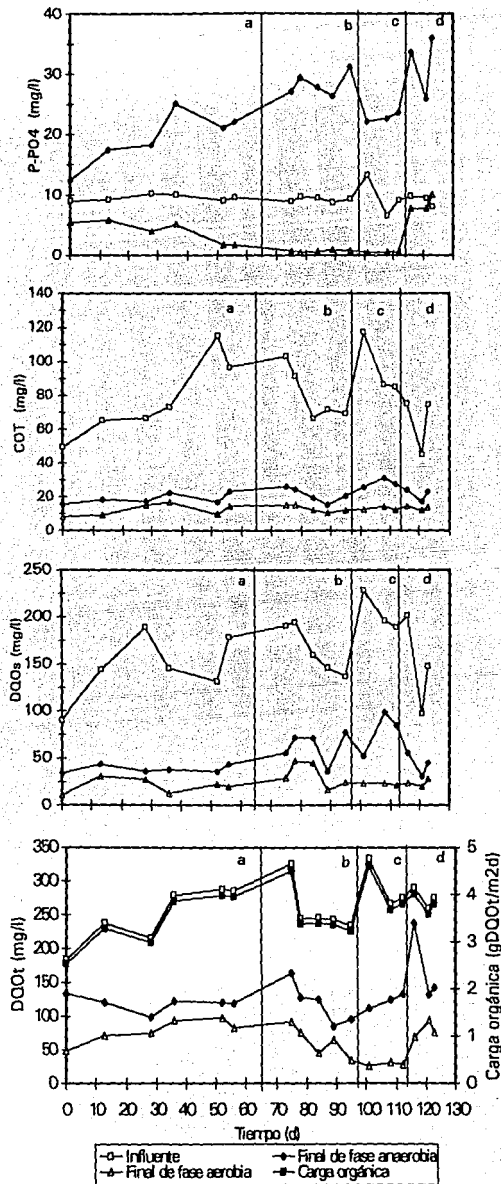


Figura 6.7 Perfil de eliminación de contaminantes, y carga orgánica aplicada durante el transcurso de la experimentación con ciclos de 12 h.



Asimismo, en los experimentos (b) y (c) la concentración de COT fue notablemente inferior a la DQOt y DQOs. Ello muestra que, bajo estas condiciones, las bacterias poly-P adquieren grandes ventajas sobre otros organismos para capturar los sustratos más fácilmente biodegradables. Durante la aeración, otros organismos presentes en el reactor hidrolizan y posteriormente metabolizan otros sustratos que requieren una degradación más compleja, lo cual contribuye a eliminar gran parte de la DQOt y permite la coexistencia de las poblaciones involucradas, sin afectar la eficiencia del proceso.

En la figura 6.7, se observa que, la liberación de fósforo tiende a aumentar conforme transcurre el tiempo de experimentación, independientemente de la duración de la fase anaerobia.

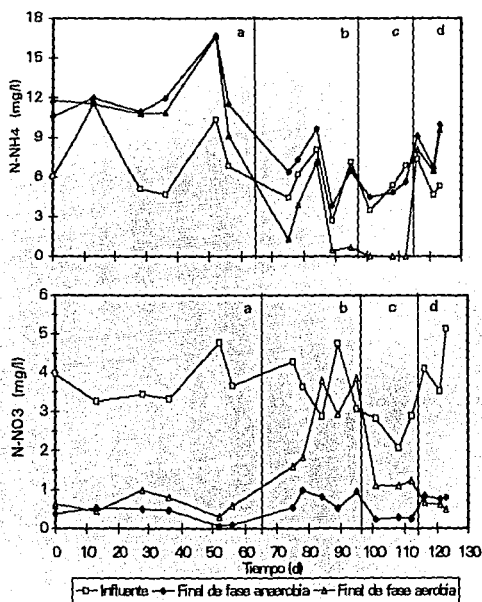


Figura 6.8 Comportamiento de  $N-NH_4$  y  $N-NO_3$  durante el transcurso de la experimentación con ciclos de 12 h.

Estos resultados no coinciden con lo reportado en la literatura, donde un aumento de excreción está asociado al aumento de fase anaerobia (Okada *et al*, 1987; González y Wilderer, 1991 y Stensel y Barnard 1992). La captura de ortofosfatos fue más eficiente en las pruebas con mayor tiempo de aeración, sección (b) y (c) y disminuyó drásticamente en las corridas con menor tiempo

de aeración, sección (d) de la gráfica. De acuerdo con estos resultados, si la fase anaerobia es muy prolongada disminuye la eficiencia de captura de fósforo.

En la figura 6.8 se presenta el comportamiento de eliminación de  $N-NH_4$  y de  $N-NO_3$  durante los experimentos con ciclos de 12 h. En las corridas con menor fase anaerobia, secciones (b) y (c), se observa, una disminución de amoníaco que coincide con un aumento de nitratos, lo cual indica que en estas corridas ocurrió nitrificación. Este comportamiento no se presentó en las corridas con 65 y 80% de fase anaerobia, secciones (a) y (d), respectivamente.

Con base en los resultados anteriores se puede afirmar que el tiempo de aeración es el factor que limita el crecimiento de las bacterias nitrificantes en la biopelícula. Este crecimiento también depende de otras condiciones del medio tales como pH, O.D. y T. Estos parámetros se mantuvieron en intervalos favorables para el desarrollo de la biomasa nitrificante. Sin embargo, se observó nitrificación sólo en dos de las cuatro fases anaerobias que se probaron, las cuales tuvieron 50 y 65% de tiempo de aeración

### ***6.2.2 Eliminación de nutrientes en cada ciclo de tratamiento.***

En esta parte de la investigación se analiza el comportamiento de eliminación de nutrientes, desde que inicia hasta que finaliza un ciclo de tratamiento. Se analizan cada una de las 4 fases anaerobias que se probaron. Del conjunto de los muestreos realizados, se eligió aquel que presentó la concentración más alta de ortofosfatos, al final de la fase anaerobia. Esto se hizo considerando que la excreción de fósforo está fuertemente relacionada con la eficiencia del sistema y además indica una actividad metabólica clímax de la población poly-P.

#### **6.2.2.1 Fase anaerobia de 7.8 h (65%).**

La figura 6.9 muestra el comportamiento de degradación de nutrientes en un ciclo de 12 h con 65% de fase anaerobia. Durante esta fase la curva DQOt es mayor y se aleja notablemente de las curvas DQOs y COT. También se observa que dos horas antes de que finalice el tratamiento, la remoción de sustratos orgánicos permanece prácticamente sin cambio. Se observa excreción y remoción de fósforo aun cuando se presenta O.D. (2.1 mg/l) y nitratos (4.8 mg/l).

Por otra parte la concentración de  $N-NH_4$  aumenta durante la fase anaerobia y disminuye ligeramente durante la aeración, mientras que los valores  $N-NO_3$  disminuyen constantemente desde el inicio hasta el final del ciclo. Estos resultados muestran que no se llevó a cabo el proceso de nitrificación. El

aumento de amoníaco durante el periodo anaerobio se debe a procesos de amonificación, a hidrólisis de compuestos nitrogenados o desaminación de compuestos orgánicos nitrogenados. La disminución durante la aeración puede deberse a procesos de asimilación microbiana.

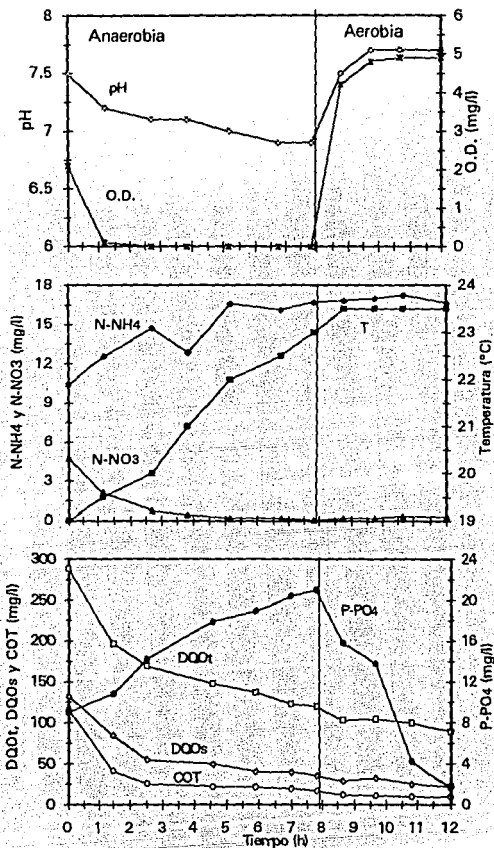


Figura 6.9 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 12 horas y 65% de fase anaerobia.

### 6.2.2.2 Fase anaerobia de 6.0 h (50%).

En la figura 6.10 se presenta el comportamiento de la degradación de nutrientes durante un ciclo de 12 horas y 50% de fase anaerobia. Bajo estas condiciones de operación, la DQOt y la DQOs difieren significativamente de

los valores de COT y disminuyen drásticamente durante las dos primeras horas de aeración. El resto del tiempo del tratamiento no se observaron incrementos considerables en la remoción de los sustratos mencionados.

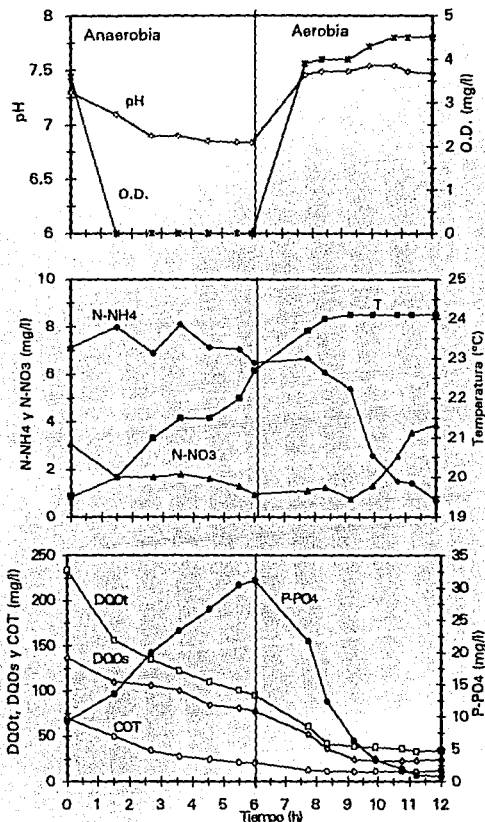


Figura 6.10 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 12 horas y 50% de fase anaerobia.

Los valores de la curva de P-PO<sub>4</sub> indica que la liberación y posterior captura de fósforo fue más rápida y eficiente en la prueba con 50% de periodo anaerobio, comparada con la del experimento con 65% .

Los valores de N-NH<sub>4</sub> y N-NO<sub>3</sub> de la figura 6.10 indican la presencia de bacterias nitrificantes en el sistema: la concentración de N-NH<sub>4</sub> casi no varia

durante la fase anaerobia y disminuye significativamente durante la aerobia, lo cual coincide con un aumento de nitratos.

### 6.2.2.3 Fase anaerobia de 4.2 h (35%)

El comportamiento que se presenta durante la degradación de sustratos orgánicos es similar entre las figuras 6.10 y 6.11. Una gran eliminación de COT durante la fase anaerobia y menor diferencia entre los valores DQOt, DQOs y COT dos horas después del inicio de la aeración. Asimismo, la eliminación de los parámetros mencionados prácticamente no varían cinco horas antes de que finalice el tratamiento.

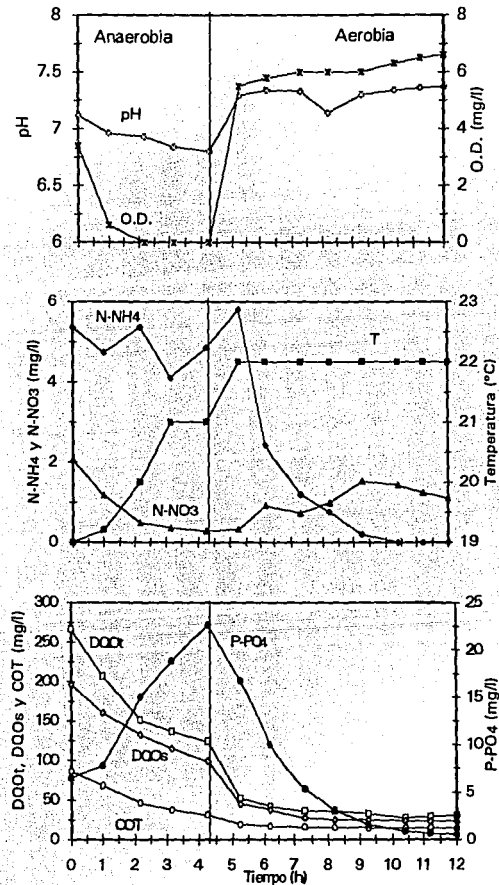


Figura 6.11 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 12 horas y 35% de fase anaerobia.

## a ) Nitrificación y desnitrificación simultáneas

Analizando la curva de  $N-NH_4$ , se observa que ésta disminuye hasta 0 mg/l después de 6.15 h de aeración. En este punto se observa un valor máximo de nitratos de 1.52 mg/l. Durante el resto del ciclo, los nitratos disminuyen, lo cual se debe a fenómenos de difusión y desnitrificación que se explican a continuación.

