

62

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DESARROLLO DEL SISTEMA DENOMINADO "PLACAS BIOLÓGICAS" EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERA QUIMICA PRESENTA: MONICA LOPEZ SANTOS

MEXICO, D. F.

1994

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: PROF. JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ**

**VOCAL: PROF. JESUS GONZALEZ PEREZ**

**SECRETARIO: PROF. L. M<sup>a</sup>. DE LOS ANGELES GONZALEZ ARREDONDO**

**1er. SUPLENTE: PROF. RODOLFO TORRES BARRERA**

**2do. SUPLENTE: PROF. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:**

**NACIONAL DE TECNOLOGIAS S.A. DE C.V.**

**CERRO TEPONAXTLE No. 139**

**COL. CAMPESTRE CHURUBUSCO**

**ASESOR DEL TEMA:**

**ING. JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ**

**SUPERVISOR TECNICO:**

**ING. DAVID GOMEZ SALAS**

**SUSTENTANTE:**

**MONICA LOPEZ SANTOS**

**A mis padres:**

**Agustín José López Navarrete  
Emma Santos Rodríguez**

*Por el apoyo invaluable que siempre me han brindado, gracias al cual he podido llegar a esta etapa.*

**A mis hermanos:**

**Nohemí  
Ulises  
Homero  
Héctor**

*Porque siempre unidos compartamos el logro de nuestros objetivos.*

**A Carlos Morales Valladarez**

*Por su gran ayuda y porque juntos alcancemos nuevas metas.*

Agradezco especialmente al:

**Ing. David Gómez Salas**

*Por su valioso apoyo, al compartir sus conocimientos y experiencias en la realización de este trabajo.*

y a:

**Nacional de Tecnologías S.A. de C.V.**

*por las facilidades otorgadas.*

**A mi escuela, la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.**

**Al Ing. Miguel Ángel de la Peña, Delegación Xochimilco**

**A la M. en I. Gabriela Moeller Chavez y al Dr. Pedro Martínez Pereda, de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Sección Ambiental UNAM.**

**A todos los profesores y personas que de alguna manera han contribuido en mi formación.**

---

**INDICE**


---

<b>CONTENIDO</b>	<b>No. HOJA</b>
Indice	I
Lista de figuras	III
Lista de tablas	IV
Introducción	V
<b>1. Aguas residuales domésticas</b>	<b>1</b>
1.1 Aspectos cuantitativos	1
1.2 Aspectos cualitativos	2
1.2.1 Características del agua residual doméstica	2
<b>2. Procesos Biológicos</b>	<b>8</b>
2.1 Microorganismos del agua	8
2.1.1 Bacterias	8
2.1.2 Algas	9
2.1.3 Hongos	10
2.1.4 Virus	11
2.2 Procesos Biológicos	11
2.3 Procesos Aerobios	12
2.3.1 Licor mezclado	12
2.3.2 Película fija	13
2.3.3 Mixtos	13
<b>3. Proceso de lodos activados</b>	<b>14</b>
3.1 Definición de símbolos usados	14
3.2 Relaciones cinéticas	18
3.3 Balance de materia para $Q_0$	20
3.4 Balance de materia para $S_0$	20
3.5 Balance de materia para $X_{V,0}$ y $X_{NV,0}$	21
3.6 Producción de lodos	21
3.7 Oxígeno Requerido	23
3.8 Requerimientos de potencia	25
3.9 Tiempo de residencia	25
3.10 Relación $F/M$ =Sustrato/microorganismos	26
3.11 Volumen del reactor	26
3.12 Cálculo de la recirculación	27

<b>4.</b>	<b>Sistemas de Película Fija</b>	<b>28</b>
	4.1 Contactores Biológicos Rotativos	28
	4.2 Filtros rociadores	35
	4.3 Torres empacadas	41
<b>5.</b>	<b>Placas biológicas</b>	<b>45</b>
	5.1 Ecuación general	45
	5.2 Concentración en flujo pistón	46
	5.3 Biodegradabilidad	48
<b>6.</b>	<b>Diseño de los módulos experimentales</b>	<b>49</b>
	6.1 Lodos activados con recirculación hidráulica	49
	6.1.1 Tanque de aireación	49
	6.1.2 Sedimentador secundario	53
	6.2 Placas biológicas	54
	6.2.1 Tanque de aireación	54
	6.2.2 Sedimentador secundario	55