El oxígeno y los nutrientes penetran en forma desigual en la biopelícula. Esto genera el desarrollo de diferentes especies microbianas con diferentes procesos metabólicos. Los organismos heterótrofos aerobios se encuentran en la parte externa de la biopelícula, en contacto con el agua. Hacia el interior se desarrollan organismos autótrofos nitrificantes y, en el fondo (en contacto con el medio de soporte) se establecen bacterias fermentativas. El medio de soporte del reactor está constituido por una serie de anillos pall, el acomodo de los anillos, permite el contacto de unos con otros de forma sucesiva. Esta disposición origina una gran cantidad de espacios en los que la difusión de oxígeno es limitada.

El nitrógeno amoniacal se difunde al interior de la biopelícula donde es reducido a nitratos por las bacterias nitrificantes. En el agua disminuye el amoníaco y aumentan los nitratos. Una vez que se ha agotado el amoníaco, se origina un gradiente de concentración de nitratos entre la zona aerobia y anaerobia de la biopelícula. Por difusión, los nitratos penetran al fondo de la biopelícula, donde se lleva a cabo el proceso de desnitrificación. El nitrógeno molecular que se produce se difunde hacia afuera. Este comportamiento explica la disminución de nitratos observada a partir de 6.15 h de aeración y hasta finalizar el ciclo.

### 6.2.2.4 Fase anaerobia de 9.6 h (80%)

El comportamiento de la eliminación de nutrientes es similar entre las figuras 6.9 y 6.12. Durante la fase anaerobia, los valores DQOt fueron muy diferentes, comparados con la DQOs y COT. Esta diferencia disminuye notablemente durante la aeración.

Los valores de liberación de fósforo de la figura 6.12, muestran que la rapidez de excreción es menor comparada con las figuras 6.10 y 6.11. Sin embargo, la cantidad liberada fue mayor que en todos los experimentos anteriores. Aunque los microorganismos capturan una gran cantidad del fósforo excretado (26 de 36 mg/l), no se obtuvo una concentración inferior en el efluente respecto del influente. Esto se puede explicar considerando que el tiempo de aeración fue insuficiente para que las bacterias poly-P pudieran capturar una concentración mayor a la liberada en la fase anterior. Las concentraciones de DQOt, DQOs y COT prácticamente no variaron después

de 6.25 h de iniciada la fase anaerobia y al mismo tiempo continúa la liberación de fósforo. Esto provoca que la energía almacenada en forma de PHB sea insuficiente para capturar al menos la misma cantidad de fósforo liberado.

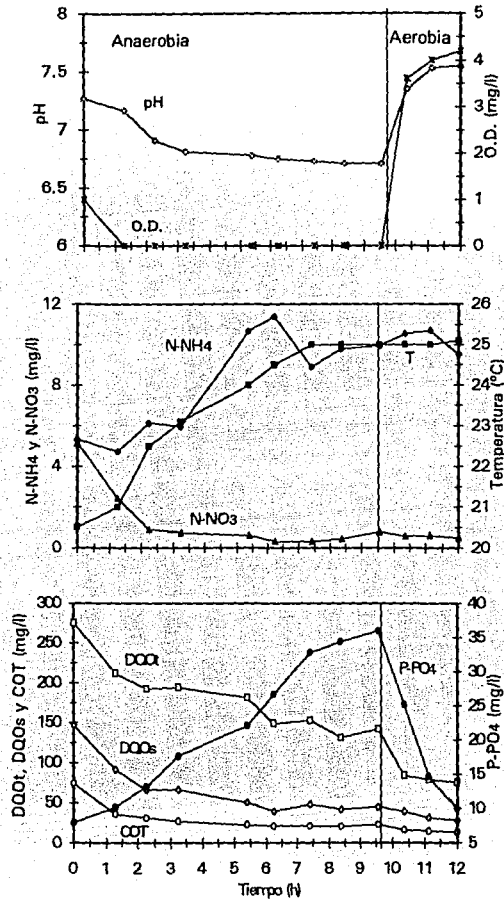


Figura 6.12 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 12 horas y 80% de fase anaerobia.

En lo que respecta al comportamiento de N-NH<sub>4</sub> y de N-NO<sub>3</sub>, se observa que el primero aumenta durante la fase anaerobia y disminuye ligeramente durante la aerobia, mientras que los nitratos disminuyen constantemente desde el inicio del ciclo. Este comportamiento fue similar al de la figura 6.9 e indica

que la población nitrificante no soportó una anaerobiosis prolongada y en consecuencia un tiempo de reproducción aerobia muy corto. Por lo tanto, los organismos nitrificantes que se establecieron durante el experimento anterior, fueron desplazados y eliminados de la biopelícula.

El comportamiento de excreción y captura de  $P-PO_4$  durante cada ciclo y cada uno de los 4 tiempos de reacción anaerobio/aerobio que se probaron, se presenta en la figura 6.13. Una comparación entre las pendientes de las curvas de excreción muestra que éstas son mayores con menor fase anaerobia. Las pendientes de captura aumentan proporcionalmente con el incremento de la fase anaerobia. Estos resultados indican que la rapidez de las reacciones anaerobias/aerobias están fuertemente afectadas por la proporción de tiempo anaerobio.

#### 6.2.2.5 Eficiencia de remoción de sustratos orgánicos y de fósforo.

En la tabla 6.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los 4 periodos anaerobios que se probaron. En todos los experimentos la eliminación de DQOs y de COT fue superior al 80%. La DQOt tuvo la misma eficiencia excepto en las corridas con mayor tiempo anaerobio, donde disminuyó a 70%. Esto se debe a que otros microorganismos aerobios diferentes a las bacterias poly-P no tuvieron tiempo suficiente para hidrolizar y metabolizar sustratos de difícil degradación. En consecuencia, su proporción, en la biopelícula, fue inferior respecto del resto de la experimentación con ciclos de 12 h.

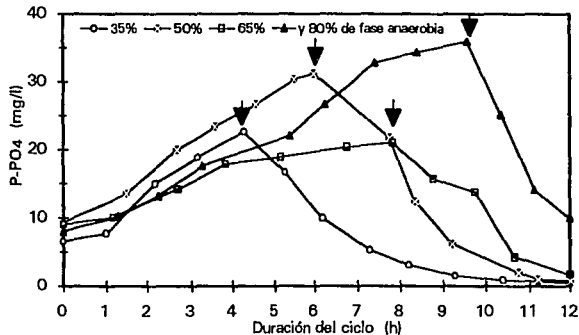


Figura 6.13 Influencia de la duración de la fase anaerobia sobre la liberación y captura de ortofosfatos. El comportamiento durante la fase aerobia del proceso, corresponde al lado izquierdo y derecho de la flecha, respectivamente.

La calidad del efluente entre los 4 tiempos de reacción anaerobio/aerobio muestra que la concentración de DQOt fue siempre la más alta, seguida de la de DQOs, en tanto que el COT presentó las concentraciones más bajas en la



salida. Los valores de DQOt fueron mayores en las corridas con mayor tiempo anaerobio (65 y 80%) con más de 80 mg/l en el efluente. Esta concentración disminuyó a menos de 35 mg/l en las corridas restantes. Los valores de DQOs fueron aproximadamente iguales en todos los experimentos (con efluentes entre 22 y 28 mg/l). La concentración de COT fue siempre inferior a 15 mg/l.

En cuanto a la eliminación de P-PO<sub>4</sub>, se observa que, en las corridas con 35, 50 y 65% de fase anaerobia, la concentración efluente fue inferior a 2 mg/l; Con 80% de fase anaerobia no se obtuvo una buena calidad, teniendo una concentración de 10 mg/l en el efluente. En las 4 corridas, la excreción fue superior a 100% y aumentó hasta 350% en la corrida con mayor fase anaerobia.

TABLA 6.1 RESUMEN DE LOS RESULTADOS ENTRE LAS DIFERENTES FASES ANAEROBIAS CON CICLOS DE 12 HORAS.

| Fase anaerobia (%) | C.O. (gDQO t/m2d) | Concentración efluente (mg/l) |      |      |                   |                   |                   | Remoción (%) |      |      |                   | Excreción (%) |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|------|------|-------------------|---------------|
|                    |                   | DQOt                          | DQOs | COT  | P-PO <sub>4</sub> | N-NH <sub>4</sub> | N-NO <sub>2</sub> | DQOt         | DQOs | COT  | P-PO <sub>4</sub> |               |
| 65                 | 3.98              | 97.2                          | 22.2 | 9.8  | 1.7               | 16.65             | 0.3               | 70.1         | 83.1 | 92.6 | 81.1              | 133.3         |
| 50                 | 3.23              | 34.2                          | 24   | 12.3 | 0.77              | 0.68              | 3.86              | 78.5         | 88.5 | 82.6 | 91.7              | 235.4         |
| 35                 | 3.68              | 30.6                          | 23.4 | 14.3 | 0.52              | 0                 | 1.1               | 88.5         | 88   | 83.3 | 92                | 245.6         |
| 80                 | 3.81              | 75.6                          | 28   | 13.8 | 10                | 9.53              | 0.49              | 72.5         | 81   | 81.6 | 0                 | 350           |

La eliminación fue excelente en las corridas con 35, 50 y 65% de fase anaerobia y nula con 80%. Considerando el orden de experimentación; (65, 50, 35 y 80% de fase anaerobia) y analizando la tabla 6.1 se puede observar que la excreción aumentó respecto del tiempo de experimentación y no respecto del tiempo de reacción anaerobio. Esto puede explicarse porque, la población no tuvo un crecimiento estable o a una condición inmadura de la población responsable de la acumulación de fósforo.

#### 6.2.2.6 Características generales de la biomasa.

Los estudios de la población de protozoarios y metazoarios se realizaron en las pruebas con 35 y 80% de fase anaerobia. Estos estudios se refieren a observaciones de campo y de laboratorio. En el primer caso se hizo una descripción visual de la biopelícula y en el segundo se utilizaron diferentes claves de identificación (ver sección 5.6) y un microscopio óptico para conocer las especies que se desarrollaron en la biomasa. Los resultados que se obtuvieron se presentan a continuación:

En el ciclo de 12 horas con 35% de fase anaerobia se observó una biopelícula formada por una matriz predominantemente floculenta, no filamentososa, de

color café ocre con gris claro, con un espesor medio y predominio de protozoarios ciliados. A continuación se presentan los organismos que fueron identificados.

Tipo de organismo

Protozoarios

Phylum Protozoa

Clase Ciliata

*Colpidium sp.*

*Chilodonella sp.*

*Eupotles sp.*

*Hemiophrys sp.*

*Litonotus sp.*

*Paramecium sp*

*Spirostomun sp.*

*Stichotrichina sp.*

*Trachelophylum sp.*

*Vorticella sp.*

*Zoothamnium sp.*

Clase Fitomastigophorea

*Euglena sp.*

Clase Zoomastigophorea

*Clamydomonas sp.*

Clase Rhizopodea

*Amoeba sp.*

Metazoarios

Phylum Asquelminta

Clase Rotifera

*Philodina roseola*

Clase Nematoda

*Monhystera sp.*

Phylum Anélida

Clase Anélida

*Lumbricillus lineatus*

*Tubifex tubifex*

Se observó un cambio drástico en las características de la biopelícula cuando la fase anaerobia aumentó de 35 a 80%. Su color cambió de café y gris claro a negro y gris oscuro. El espesor disminuyó notablemente. También se observó mayor desprendimiento y menor cantidad de protozoarios ciliados. A continuación se presentan los organismos que se identificaron bajo estas condiciones de operación:

### Tipo de organismo

#### Protozoarios

Clase Rhizopodea

*Amoeba sp.*

#### Phylum Asquelminta

Clase Rotifera

*Philodina roseola*

Clase Nematoda

*Monhystera sp.*

#### Phylum Anélida

*Lumbricillus lineatus*

*Tubifex tubifex*

### **6.2.3 Eliminación de nutrientes durante la experimentación con ciclos de 8 h y 3 diferentes fases anaerobias .**

Los experimentos con ciclos de 8 h, se volvieron a realizar tomando en cuenta que durante el arranque y la primera corrida, no se obtuvo el comportamiento típico de RBF. Esto se hizo con dos fines principales: a) comprobar si el tiempo de retención hidráulico de 8 h es insuficiente para alcanzar una óptima remoción de sustratos orgánicos y de fósforo y b) comprobar si de acuerdo con los resultados de las corridas con 12 h, la excreción de fósforo aumenta con el tiempo o bien aumenta con el incremento de la duración de la fase anaerobia. Para ello, los experimentos se hicieron en orden descendente. Primero 65, después 50 y finalmente 35% de fase anaerobia (corridas 6, 7 y 8 de la tabla 5.2, respectivamente.)

En la figura 6.14 se presenta el comportamiento de eliminación de nutrientes, durante las corridas con ciclos de 8 h. Los valores (a), (b) y (c) corresponden a los experimentos con 65, 50 y 35% de fase anaerobia, respectivamente.

Analizando la figura 6.14, se observa que el comportamiento de eliminación de sustratos orgánicos fue muy similar entre la DQOt, DQOs y COT y entre los diferentes tiempos de reacción anaerobio/aerobio. La diferencia más notable se refiere a una mayor cantidad de DQOt eliminada durante la fase aerobia en las corridas donde la proporción de dicha fase fue mayor (sección c).

Comparando las figuras, 6.7 y 6.14, se observa que a diferencia de las corridas con 12 h, la captura de fósforo fue casi la misma con ciclos de 8 h, independientemente del tiempo de reacción anaerobio/aerobio.

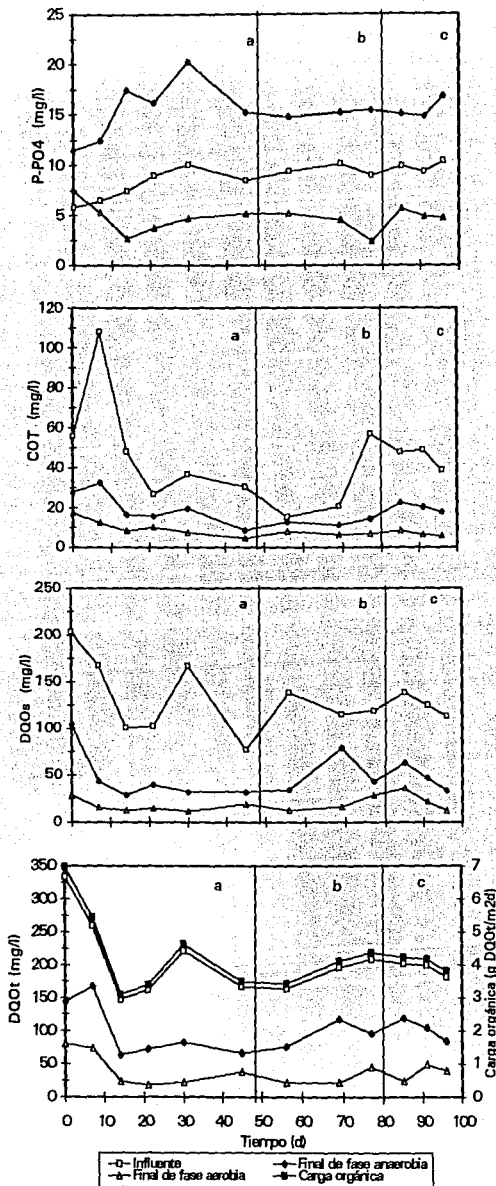


Figura 6.14 Perfil de eliminación de contaminantes y carga orgánica aplicada durante el transcurso de la experimentación con ciclos de 8 h.

El comportamiento de  $N-NH_4$  y  $N-NO_3$ , se muestra en la figura 6.15. Los resultados obtenidos de ambos parámetros muestran que la población nitrificante se pierde con el tiempo en las corridas con 65% de fase anaerobia, debido a que la concentración aerobia de  $N-NH_4$  se incrementa gradualmente, mientras que la de  $N-NO_3$  disminuye. La población se recuperó una vez que disminuyó la fracción anaerobia a 50 y 35%. En ambos experimentos la concentración de  $N-NH_4$  decrece y simultáneamente aumenta la concentración  $N-NO_3$ .

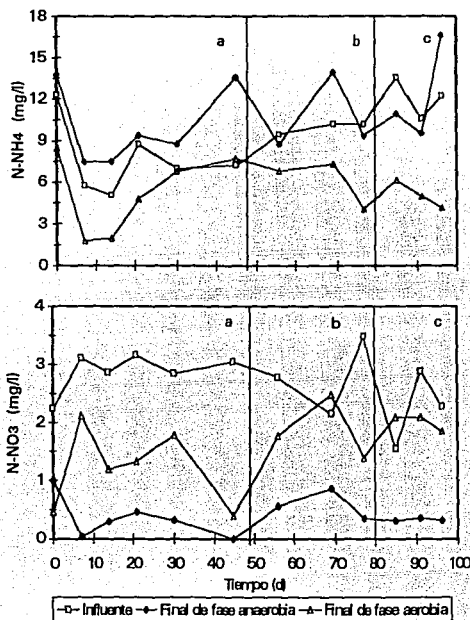


Figura 6.15 Comportamiento de  $N-NH_4$  y  $N-NO_3$  durante el transcurso de la experimentación con ciclos de 8 h.

## 6.2.4 Eliminación de nutrientes en cada ciclo de tratamiento.

### 6.2.4.1 Fase anaerobia de 5.2 h (65%).

Analizando la figura 6.16 se observa que una gran cantidad de sustratos orgánicos (DQOt, DQOs, y COT) fueron eliminados durante la primera hora del tratamiento, lo cual ocurrió bajo condiciones anóxicas con 4.1 mg/l de O.D. y 3.0 mg/l de  $N-NO_3$ . Simultáneamente, y a diferencia de los experimentos con 12 h, se observa disminución de  $P-PO_4$ .

La concentración de O.D. fue suficiente para inducir metabolismo aerobio. Sin embargo, las reacciones de fosforilación oxidativa están limitadas por la disminución gradual de O.D. El consumo de fosfatos durante la primera hora aerobia es mucho menor comparado con la primera hora anaerobia (0.82 contra 2.86 mg/l). Asimismo, a diferencia de la experimentación inmediata anterior, las bacterias poly-P capturaron más fósforo del que liberaron. La excreción inició cuando el oxígeno prácticamente se elimina agotado del agua (0.2 mg/l) y en presencia de 1.5 mg/l de  $N-NO_3$

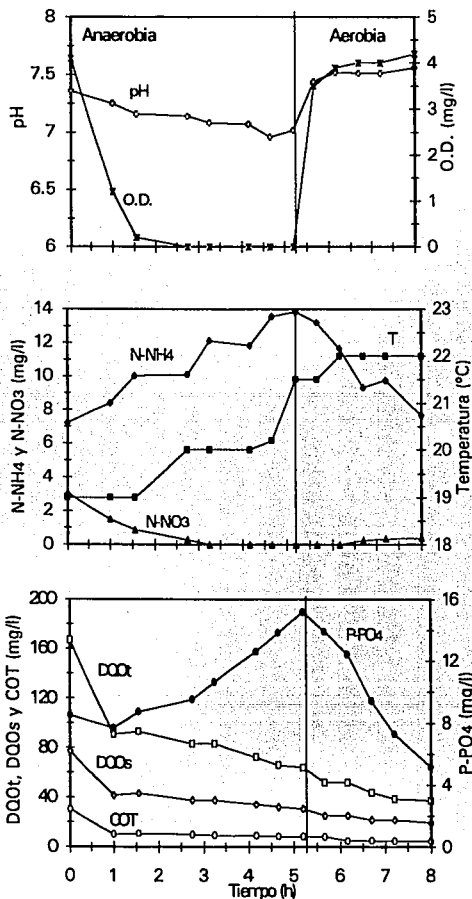


Figura 6.16 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 8 horas y 65% de fase anaerobia.

En lo que se refiere a las reacciones de nitrificación, se observa que la concentración de  $\text{N-NH}_4$  disminuye casi a la mitad (de 14 a 7 mg/l) durante la aeración y la concentración  $\text{N-NO}_3$  aumenta ligeramente (de 0 a 0.4 mg/l). Este comportamiento indica la actividad bioquímica de bacterias nitrificantes. Sin embargo, su presencia fue insuficiente para llevar a cabo una óptima eliminación de amoníaco.

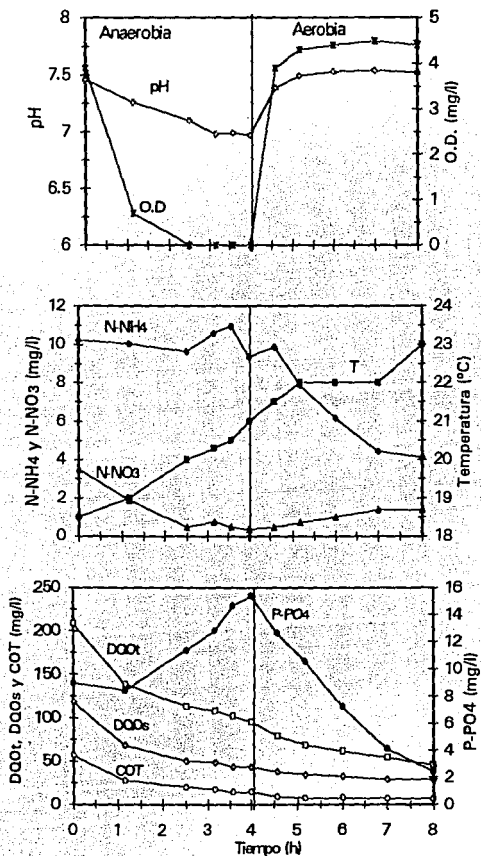


Figura 6.17 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 8 horas y 50% de fase anaerobia.

### 6.2.4.2 Fase anaerobia de 4.0 h (50%).

En la figura 6.17 se observa que el comportamiento de eliminación de sustratos carbonosos y de fosfatos es similar al descrito en la sección inmediata anterior. Las diferencias más notables se refieren a una mayor cantidad de  $P-PO_4$  eliminado y a que la DQOs y el COT permanecen prácticamente sin cambios tres horas antes de que finalice el tratamiento.

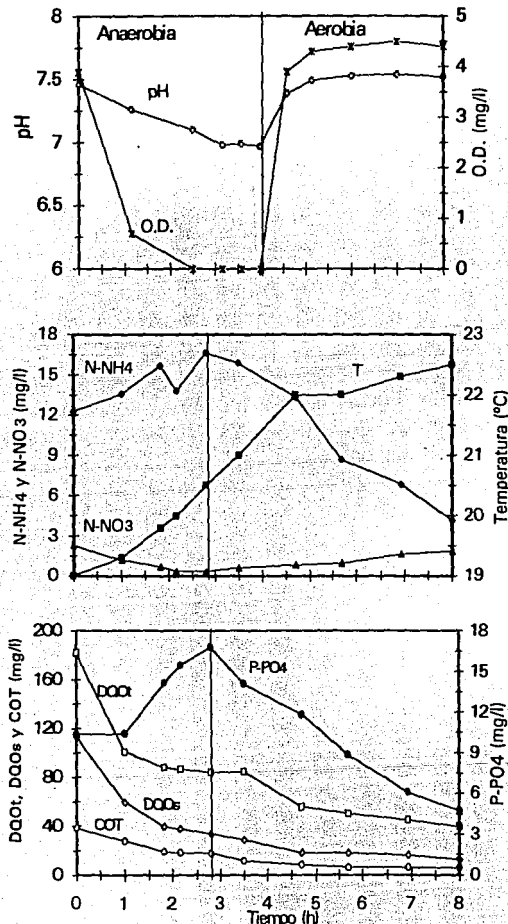


Figura 6.18 Variación de los parámetros del proceso durante un ciclo de 8 horas y 35% de fase anaerobia.



Por otra parte, el  $N-NH_4$  disminuye drásticamente, de 10 a 4 mg/l, y corresponde con un aumento de  $N-NO_3$ . Estas condiciones de operación fueron favorables para el desarrollo de bacterias nitrificantes.

#### 6.2.4.3 Fase anaerobia 2.8 h (35%).

En este experimento se observó el mismo comportamiento de eliminación de sustratos carbonosos y de fósforo que en los dos anteriores y se muestra en la figura 6.18

La eliminación de  $N-NH_4$  fue más eficiente, disminuyendo de 17 a 3 mg/l, lo cual coincide con un aumento de  $N-NO_3$ , de 0.32 a 1.85 mg/l.

La figura 6.19 muestra el perfil de liberación y captura de  $P-PO_4$  en cada ciclo y entre las tres diferentes fases anaerobias que se probaron. Las pendientes anaerobias aumentaron conforme disminuyó el tiempo de reacción anaerobio y las pendientes de captura aumentaron conforme aumentó el tiempo anaerobio, o bien, conforme disminuyó el tiempo de aeración, este comportamiento fue similar al que se presentó en los ciclos con 12 h (figura 6.13).

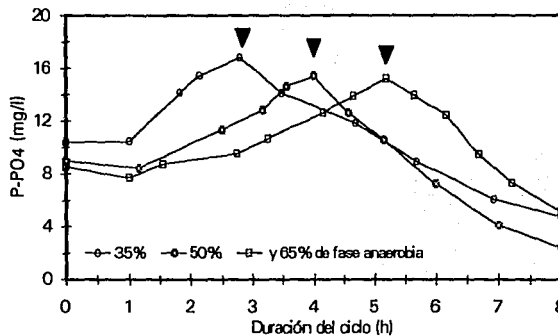


Figura 6.19 Influencia de la duración de la fase anaerobia sobre la excreción y captura de ortofosfatos. El comportamiento durante la fase anaerobia y aerobia del proceso, corresponde al lado izquierdo y derecho de la flecha, respectivamente.

#### 6.2.4.4 Eficiencia de remoción de sustratos orgánicos y de fósforo.

En la tabla 6.2 se hace una comparación de la eficiencia de eliminación de sustratos orgánicos entre los tres períodos anaerobios que se probaron. En todos los experimentos se remueve casi 80% de DQOt y DQOs y más del 85% de COT.

La calidad del efluente muestra que, en todos los experimentos, la concentración DQOt fue inferior a 45 mg/l, la DQOs fue inferior a 30 mg/l y menos de 7 mg/l de COT se presentó en el efluente. Comparando los resultados expresados en las tablas 6.1 y 6.2 se observa que la calidad del efluente como DQOt, fue mejor en las corridas con 8 que con 12 h. Los valores DQOs fueron similares entre las diferentes corridas y los de COT fueron siempre inferiores con ciclos de 8 h. La concentración P-PO<sub>4</sub> efluente fue siempre más alta con 8 que con 12 h. En ninguna corrida se obtuvo menos de 2 mg/l de P-PO<sub>4</sub>.

La capacidad de excreción y captura del sistema en las corridas con 8 h, se muestran en la figura 6.19. Es importante recordar que el orden de los experimentos se realizó de mayor a menor duración de fase anaerobia. Tomando esto en cuenta y analizando la figura 6.19 se observa que la excreción aumentó con el incremento de la duración de la fase anaerobia. Este comportamiento coincide con los trabajos de Okada *et al* (1987) González y Wilderer (1991) y Gonçalves y Rogalla (1992). Sin embargo, es importante señalar que esto ocurrió una vez que la población poly-P logró establecerse en la biopelícula. Estos resultados y los obtenidos en las corridas con ciclos de 12 h indican que la biomasa debe alcanzar una fase de madurez y crecimiento sostenido para que se presenten los comportamientos definidos en la literatura.

TABLA 6.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS ENTRE LAS DIFERENTES FASES ANAEROBIAS CON CICLOS DE 8 HORAS.

| Fase anaerobia (%) | C.O. (gDQO t/m2d) | Concentración efluente (mg/l) |      |      |                   |                   |                   |      | Remoción (%) |      |                   |      | Excreción (%) |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|------|--------------|------|-------------------|------|---------------|
|                    |                   | DQOt                          | DQOs | COT  | P-PO <sub>4</sub> | N-NH <sub>4</sub> | N-NO <sub>3</sub> | DQOt | DQOs         | COT  | P-PO <sub>4</sub> |      |               |
|                    |                   | 65                            | 3.49 | 37.3 | 19.2              | 4.7               | 5.2               | 7.68 | 0.4          | 78.7 | 75.2              | 85   |               |
| 50                 | 4.37              | 45                            | 28.8 | 6.9  | 2.4               | 4.11              | 1.38              | 78.4 | 75.8         | 88   | 72                | 73   |               |
| 35                 | 3.80              | 39.6                          | 12.6 | 5.8  | 4.8               | 4.18              | 1.85              | 78.2 | 88.9         | 85   | 62                | 54.3 |               |

#### 6.2.4.5 Características generales de la biomasa y contenido de fósforo en los lodos.

Después de tres semanas del cambio del experimento 5 al 6 (tabla 5.2). El color de la biopelícula varío de predominantemente negro a gris. Se observó un aumento en su espesor y un desarrollo notable de algas sobre las paredes superiores del reactor. durante la corrida 7, la biopelícula adquirió un color café claro con algunos manchones blancos sobre la superficie. La biopelícula presentó una consistencia grumosa en forma de agregados. El tamaño de los rotíferos fue más grande

respecto al experimento anterior. En la corrida 8, la biopelícula presentó un color más claro que en el anterior, de forma muy definida (sobre toda la superficie). Biopelícula muy uniforme y más delgada que en el experimento anterior

En la figura 6.20 se hace una comparación del porcentaje de distribución entre los diferentes protozoarios y metazoarios identificados en el reactor y entre las tres etapas anaerobias que se probaron con ciclos de 8 horas. En el eje de las abscisas se presenta un código asignado a las especies observadas, que corresponde a lo siguiente:

| <u>Tipo de organismo</u> | <u>Código asignado</u> |
|--------------------------|------------------------|
| Protozoarios             |                        |
| Phylum Protozoa          |                        |
| Clase Ciliata            |                        |
| <i>Aspidisca sp.</i>     | .....1                 |
| <i>Litonotus sp.</i>     | .....2                 |
| <i>Paramecium sp.</i>    | .....3                 |
| <i>Spirotomon sp.</i>    | .....4                 |
| <i>Vorticella sp.</i>    | .....5                 |
| <i>Suctoría sp.</i>      | .....6                 |
| Metazoarios              |                        |
| Phylum Asquelminta       |                        |
| Clase Gastrotrichia      |                        |
| <i>Chaetonotus sp.</i>   | .....7                 |
| Clase Rotifera           |                        |
| <i>Philodina sp.</i>     | .....8                 |
| Clase Nematoda           |                        |
| <i>Monhystera sp.</i>    | .....9                 |
| Phylum Anélida           |                        |
| Clase Oligochaeta        |                        |
| <i>Dero sp.</i>          | .....10                |
| <i>Tubifex sp.</i>       | .....11                |

La figura 6.20 muestra una mayor diversidad de protozoarios ciliados en la comunidad, la cual se mantiene aun cuando se modifiquen los tiempos de reacción anaerobio/aerobio. Curds (1975) y Kinner y Curds (1988) han reportado el predominio de la clase Ciliata sobre otras clases de protozoarios, en sistemas con lodos activados, filtro rociador y biodiscos. Kudo (1969) considera que los factores ambientales que afectan el desarrollo de protozoarios de vida libre se refieren a pH, O.D. y T. Algunas especies de protozoarios pueden crecer en ambientes altamente ácidos o alcalinos, con intervalos de pH entre 3.5 y 9.0. Generalmente, el crecimiento óptimo se encuentra entre 6.5 y 8.0 de pH y un intervalo de temperatura entre 16-25°C.

Los valores que se obtuvieron de ambos parámetros se mantuvieron en intervalos favorables para el desarrollo de protozoarios.

El proceso de RBF requiere de una etapa anaerobia que puede afectar el crecimiento de protozoarios, ya que la inmensa mayoría de éstos son especies aerobias. Curds (1975) menciona que algunos ciliados son capaces de sobrevivir en ambientes con mínimas concentraciones de O.D. por un período de tiempo limitado, lo cual implica una reducción en su metabolismo.

Comparando el número total de protozoarios entre los tres experimentos se observa que una mayor cantidad de individuos (1312) se obtuvieron en los ciclos con mayor período anaerobio (65%). En las corridas donde la mitad del tiempo transcurre bajo condiciones anaerobias y la mitad aerobias (50%), se obtuvo el menor número de protozoarios (194). En los experimentos donde la proporción de fase aerobia es mayor (35% de etapa anaerobia) se obtuvieron 531 individuos. La abundancia de protozoarios de la corrida 5, puede deberse a que los individuos penetraron en un área no ocupada provocando un rápido crecimiento de la población. La disminución de protozoarios en el experimento siguiente (6) se debe al cambio en la fracción anaerobia/aerobia, el cual afectó la proporción de las poblaciones afectando a los protozoarios y favoreciendo a los metazoarios.

En los experimentos 7 y 9, *Aspidisca sp* y *Vorticella sp* representan casi el 50% del total de la población, respectivamente. En ninguno de los dos se observó *Spirostomum*. La abundancia de *Vorticella* se debe a que requiere menos gasto de energía para sobrevivir por su condición de organismo sésil, lo cual limita la necesidad de desplazamiento para conseguir su alimento. Estos individuos se encuentran preferentemente en la zona externa de la biopelícula. Con 50% de fase anaerobia, *Paramecium sp.* y *Suctorina sp* representan al género más y menos abundante, respectivamente. Estos resultados indican que el tiempo de aeración no tiene un efecto significativo en la abundancia de los protozoarios ciliados identificados. Sin embargo, afecta a los géneros en particular y es posible que algunas especies logren adaptarse mejor a una condición anaerobia/aerobia específica.

La ausencia de las clases Fitomastigophorea, Zoomastigophorea y Rhizopoda se puede explicar tomando en cuenta el tipo y cantidad de alimento disponible. El crecimiento de los miembros de la clase Fitomastigophorea está limitado debido a la ausencia de luz solar. Los anillos pall muestreados se encuentran 20 cm por abajo de la línea de agua, la cual está cubierta con una tapa de unicel. Los organismos de la clase Zoomastigophorea son preferentemente saprozoicos y debido a las características ambientales que se crean en el reactor, compiten en forma desventajosa con bacterias heterótrofas por los sustratos orgánicos.

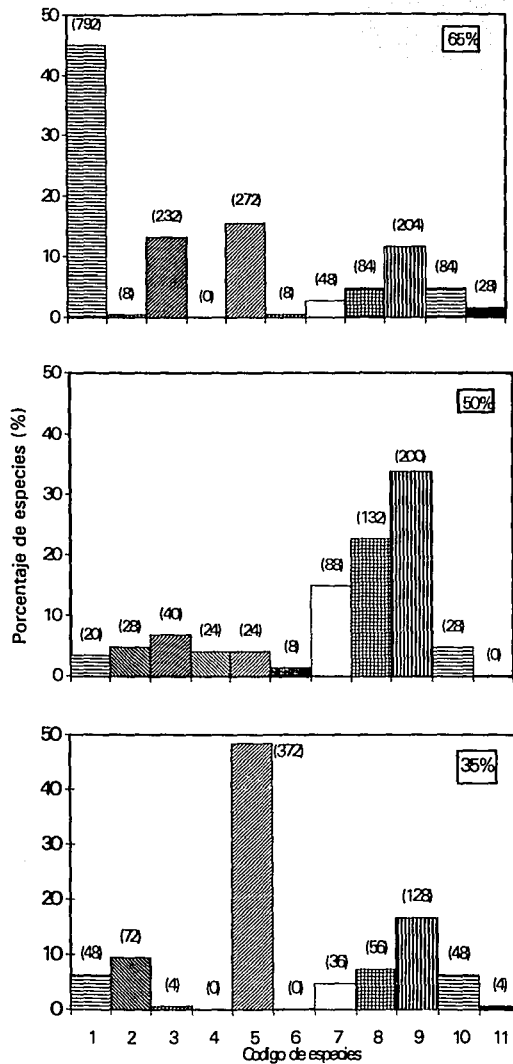


Figura 6.20 Porcentaje de distribución de especies de protozoarios y metazoarios identificados en el reactor. Los números entre paréntesis indican el número de especies representadas en cada género.

Curds (1975) señala que los rhizopodos se encuentran constantemente en menor proporción respecto de otros protozoarios en plantas con lodos activados y en biodiscos. Sin embargo, no explican el fenómeno. La mayoría de los rhizopodos se fijan y desplazan en un sustrato y se alimentan englobando material particulado. El desplazamiento y englobamiento provocan un mayor gasto de energía, lo cual genera una condición de desventaja respecto de otros organismos filtradores y libres nadadores.

El predominio de protozoarios ciliados se debe principalmente a su actividad depredadora. La fuente de alimento (bacterias) está disponible en cantidad suficiente y condiciones favorables (tiempo de aeración y concentración de oxígeno disuelto adecuadas). Los ciliados toman ventaja sobre otros protozoarios debido a que los cilios proveen de un mecanismo altamente eficiente para capturar material particulado.

La distribución de metazoarios en el reactor muestra un comportamiento similar entre las tres fases anaerobias que se probaron. La abundancia de menor a mayor número de individuos por género es: *Tubifex*, *Chaetonotus*, *Dero*, *Philodina* y *Monhystra*. Shiemer (1975) menciona que los nemátodos constituyen frecuentemente la especie más abundante de los metazoarios en aguas residuales de tipo doméstico.

El mayor número de metazoarios se obtuvo con 50% de fase anaerobia. Este hecho coincide con el menor número de protozoarios observado en los tres experimentos, lo cual indica una intensa actividad depredadora de metazoarios sobre protozoarios

En los experimentos 6-8 se examinó el contenido de fósforo de la biomasa. Esto se hizo tomando en cuenta que el contenido de SST del efluente es equivalente a la cantidad de biomasa que se genera durante un ciclo y contiene el P-PO<sub>4</sub> removido del agua. La metodología utilizada se ha descrito en la sección 5.7. En la tabla 6.3 se presentan las características de los lodos.

TABLA 6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS CON CICLOS DE 8 HORAS.

| Determinación en: Parámetros                    | Duración de la fase anaerobia (%) |       |       |
|---|-----------------------------------|-------|-------|
|   | 35                                | 50    | 65    |
| Agua residual C.O. gDQOt/m <sup>2</sup> d       | 3.80                              | 4.37  | 3.49  |
| Agua residual SST efluente (mg/l)               | 10                                | 14    | 11.3  |
| Agua residual DQOt removida (mg/l)              | 142.2                             | 163.8 | 129.7 |
| Agua residual P-PO <sub>4</sub> removido (mg/l) | 5.64                              | 6.54  | 3.34  |
| Lodos SST (mg/l)                                | 1867                              | 2680  | 2260  |
| Lodos P-PO <sub>4</sub> (mg/l)                  | 143                               | 126   | 162   |
| Lodos P-PO <sub>4</sub> /SST (%)                | 7.65                              | 4.70  | 7.10  |
| Lodos P-PO <sub>4</sub> /SSTx32/96, FT (%)      | 2.55                              | 1.56  | 2.38  |

En todos los experimentos, la proporción de lodos en la biomasa fue inferior a La mayor producción de biomasa se obtuvo en la corrida con 50% de fase anaerobia, presentando la carga orgánica más alta. Esta biomasa contiene la menor proporción de fósforo total (1.56%). Contradictoriamente, en este experimento se obtuvo la mejor remoción de  $P-PO_4$  y la mejor calidad del efluente. Estos resultados indican que la masa de SST producidos por sustrato removido, no tiene gran influencia en la acumulación de ortofosfatos.

Es importante tomar en cuenta que los sólidos fueron medidos como SST. Esta prueba, cuantifica la biomasa producida junto con material inorgánico no biodegradable, (como arena). Por otra parte, no necesariamente dicha biomasa está constituida exclusivamente por organismos poly-P, seguramente una gran parte de los sólidos están constituidos por organismos heterótrofos no poly-P con tasas rápidas de crecimiento. También, en este experimento, la cantidad de protozoarios fue inferior que en el resto; por lo tanto, la biomasa tiene una menor cantidad de depredadores. La excelente excreción, captura y remoción de fósforo se debe a que las bacterias poly-P permanecen en la biopelícula.

la reportada por Shoda *et al* (1980) y González y Wilderer (1991). Estos investigadores experimentaron con agua sintética y cultivos puros, además realizaron sus análisis considerando la biomasa total. En esta investigación se utilizó agua municipal y se muestreo parcialmente a la biomasa (únicamente SST de 100 l en el efluente), mientras que González y Wilderer (1991) raspan completamente la totalidad del material de empaque de su reactor; obteniendo así la población total, tanto de organismos no poly-P como poly-P.

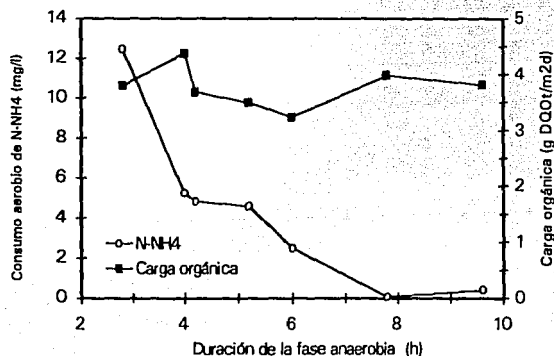


Figura 6.21 Efecto de la duración de la fase anaerobia y de la carga orgánica en la eliminación de  $N-NH_4$

### 6.3 Duración de la fase anaerobia y consumo aerobio de $N-NH_4$ .

De acuerdo con los resultados de este trabajo, se concluye que el crecimiento y estabilización de la población nitrificante están fuertemente influenciados por la duración del tiempo de reacción aerobio (figura 6.21). Arora *et al* (1985) mencionan que el diseño de cualquier proceso RBF debe considerar una zona aerobia entre 0.7 y 3 h. Una eficiente eliminación de  $N-NH_4$  se obtuvo en las corridas 3, 4, 7 y 8. En todas ellas, la aeración ocupó al menos el 50% del ciclo.

### 6.4 Efecto de la relación $DQOs/P-PO_4$ en la excreción y captura de fósforo.

La relación  $DQOs/P-PO_4$  es un factor que afecta de manera importante el proceso RBF (Randall, 1992). La figura 6.22 muestra los valores  $DQOs/P-PO_4$  obtenidos en esta investigación. Se observa que la excreción y remoción de fósforo aumentan en el intervalo 10-20 y disminuyen por arriba o abajo de dicho intervalo. Estos resultados son muy similares a los reportados por Hang-Sik *et al* (1993) quienes obtuvieron una excelente remoción de fósforo con una relación  $DQOs/P-PO_4$  de 20.

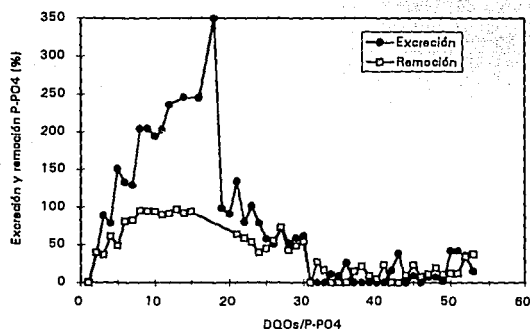


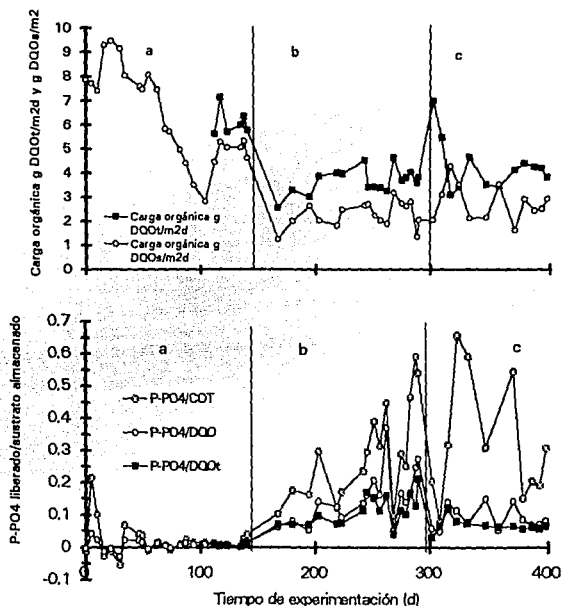
Figura 6.22 Efecto de la relación  $DQOs/P-PO_4$  en la excreción y remoción de  $P-PO_4$ . Se graficaron los valores obtenidos durante toda la experimentación.

Es necesario tomar en cuenta que el agua residual municipal presenta valores característicos de DQO y  $P-PO_4$ , los cuales fluctúan entre 600-100 mg/l y 15-2 mg/l, respectivamente (Barnes y Bliss, 1983). Un espectro de concentraciones tan amplio puede variar y no coincidir con la relación  $DQOs/P-PO_4$  deseada. A nivel laboratorio y planta piloto es relativamente fácil ajustar la concentración de ambos contaminantes para alcanzar dicha relación. Sin embargo, las concentraciones influentes deben mantenerse en el nivel que normalmente presentan las aguas municipales.



## 6.5 Comportamiento de la relación P-PO<sub>4</sub> liberado/sustrato almacenado.

La relación entre fósforo liberado y sustrato orgánico almacenado se muestra en la figura 6.22. Se graficaron los valores obtenidos en este trabajo. Se observa que, durante la primera corrida, la relación P-PO<sub>4</sub> excretado/sustrato almacenado fue de cero, lo cual indica que los organismos poly-P no se encontraban en una proporción detectable.



*Figura 6.23 Comportamiento de la relación fósforo excretado/sustrato almacenado. Se graficaron los valores obtenidos durante toda la experimentación. En la sección (a) están representados los valores de la primera corrida; los valores de la sección (b) corresponden a las corridas 2-5 y finalmente la sección (c) corresponde a los valores de las corridas 6-8.*

Durante este periodo la actividad bioquímica de organismos no poly-P influyó negativamente en el proceso RBF de dos formas: a) utilizando una gran y mayor cantidad de sustratos orgánicos en fase aerobia que anaerobia y b) utilizando una gran y mayor cantidad de sustratos orgánicos en fase anaerobia que aerobia no asociada a liberación de fósforo. Este comportamiento se presentó aun cuando los parámetros pH, O.D., T y carga orgánica se

mantuvieron en intervalos considerados en la literatura como favorables para el desarrollo de organismos poly-P.

Durante el resto de la experimentación, la relación es mayor que cero y toma valores entre 0.20 y 0.60, como COT, y entre 0.05 y 0.20, como DQOs y DQOt, independientemente de la duración del ciclo y del tiempo de reacción anaerobio/aerobio. Considerando el sustrato como COT, la relación es constantemente mayor que con DQOs y DQOt, lo cual indica que las bacterias poly-P son capaces de competir exitosamente con otros organismos por los sustratos más fácilmente biodegradables.

## 7. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se desprenden de este trabajo son las siguientes:

1. La remoción biológica de fósforo, puede llevarse a cabo en un reactor alimentado con agua residual municipal con operación discontinua y biopelícula completamente sumergida. Para ello, es necesario que la carga orgánica se ajuste a un valor inferior a  $5 \text{ gDQOt/m}^2\text{d}$ .
2. Cuando la carga orgánica fue más alta que  $5 \text{ gDQOt/m}^2\text{d}$ , se observó eliminación de sustratos orgánicos no asociada a la excreción de ortofosfatos. Es posible suponer que esta eliminación se debió a la actividad de organismos facultativos no poly-P.
3. La remoción de fósforo en un reactor con biopelícula requiere, además de una condición alternadamente anaerobia/aerobia, una estabilización anaerobia, donde más del 50% de material carbonoso sea eliminado durante la fase anaerobia y simultáneamente, se libere al menos 60% de la concentración influente de ortofosfatos. De tal forma que la concentración

de sustratos orgánicos al iniciar la fase aerobia sea tan baja que impida el probable crecimiento de organismos facultativos diferentes a los poly-P.

4. La remoción biológica de fósforo, se obtuvo con duración de ciclos de 8 y 12 h y diferentes combinaciones de duración de las fases anaerobia/aerobia. Esto permite suponer que es posible el enriquecimiento de la biopelícula con organismos poly-P.
5. La presencia de oxígeno disuelto y de nitratos no permite generar condiciones anaerobias, durante las primeras dos horas de la denominada fase *anaerobia*. Este hecho no impide el funcionamiento eficiente del proceso.
6. La concentración de ortofosfatos liberados y posteriormente capturados, se incrementa con una mayor duración de las fases anaerobia y aerobia, respectivamente. Sin embargo, la rapidez de excreción y captura, aumentan conforme disminuye la duración de las fases anaerobia y aerobia, respectivamente.
7. En todos los experimentos, se eliminó más del 75% de la DQOs y COT y más de 70% de la DQOt.
8. La diversidad de protozoarios ciliados es constantemente mayor respecto de otros protozoarios y metazoarios, independientemente del tiempo de reacción anaerobio/aerobio. Su actividad depredadora contribuye a eliminar la DQOt del agua.
9. El contenido P-PO<sub>4</sub> en los lodos (inferior a 3%) es muy bajo y no coincide con ninguno de los valores encontrados en la literatura. Esto se debe a que para cada investigación se utiliza una metodología diferente. Asimismo, las condiciones de operación y ambientales entre los trabajos son diferentes.
10. La nitrificación y la duración de la fase aerobia están fuertemente relacionadas. La nitrificación se llevó a cabo únicamente cuando la aeración ocupó al menos 50% de la duración total del ciclo.
11. En la experimentación con ciclos de 12 h y 35% de fase anaerobia, se observó desnitrificación y nitrificación simultánea, durante la fase aerobia del proceso.
12. El reactor discontinuo con biopelícula puede realizar el proceso RBF con eficiencias tan altas como del 92% teniendo una concentración P-PO<sub>4</sub> de 0.5 mg/l en el efluente. Para estas mismas condiciones la remoción de materia orgánica alcanza un 88% y se elimina completamente el N-NH<sub>4</sub> del agua. Esto ocurre en el ciclo de 12 h y 35% de fase anaerobia.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- APHA, AWWA y WPCF (1992) *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Díaz de Santos. España.
- Arora, M. C., Barth E. F. y Wmphres M. B. (1985). Technology evaluation of Sequencing Batch Reactors. *Journal Water Pollution Control Federation* **57**: 867 E.U.A.
- Arvin E. y Harremoës P. (1990) Concepts and models for biofilm reactor performance. *Water Science and Technology*. **22** (1/2): 171-192. Gran Bretaña.
- Barnard, J. L. (1974) Cut P and without chemicals water and wastes engineering
- Barnard, J. L. (1976) a review of biological phosphorus removal in the activated sludge proces. *Water S.A.* **2** 136.
- Barnes D. y Bliss P. J. (1983) *Biological control of nitrogen in wastewater treatment*. Ed. E.& F.N. Spon. E.U.A.

- Cech J. S., Hartman O. y Wanner J. (1993) Competition between poly-P and non-Poly-P bacteria in an enhanced phosphate removal system. *Water Environment Research* **65** (5): 690-692.
- Christensen M. H. y Harremoës P. (1978) Nitrification and denitrification in wastewater. En: *Water Pollution Microbiology*, Mitchel R. (ed), Vol 2 John Wiley & Sons: 391-414. New York, E.U. A.
- Comeau Y., Hall K. J. y Oldham W. K. (1985) A biochemical model for biological enhanced phosphorus removal. *Water Science and Technology*. **17** (11/12): 171-192. Gran Bretaña.
- Cooper P., Day M. y Thomas V. (1994) Process options for phosphorus and nitrogen removal from wastewater. *Journal. IWEM* **8**:84-92.
- Curds C. R. (1975) Protozoa. En: *Ecological aspects of used-water treatment*, Curds C. R. y Hawkes H. A. (ed), Vol 1, Academic Press: 203-268. Inglaterra.
- Digger G. T. y Stevensen R. P. (1991) Design and operation of biological phosphorus removal facilities. En: *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater principles and practice*. Sedlak (ed) Lewis Publishers 141-166. E.U.A.
- Doria S. C., González M. S., y Hernández M. (1992) Crítica de los modelos bioquímicos y microbiológicos de la remoción de fosfatos en aguas residuales. *Memorias del VIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- Gonzales R. F. y Rogalla F. (1992) Continuos biological phosphorus removal in a biofilm reactor. *Water Science and Technology*. **26**. (9): 2027-2030. Gran Bretaña.
- González M. S. (1989) *Phosphate removal in a biofilm reactor*. Informe. Comisión de Comunidades Europeas. Dirección General de Ciencia Tecnología y Desarrollo.
- González M. S. y Wilderer P. A. (1991) Phosphate removal in a biofilm reactor. *Water Science and Technology*. **23** (7/9): 1405-1415, Gran Bretaña.
- Hang-Sik S., Hang-Bae J., Eung T., Sang-Min L. y Ho Lim K. (1993) Optimal operating for nutrient removal in the automatic controlled sequencing batch reactor, *Small wastewater treatment plants*. Odegaard H. (ed.) Tapir Publishers: 151-157. Noruega.
- Iwai S. y Kitao T. (1994) Wastewater treatment with microbial films. Ed. Technomic Publishing. Pennsylvania, U.S.A.
- Kinner N. E. y Curds C. R. (1988) Protozoa and metazoa as indicators of effluent quality in rotating biological contactors. *Water Science and Technology*. **20** (11/12): 199-204. Gran Bretaña.
- Kudo S. R. (1969) *Protozoología*. Ed. Continental. México.
- Levin G. V. y Shapiro J. (1965) Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms. *Journal Water Pollution Control Federation*. **37** (6): 800-822. E.U.A.

- Levine G. A., Tchobanoglous G. y Asano T. (1985) Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications. *Journal Water Pollution Control Federation* 57 (7): 805-816. E.U.A.
- Mamais D. y Jenkins D. (1992) The effects of MCRT and temperature on enhanced biological phosphorus removal. *Water Science and Technology*. 26 (5/6): 955-965. Gran Bretaña.
- Mino T., Arun V., Tsuzuki Y y Matsuo T. (1987) Effect of phosphorus accumulation on acetate metabolism in the biological phosphorus removal process. *Biological Phosphate Removal from Wastewater Advances Water Pollution Control* (4): 27-38.
- Nichollos H. A. y Osborn D. W. (1979) Bacterial stress: prerequisite for biological removal of phosphorus. *Journal Water Pollution Control Federation*. 51 (3): 557-568. E.U.A.
- Noruzian M. (1983) *A performance evaluation and kinetics determination of an RBC system operation at the C.U. wastewater treatment plant*. Informe interno (proyecto No. 3306) Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Okada M., Murakami., A y Sudo R. (1987) Ecological selection of phosphorus-accumulating bacteria in sequencing batch reactor activated sludge processes for simultaneous removal of phosphorus, nitrogen and organic substances. *Biological Phosphate Removal from Wastewater. Advances Water Pollution Control* (4): *Advances in Water Pollution Control*. 147-153.
- Pennak R. W. (1978) *Fresh-water invertebrates of the United States*. 2a ed. John Wiley & Sons. New York. E.U.A.
- Ramírez C. (1988) *Nitrificación y destrucción de la alcalinidad en una unidad de biodiscos estructuralmente modificada y su efecto sobre el crecimiento de algas en el efluente*. Tesis de Maestría en Ing. Ambiental, DEPII, UNAM. México.
- Satoh H., Mino T. y Matsuo T. (1992) Uptake of organic substrates and accumulation of polyhydroxyalkanoates linked with glycolysis of intracellular carbohydrates under anaerobic conditions in the biological excess phosphate removal processes. *Water Science and Technology*. 26 (5/6): 933-942. Gran Bretaña.
- Schiemer F. (1975) Nematoda. En: *Ecological aspects of used-water treatment*, Curds C. R. y Hawkes H. A. (ed), Vol 1 Academic Press: 269-304. Inglaterra.
- Schlegel G.H. (1988) *Microbiología general*. Ed. Omega, Barcelona.
- Schön G., Geywitz S. y Mertens F. (1993) Influence of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential on phosphate release and uptake by activated sludge from sewage plants with enhanced biological phosphorus removal. *Water Research*. 27 (83): 349-354. Inglaterra.
- Shoda M., Ohsumi T. y Udaka S. (1980) Screening for high phosphate accumulating bacteria. *Agriculture Biological Chemical* 44 (2): 319-324.

- Solbé G.L. (1975) Annelida. En: *Ecological aspects of used-water treatment*, Curds C. R. y Hawkes H. A. (ed), Vol 1, Academic Press: 305-335 Inglaterra.
- Stensel D. H. (1991) Principles of biological phosphorus removal. En: *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater principles and practice*. Sedlak R. (ed), Lewis Publishers, 141-166. E.U.A.
- Stensel D. H. y Barnard J. L. (1992) Principles of biological nutrient removal En: *Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal.*, Randall C. W., Barnard J. L. y Stensel H. D. (ed), Vol 5 Technomic publishing: 25-95. Pennsylvania, E.U. A.
- Streble H. y Krauter D. (1982) *Das Leben im wassertropfen mikroflora und mikrofauna des süßwassers*. Ed. Kosmos Bucher. Stuttgart, Alemania.
- Tracy K. D. y Flammino A. (1987) Biochemistry and energetics of biological phosphorus removal. Biological Phosphate Removal from Wastewater *Advances Water Pollution Control* (4): 12-25.
- Truelar M. G. y Characklis W. G. (1982) Dynamics of biofilm processes *Journal Water Pollution Control Federation* 54 (9): 1288-1301. E.U.A.
- Wentzel M. C., Dold P. L., Loewenthal R. E. Ekama G. A. y Marais G. R. (1987) Experiments towards establishing the kinetics of biological excess phosphorus removal. Biological Phosphate Removal from Wastewater. *Advances Water Pollution Control* (4): 79-97.
- Wentzel M. C. Lötter L. H. Ekama G. A. Loewenthal R. E. y Marais G. R. (1991) Evaluation of biochemical models for biological excess phosphorus removal. *Water Science and Technology*. 23 (1/2): 567-576. Gran Bretaña.



## APÉNDICE

TABLA 1 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 8 HORAS CON 2.8 HORAS (35%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp °C | DOO1 (mg/l) | DOO2 (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO4 (mg/l) | N-NH4 (mg/l) | N-NO3 (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|---------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Agua cruda             | 7.84 |             |         | 142.2       | 70.2        | 30.96      | 2.6          | 18.15        | 2.28         |
| 0                      | 7.68 | 3.9         | 19      | 181.8       | 113.4       | 38.61      | 10.38        | 12.26        | 2.28         |
| 1                      | 6.98 | 1           | 19.3    | 100.8       | 59.4        | 27.75      | 10.44        | 13.57        | 1.19         |
| 1.83                   | 7.03 | 0           | 19.8    | 88.2        | 39.6        | 19.06      | 14.16        | 15.67        | 0.67         |
| 2.16                   | 7    | 0           | 20      | 86.4        | 37.8        | 18.03      | 15.44        | 13.8         | 0.32         |
| 2.8                    | 6.98 | 0           | 20.5    | 84          | 33.8        | 17.72      | 16.8         | 16.65        | 0.32         |
| 3.5                    | 7.22 | 3.7         | 21      | 84.6        | 28.8        | 11.52      | 14.1         | 15.87        | 0.57         |
| 4.7                    | 7.42 | 4.3         | 22      | 55.8        | 18          | 8.41       | 11.82        | 13.33        | 0.81         |
| 5.7                    | 7.39 | 4.3         | 22      | 50.4        | 18          | 6.24       | 8.88         | 8.67         | 0.93         |
| 6.93                   | 7.4  | 4.2         | 22.3    | 45          | 16.2        | 6.14       | 6.08         | 6.85         | 1.62         |
| 8                      | 7.35 | 4.2         | 22.5    | 39.6        | 12.6        | 5.83       | 4.74         | 4.18         | 1.85         |

TABLA 2 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 8 HORAS CON 4.0 HORAS (50%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp °C | DOO1 (mg/l) | DOO2 (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO4 (mg/l) | N-NH4 (mg/l) | N-NO3 (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|---------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Agua cruda             | 7.65 |             |         | 144.2       | 54          | 23.86      | 1.68         | 9.14         | 2.4          |
| 0                      | 7.46 | 3.9         | 18.5    | 208.8       | 118.8       | 56.92      | 8.96         | 10.22        | 3.49         |
| 1.16                   | 7.26 | 0.7         | 19      | 138.6       | 68.4        | 27.22      | 8.44         | 10.04        | 1.89         |
| 2.5                    | 7.1  | 0           | 20      | 113.4       | 50.4        | 20.1       | 11.36        | 9.63         | 0.47         |
| 3.16                   | 6.98 | 0           | 20.3    | 108         | 48.6        | 17.45      | 12.82        | 10.58        | 0.74         |
| 3.58                   | 6.99 | 0           | 20.5    | 102         | 43.2        | 14.3       | 14.64        | 10.98        | 0.47         |
| 4                      | 6.97 | 0           | 21      | 95.4        | 43.2        | 14.4       | 15.4         | 9.36         | 0.35         |
| 4.58                   | 7.39 | 3.9         | 21.5    | 79.2        | 37.8        | 9          | 12.62        | 9.86         | 0.46         |
| 5.16                   | 7.49 | 4.3         | 22      | 68.6        | 34.2        | 7.44       | 10.54        | 7.87         | 0.71         |
| 6                      | 7.53 | 4.4         | 22      | 61.2        | 32.4        | 7.58       | 7.22         | 6.15         | 1            |
| 7                      | 7.54 | 4.5         | 22      | 54          | 28.8        | 6.87       | 4.1          | 4.42         | 1.39         |
| 8                      | 7.52 | 4.4         | 23      | 45          | 28.8        | 6.67       | 2.42         | 4.11         | 1.38         |

TABLA 3 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 8 HORAS CON 5.2 HORAS (65%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp °C | DOO1 (mg/l) | DOO2 (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO4 (mg/l) | N-NH4 (mg/l) | N-NO3 (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|---------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Agua cruda             | 7.34 |             |         | 92.6        | 41.4        | 10.08      | 1.12         | 7.41         | 2.58         |
| 0                      | 7.36 | 4.1         | 19      | 167         | 77.4        | 30.4       | 8.5          | 7.22         | 3.05         |
| 1                      | 7.25 | 1.2         | 19      | 90.8        | 41.4        | 10.38      | 7.88         | 8.4          | 1.51         |
| 1.55                   | 7.16 | 0.2         | 19      | 93.2        | 43.2        | 10.9       | 8.72         | 10.03        | 0.86         |
| 2.75                   | 7.14 | 0           | 20      | 83.4        | 37.8        | 10.08      | 9.54         | 10.12        | 0.29         |
| 3.25                   | 7.08 | 0           | 20      | 83.2        | 37.8        | 9.46       | 10.66        | 12.12        | 0            |
| 4.16                   | 7.07 | 0           | 20      | 72.5        | 34.2        | 9.12       | 12.62        | 11.84        | 0            |
| 4.66                   | 6.96 | 0           | 20.2    | 66.3        | 32.4        | 8.75       | 13.84        | 13.57        | 0            |
| 5.2                    | 7.02 | 0           | 21.5    | 64          | 30.6        | 8.54       | 15.2         | 13.84        | 0            |
| 5.66                   | 7.44 | 3.5         | 21.5    | 51.8        | 25.2        | 8.03       | 13.92        | 13.2         | 0            |
| 6.16                   | 7.52 | 3.9         | 22      | 51.8        | 25.2        | 4.96       | 12.44        | 11.66        | 0            |
| 6.7                    | 7.51 | 4           | 22      | 43.6        | 21.6        | 5.27       | 9.44         | 9.31         | 0.26         |
| 7.21                   | 7.51 | 4           | 22      | 38.5        | 21.6        | 4.86       | 7.3          | 9.76         | 0.34         |
| 8                      | 7.56 | 4.2         | 22      | 37.3        | 19.2        | 4.65       | 5.16         | 7.68         | 0.4          |

TABLA 4 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 12 HORAS CON 4.2 HORAS (35%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp. °C | DDO <sub>1</sub> (mg/l) | DDO <sub>5</sub> (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO <sub>4</sub> (mg/l) | N-NH <sub>4</sub> (mg/l) | N-NO <sub>3</sub> (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|----------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Agua cruda             | 7.19 |             |          | 345.6                   | 273.6                   | 44.31      | 2.62                     | 4.97                     | 1.33                     |
| 0                      | 7.12 | 3.4         | 19       | 266.4                   | 196.2                   | 86.68      | 6.54                     | 5.37                     | 2.06                     |
| 1                      | 6.96 | 0.6         | 19.2     | 207                     | 160.2                   | 68.04      | 7.74                     | 4.73                     | 1.17                     |
| 2.18                   | 6.93 | 0           | 20       | 151.2                   | 132.8                   | 46.19      | 15                       | 5.37                     | 0.49                     |
| 3.15                   | 6.84 | 0           | 21       | 136.8                   | 115.2                   | 37.8       | 18.84                    | 4.11                     | 0.36                     |
| 4.25                   | 6.8  | 0           | 21       | 124.2                   | 99                      | 31.18      | 22.6                     | 4.85                     | 0.28                     |
| 5.25                   | 7.29 | 5.5         | 22       | 52.2                    | 45.2                    | 18.92      | 16.72                    | 5.81                     | 0.33                     |
| 6.2                    | 7.34 | 5.8         | 22       | 41.4                    | 37.9                    | 16.94      | 9.96                     | 2.43                     | 0.92                     |
| 7.28                   | 7.33 | 6           | 22       | 36                      | 27.1                    | 15.5       | 5.28                     | 1.2                      | 0.73                     |
| 8.2                    | 7.14 | 6           | 22       | 36                      | 25.2                    | 15.28      | 3.08                     | 0.76                     | 0.99                     |
| 9.28                   | 7.3  | 6           | 22       | 32.4                    | 25                      | 14.73      | 1.52                     | 0.19                     | 1.52                     |
| 10.4                   | 7.34 | 6.3         | 22       | 27                      | 23.8                    | 14.51      | 0.86                     | 0                        | 1.43                     |
| 11.21                  | 7.36 | 6.5         | 22       | 28.8                    | 23.5                    | 14.84      | 0.66                     | 0                        | 1.24                     |
| 12                     | 7.37 | 6.6         | 22       | 30.6                    | 23.4                    | 14.31      | 0.52                     | 0                        | 1.1                      |

TABLA 5 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 12 HORAS CON 6.0 HORAS (50%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp. °C | DDO <sub>1</sub> (mg/l) | DDO <sub>5</sub> (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO <sub>4</sub> (mg/l) | N-NH <sub>4</sub> (mg/l) | N-NO <sub>3</sub> (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|----------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Agua cruda             | 7.5  |             |          | 176.4                   | 68.4                    | 30.21      | 2.66                     | 6.67                     | 3.02                     |
| 0                      | 7.3  | 3.6         | 19.5     | 234                     | 136.8                   | 69.57      | 9.3                      | 7.14                     | 3.07                     |
| 1.5                    | 7.1  | 0           | 20       | 156.6                   | 110.2                   | 49.57      | 13.56                    | 8                        | 1.69                     |
| 2.68                   | 6.9  | 0           | 21       | 135                     | 106.2                   | 33.74      | 19.96                    | 6.89                     | 1.68                     |
| 3.58                   | 6.9  | 0           | 21.5     | 122.4                   | 100.8                   | 27.75      | 23.4                     | 8.1                      | 1.8                      |
| 4.65                   | 6.85 | 0           | 21.5     | 109.8                   | 84.6                    | 24.75      | 26.7                     | 7.14                     | 1.63                     |
| 5.5                    | 6.84 | 0           | 22       | 100.8                   | 81                      | 21.12      | 30.4                     | 7.07                     | 1.29                     |
| 6                      | 6.84 | 0           | 22.7     | 95.4                    | 77.8                    | 20.58      | 31.2                     | 6.5                      | 0.95                     |
| 7.75                   | 7.46 | 3.9         | 23.7     | 60.4                    | 52.2                    | 12.78      | 21.8                     | 6.67                     | 1.11                     |
| 8.33                   | 7.49 | 4           | 24       | 41.4                    | 36.4                    | 11.49      | 12.4                     | 6.08                     | 1.24                     |
| 9.21                   | 7.49 | 4           | 24.1     | 38.5                    | 24.3                    | 10.85      | 6.2                      | 5.39                     | 0.76                     |
| 9.93                   | 7.54 | 4.3         | 24.1     | 37.8                    | 23.2                    | 11.28      | 3.4                      | 2.58                     | 1.32                     |
| 10.75                  | 7.54 | 4.5         | 24.1     | 36                      | 22.7                    | 11.17      | 0.2                      | 1.5                      | 2.56                     |
| 11.21                  | 7.49 | 4.5         | 24.1     | 33.2                    | 23.2                    | 10.85      | 0.98                     | 1.44                     | 3.54                     |
| 12                     | 7.47 | 4.5         | 24.1     | 34.2                    | 24                      | 12.13      | 0.77                     | 0.68                     | 3.86                     |

TABLA 6 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 12 HORAS CON 7.8 HORAS (65%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH  | O.D. (mg/l) | Temp °C | DDO <sub>1</sub> (mg/l) | DDO <sub>5</sub> (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO <sub>4</sub> (mg/l) | N-NH <sub>4</sub> (mg/l) | N-NO <sub>3</sub> (mg/l) |
|------------------------|-----|-------------|---------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Agua cruda             | 7.6 |             |         | 262.8                   | 61.2                    | 33.05      | 2.26                     | 8.18                     | 4.12                     |
| 0                      | 7.5 | 2.1         | 19      | 288                     | 131.7                   | 115.2      | 9.02                     | 10.34                    | 4.78                     |
| 1.16                   | 7.2 | 0.1         | 19.5    | 196.2                   | 84.6                    | 40.94      | 10.8                     | 12.54                    | 2.12                     |
| 2.7                    | 7.1 | 0           | 20      | 169.2                   | 54.6                    | 25.35      | 14.2                     | 14.73                    | 0.77                     |
| 3.83                   | 7.1 | 0           | 21      | 147.6                   | 49.8                    | 22.68      | 17.9                     | 12.86                    | 0.44                     |
| 5.16                   | 7   | 0           | 22      | 136.8                   | 40.2                    | 21.5       | 18.9                     | 16.58                    | 0.2                      |
| 6.75                   | 6.9 | 0           | 22.5    | 122.4                   | 39.8                    | 19.52      | 20.42                    | 16.13                    | 0.2                      |
| 7.83                   | 6.9 | 0           | 23      | 119.8                   | 35.7                    | 16.95      | 21.04                    | 16.7                     | 0.06                     |
| 8.75                   | 7.5 | 4.2         | 23.5    | 102.8                   | 28.8                    | 12.02      | 15.78                    | 16.82                    | 0.2                      |
| 9.75                   | 7.7 | 4.8         | 23.5    | 104.3                   | 32.4                    | 11.33      | 13.8                     | 17                       | 0.2                      |
| 10.66                  | 7.7 | 4.9         | 23.5    | 99.6                    | 25.2                    | 9.75       | 4.23                     | 17.24                    | 0.36                     |
| 12                     | 7.7 | 4.9         | 23.5    | 89.5                    | 22.2                    | 9.75       | 1.7                      | 16.65                    | 0.3                      |

TABLA 7 VALORES OBTENIDOS DURANTE UN CICLO DE 12 HORAS CON 9.2 HORAS (80%) DE FASE ANAEROBIA

| Duración del ciclo (h) | pH   | O.D. (mg/l) | Temp °C | DDO <sub>1</sub> (mg/l) | DDO <sub>5</sub> (mg/l) | COT (mg/l) | P-PO <sub>4</sub> (mg/l) | N-NH <sub>4</sub> (mg/l) | N-NO <sub>3</sub> (mg/l) |
|------------------------|------|-------------|---------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Agua cruda             | 7.34 |             |         | 237.6                   | 70.2                    | 35.13      | 3.12                     | 5.27                     | 3.22                     |
| 0                      | 7.27 | 1           | 20.5    | 275.4                   | 147.6                   | 74.86      | 8                        | 5.32                     | 5.14                     |
| 1.28                   | 7.17 | 0           | 21      | 212.4                   | 91.8                    | 36.62      | 10.22                    | 4.75                     | 2.44                     |
| 2.25                   | 6.91 | 0           | 22.5    | 192.6                   | 66.6                    | 31.36      | 13.2                     | 6.13                     | 0.88                     |
| 3.25                   | 6.81 | 0           | 23.1    | 194.4                   | 66.6                    | 27.26      | 17.64                    | 5.96                     | 0.74                     |
| 5.38                   | 6.78 | 0           | 24      | 181.8                   | 50.4                    | 22.92      | 22.1                     | 10.66                    | 0.62                     |
| 6.25                   | 6.75 | 0           | 24.5    | 149.4                   | 39.6                    | 21.09      | 26.7                     | 11.4                     | 0.33                     |
| 7.41                   | 6.73 | 0           | 25      | 153                     | 48.6                    | 21.55      | 32.8                     | 8.91                     | 0.31                     |
| 8.38                   | 6.71 | 0           | 25      | 131.4                   | 42                      | 20.63      | 34.4                     | 9.8                      | 0.46                     |
| 9.56                   | 6.71 | 0           | 25      | 142.2                   | 45                      | 23.03      | 36                       | 9.95                     | 0.8                      |
| 10.36                  | 7.35 | 3.6         | 25      | 84.6                    | 39.3                    | 16.07      | 25.2                     | 10.54                    | 0.59                     |
| 11.13                  | 7.53 | 4           | 25      | 79.2                    | 32                      | 14.93      | 14.68                    | 10.71                    | 0.62                     |
| 12                     | 7.55 | 4.2         | 25.1    | 75.6                    | 28                      | 13.78      | 10.02                    | 9.53                     | 0.49                     |

NOTA En todas las tablas la doble raya representa el final de la fase anaerobia. El agua cruda es agua residual sin contenido de melaza ni de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>

TABLA 8 VALORES OBTENIDOS DURANTE LA PRIMERA CORRIDA QUE CORRESPONDE A CORRIDAS CON CICLOS DE 8 HORAS Y 5.2 HORAS (65%) DE ETAPA ANAEROBIA

| Experi-<br>mentos/dn<br>(días) | DQO:           |                      |                     |                   | DQOs:           |                      |                     |                   | COT:                 |                     |                   | P-PO4                |                     |                   | N-NH4                |                     | N-NO3             |                      |                     |                   |
|--------------------------------|----------------|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
|                                | C.O.<br>DQO/m2 | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) | C.O.<br>DQOs/m2 | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) | influyente<br>(mg/l) | anaerobia<br>(mg/l) | aerobia<br>(mg/l) |
| 0                              |                |                      |                     |                   | 7.9             | 375                  | 326                 | 207               | 80.9                 | 65                  | 28.0              | 8.9                  | 8.7                 | 8.8               | 16.4                 | 17.1                | 13.2              |                      |                     |                   |
| 5                              |                |                      |                     |                   | 7.7             | 388                  | 313                 | 197               | 68.6                 | 58                  | 20.1              | 8.4                  | 10.7                | 10.8              | 19.0                 | 15.5                | 14.1              |                      |                     |                   |
| 10                             |                |                      |                     |                   | 7.4             | 354                  | 302                 | 199               | 68.4                 | 48                  | 20.3              | 7.4                  | 8.6                 | 7.9               | 12.3                 | 18.5                | 16.2              |                      |                     |                   |
| 16                             |                |                      |                     |                   | 8.3             | 443                  | 351                 | 216               | 138                  | 91                  | 31.0              | 13.0                 | 11.7                | 11.5              | 6.6                  | 19.3                | 8.3               |                      |                     |                   |
| 22                             |                |                      |                     |                   | 9.5             | 482                  | 357                 | 213               | 138                  | 95                  | 29.0              | 12.8                 | 12.1                | 11.5              | 11.1                 | 10.2                | 7.3               |                      |                     |                   |
| 30                             |                |                      |                     |                   | 8.1             | 438                  | 340                 | 201               | 130                  | 78                  | 18.0              | 12.7                 | 9.9                 | 9.4               | 9.4                  | 7.3                 | 9.8               |                      |                     |                   |
| 34                             |                |                      |                     |                   | 8.0             | 384                  | 336                 | 232               | 92                   | 78                  | 31.0              | 7.5                  | 8.8                 | 8.4               | 10.3                 | 18.0                | 16.0              |                      |                     |                   |
| 46                             |                |                      |                     |                   | 7.8             | 382                  | 297                 | 215               | 73                   | 39                  | 15.0              | 6.6                  | 8.0                 | 7.8               | 5.7                  | 8.1                 | 5.8               |                      |                     |                   |
| 49                             |                |                      |                     |                   | 7.5             | 357                  | 310                 | 221               | 71                   | 62                  | 18.0              | 8.3                  | 9.0                 | 9.2               | 7.8                  | 9.9                 | 8.3               |                      |                     |                   |
| 54                             |                |                      |                     |                   | 8.1             | 385                  | 322                 | 218               | 110                  | 65                  | 17.0              | 7.8                  | 7.4                 | 6.8               | 6.3                  | 11.3                | 7.5               | 3.4                  | 0.82                | 0.74              |
| 62                             |                |                      |                     |                   | 7.5             | 358                  | 315                 | 213               | 88                   | 54                  | 16.0              | 6.7                  | 7.2                 | 6.5               | 8.7                  | 8.7                 | 11.1              | 3.3                  | 0.58                | 0.32              |
| 69                             |                |                      |                     |                   | 5.8             | 278                  | 184                 | 130               | 114                  | 50                  | 15.0              | 7.8                  | 8.0                 | 7.0               | 5.9                  | 9.7                 | 8.3               | 3.7                  | 0.78                | 0.58              |
| 73                             |                |                      |                     |                   | 5.7             | 273                  | 123                 | 48                | 133                  | 61                  | 21.0              | 8.7                  | 8.3                 | 7.4               | 7.0                  | 10.4                | 7.9               | 3.4                  | 0.81                | 0.48              |
| 82                             |                |                      |                     |                   | 4.9             | 238                  | 114                 | 31                | 112                  | 53                  | 18.0              | 5.3                  | 5.8                 | 5.8               | 10.2                 | 14.9                | 15.0              | 3.8                  | 0.72                | 0.61              |
| 87                             |                |                      |                     |                   | 4.4             | 210                  | 105                 | 43                | 105                  | 49                  | 19.0              | 5.7                  | 7.0                 | 6.2               | 7.7                  | 12.3                | 12.0              | 3.5                  | 0.78                | 0.58              |
| 94                             |                |                      |                     |                   | 3.6             | 167                  | 87                  | 31                | 76                   | 42                  | 13.0              | 6.8                  | 7.1                 | 5.7               | 8.5                  | 6.6                 | 7.4               | 3.4                  | 0.42                | 0.32              |
| 104                            |                |                      |                     |                   | 2.8             | 134                  | 62                  | 27                | 73.4                 | 29                  | 14.0              | 5.5                  | 6.1                 | 5.1               | 4.7                  | 3.7                 | 4.0               | 3.4                  | 0.65                | 0.46              |
| 112                            |                |                      |                     |                   | 4.4             | 212                  | 82                  | 34                | 124                  | 28                  | 15.0              | 5.7                  | 6.8                 | 5.3               | 5.7                  | 6.8                 | 5.3               | 3.7                  | 0.71                | 0.52              |
| 117                            | 4.8            | 227                  | 98                  | 48                | 5.3             | 282                  | 85                  | 32                | 148                  | 63                  | 14.0              | 5.9                  | 6.5                 | 5.8               | 6.6                  | 6.5                 | 6.5               | 3.7                  | 0.66                | 0.46              |
| 123                            | 6.3            | 300                  | 79                  | 38                | 5.1             | 241                  | 52                  | 38                | 145                  | 45                  | 25.0              | 5.7                  | 6.4                 | 3.3               | 6.6                  | 6.5                 | 6.5               | 3.6                  | 0.5                 | 0.3               |
| 135                            | 5.8            | 269                  | 65                  | 42                | 5.1             | 241                  | 51                  | 32                | 145                  | 45                  | 25.0              | 6.5                  | 6.8                 | 3.4               | 8.5                  | 10.0                | 4.8               | 3.4                  | 0.78                | 0.58              |
| 137                            | 5.8            | 278                  | 58                  | 40                | 5.3             | 253                  | 47                  | 32                | 140                  | 42                  | 26.0              | 7.2                  | 9.7                 | 4.6               | 7.3                  | 8.7                 | 7.0               | 3.3                  | 0.67                | 0.32              |
| 140                            | 5.4            | 258                  | 52                  | 35                | 4.8             | 220                  | 40                  | 26                | 100                  | 36                  | 27.0              | 6.7                  | 9.2                 | 5.7               | 8.5                  | 9.4                 | 6.3               | 3.0                  | 0.58                | 0.23              |

NOTA Los valores del final de las fases anaerobia y aerobia corresponden a las columnas anaerobia y aerobia, respectivamente.

TABLA 9 RESULTADOS DE LAS CORRIDAS CON CICLOS DE 8 HORAS Y 3 DIFERENTES ETAPAS ANAEROBIAS

| Experimentación (días) | C.O. (g DQO/m <sup>3</sup> d) | Fase anaerobia (%) | DQO <sub>1</sub>  |                  |                | DQO <sub>2</sub>  |                  |                | COT               |                  |                | P.FO4             |                  |                | N.MH4             |                  |                | N.AO3             |                  |                |
|------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|
|                        |                               |                    | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) |
| 0                      | 7.0                           | 65                 | 333               | 144              | 80.3           | 203.4             | 104.4            | 29.7           | 55.8              | 27.6             | 17.4           | 5.9               | 11.6             | 7.6            | 12.3              | 13.8             | 8.5            | 2.2               | 1                | 0.46           |
| 7                      | 6.4                           | 65                 | 260               | 168              | 73.6           | 167.4             | 43.2             | 15.6           | 108.0             | 32.4             | 12.5           | 6.5               | 12.4             | 5.3            | 5.7               | 7.6              | 1.8            | 3.1               | 0.04             | 2.11           |
| 14                     | 3.1                           | 65                 | 147.6             | 63               | 23.4           | 100.8             | 28.8             | 12.6           | 47.8              | 16.3             | 8.4            | 7.4               | 17.4             | 2.7            | 5.1               | 7.5              | 2.0            | 2.9               | 0.3              | 1.19           |
| 21                     | 3.4                           | 65                 | 162               | 72               | 18             | 102.0             | 36.0             | 14.7           | 26.7              | 15.7             | 10.1           | 9.0               | 16.2             | 3.7            | 8.7               | 9.4              | 4.8            | 3.2               | 0.46             | 1.32           |
| 30                     | 4.8                           | 65                 | 221.4             | 82.8             | 22.5           | 167.4             | 32.4             | 11.8           | 36.9              | 19.6             | 7.5            | 10.1              | 20.3             | 4.7            | 7.0               | 8.7              | 8.8            | 2.8               | 0.32             | 1.78           |
| 45                     | 3.5                           | 65                 | 167               | 66.3             | 37.3           | 77.4              | 32.4             | 19.2           | 30.4              | 8.8              | 4.7            | 6.5               | 15.2             | 5.2            | 7.2               | 13.6             | 7.7            | 3.1               | 0                | 0.4            |
| 56                     | 3.4                           | 50                 | 193.8             | 75.6             | 21.6           | 138.6             | 34.2             | 12.6           | 15.3              | 12.7             | 8.0            | 9.4               | 14.8             | 5.2            | 9.5               | 8.8              | 8.8            | 2.8               | 0.58             | 1.77           |
| 69                     | 4.1                           | 50                 | 196.2             | 118.6            | 21.6           | 115.2             | 79.2             | 16.2           | 20.6              | 11.3             | 6.4            | 10.1              | 15.2             | 4.5            | 10.2              | 13.9             | 7.3            | 2.2               | 0.88             | 2.47           |
| 77                     | 4.4                           | 50                 | 208.8             | 95.4             | 45             | 118.8             | 43.2             | 26.8           | 56.9              | 14.4             | 5.9            | 9.0               | 15.4             | 2.4            | 10.2              | 9.4              | 4.1            | 3.5               | 0.35             | 1.38           |
| 85                     | 4.2                           | 35                 | 201.6             | 118.8            | 23.4           | 138.6             | 63.0             | 36.0           | 47.7              | 22.5             | 8.4            | 9.9               | 15.1             | 6.7            | 13.6              | 10.9             | 6.1            | 1.6               | 0.31             | 2.03           |
| 91                     | 4.2                           | 35                 | 198.8             | 103.8            | 48.6           | 124.8             | 46.7             | 21.6           | 48.9              | 20.4             | 6.5            | 9.4               | 14.8             | 4.9            | 10.6              | 9.5              | 5.0            | 2.9               | 0.38             | 2.1            |
| 96                     | 3.8                           | 35                 | 181.8             | 84               | 29.6           | 113.4             | 33.8             | 12.6           | 38.6              | 17.7             | 5.8            | 10.4              | 16.8             | 4.7            | 12.3              | 16.7             | 4.2            | 2.3               | 0.32             | 1.85           |

TABLA 10 RESULTADOS DE LAS CORRIDAS CON CICLOS DE 12 HORAS Y 4 DIFERENTES ETAPAS ANAEROBIAS

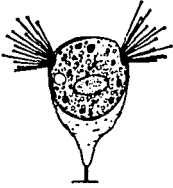
| Experimentación (días) | C.O. (g DQO/m <sup>3</sup> d) | Fase anaerobia (%) | DQO <sub>1</sub>  |                  |                | DQO <sub>2</sub>  |                  |                | COT               |                  |                | P.FO4             |                  |                | N.MH4             |                  |                | N.AO3             |                  |                |
|------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|
|                        |                               |                    | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) | Influyente (mg/l) | anaerobia (mg/l) | aerobia (mg/l) |
| 0                      | 2.5                           | 65                 | 183.0             | 133.2            | 48.6           | 90.0              | 34.2             | 10.8           | 49.3              | 15.5             | 8.1            | 9.0               | 12.5             | 5.4            | 6.0               | 10.6             | 11.8           | 4.0               | 0.37             | 0.63           |
| 13                     | 3.3                           | 65                 | 237.6             | 120.6            | 71.2           | 144.0             | 43.2             | 30.6           | 65.2              | 19.4             | 9.2            | 9.2               | 17.4             | 6.8            | 11.6              | 12.0             | 11.6           | 3.3               | 0.53             | 0.44           |
| 28                     | 3.0                           | 65                 | 218               | 95.5             | 74.6           | 189.0             | 36.0             | 27.0           | 66.8              | 17.4             | 15.0           | 10.2              | 18.2             | 3.9            | 5.1               | 10.9             | 10.8           | 3.5               | 0.5              | 0.99           |
| 38                     | 3.9                           | 65                 | 279               | 122.4            | 93.6           | 145.8             | 37.8             | 12.6           | 73.5              | 22.5             | 18.8           | 10.0              | 25.1             | 5.1            | 4.7               | 12.0             | 10.9           | 3.3               | 0.47             | 0.8            |
| 52                     | 4.0                           | 65                 | 288               | 119.8            | 97.2           | 131.7             | 35.7             | 22.2           | 115.2             | 17.0             | 9.8            | 9.0               | 21.0             | 1.7            | 10.3              | 16.7             | 16.7           | 4.8               | 0.06             | 0.2            |
| 56                     | 4.0                           | 65                 | 296.2             | 118.8            | 82.8           | 178.2             | 43.2             | 19.8           | 96.8              | 23.3             | 14.5           | 9.6               | 22.1             | 1.7            | 8.8               | 11.5             | 9.1            | 3.7               | 0.09             | 0.59           |
| 76                     | 4.5                           | 50                 | 325.6             | 163.6            | 91.8           | 190.8             | 55.8             | 28.8           | 103.1             | 26.0             | 14.9           | 8.9               | 27.1             | 0.7            | 4.5               | 6.4              | 1.3            | 4.3               | 0.54             | 1.59           |
| 78                     | 3.4                           | 50                 | 244.8             | 127.8            | 75.6           | 194.4             | 72.0             | 46.8           | 91.5              | 24.5             | 16.1           | 9.7               | 29.4             | 0.5            | 6.2               | 7.4              | 3.9            | 3.6               | 0.98             | 1.82           |
| 84                     | 3.4                           | 50                 | 245.8             | 124.4            | 45.0           | 160.2             | 71.0             | 45.0           | 68.7              | 19.8             | 12.3           | 9.5               | 27.8             | 0.6            | 8.1               | 9.7              | 7.1            | 2.9               | 0.81             | 3.8            |
| 89                     | 3.4                           | 50                 | 243               | 85.2             | 65.0           | 145.8             | 36.0             | 16.2           | 71.8              | 15.2             | 10.4           | 8.7               | 26.4             | 0.9            | 2.7               | 3.9              | 0.5            | 4.8               | 0.52             | 2.94           |
| 96                     | 3.2                           | 50                 | 234               | 95.4             | 34.2           | 138.6             | 77.6             | 24.0           | 69.6              | 20.6             | 12.1           | 9.3               | 21.2             | 0.8            | 7.1               | 6.5              | 0.7            | 2.1               | 0.95             | 3.86           |
| 101                    | 4.8                           | 35                 | 333               | 111.6            | 26.5           | 228.6             | 62.2             | 23.4           | 117.3             | 25.8             | 12.6           | 13.2              | 22.1             | 0.4            | 3.5               | 4.5              | 0.0            | 2.6               | 0.24             | 1.11           |
| 108                    | 3.7                           | 35                 | 266.4             | 124.2            | 30.6           | 196.2             | 89.0             | 33.4           | 85.7              | 31.2             | 14.3           | 6.5               | 22.6             | 0.5            | 5.4               | 4.9              | 0.0            | 2.1               | 0.28             | 1.1            |
| 112                    | 3.8                           | 35                 | 275               | 132              | 27.8           | 189.0             | 85.0             | 21.2           | 85.2              | 27.6             | 12.3           | 9.1               | 23.6             | 0.5            | 6.9               | 5.6              | 0.0            | 2.9               | 0.25             | 1.23           |
| 116                    | 4.0                           | 80                 | 289.8             | 237.6            | 68.4           | 201.6             | 55.8             | 23.4           | 75.4              | 24.1             | 14.6           | 9.7               | 33.6             | 7.7            | 7.4               | 9.1              | 8.1            | 4.1               | 0.84             | 0.68           |
| 121                    | 3.8                           | 80                 | 269.5             | 131.4            | 93.6           | 97.2              | 30.6             | 19.8           | 45.1              | 17.2             | 12.0           | 9.5               | 25.9             | 7.7            | 4.7               | 6.8              | 6.5            | 3.5               | 0.75             | 0.6            |
| 123                    | 3.8                           | 80                 | 275.4             | 142.2            | 76.4           | 147.6             | 45.0             | 28.0           | 74.9              | 23.0             | 13.8           | 8.0               | 36.0             | 10.0           | 5.3               | 10.0             | 9.6            | 5.1               | 0.8              | 0.48           |

NOTA 1 En las tablas 9 y 10 los valores de las columnas anaerobia y aerobia representan al final de ambas fases

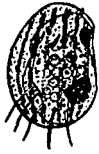
NOTA 2 Los valores subrayados corresponden a las corridas seleccionadas para observar el comportamiento de eliminación de nutrientes en cada ciclo

PROTOZOARIOS Y METAZOARIOS OBSERVADOS

Phylum Protozoa  
Clase Ciliata



*Acineta sp*



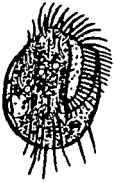
*Aspidisca sp*



*Colpidium sp*



*Chilodonella sp*



*Euplotes sp*



*Hemiophrys sp*



*Litonotus sp*



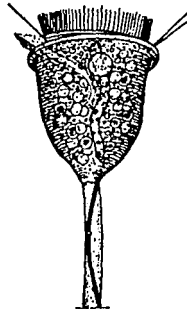
*Paramecium sp*



*Spirostomum sp*



*Urostyla sp*



*Vorticella sp*



*Zoothamnium sp*

**Clase Fitomastigophorea**



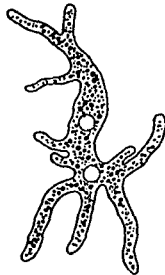
*Euglena sp*

**Clase Zoomastigophorea**



*Clamydomonas sp*

**Clase Rhizopodea**



*Amoeba sp*



## Phylum Asquelminta

Clase Gastrotrichia



*Chaetonotus sp*

Clase Rotifera



*Philodina roseola*

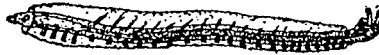
Clase Nematoda



*Monhystera sp*

## Phylum Anélida

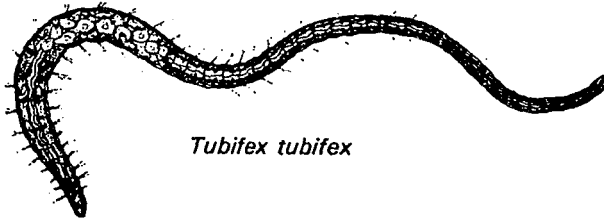
Clase anélida



*Dero sp*



*Lumbricillus lineatus*



*Tubifex tubifex*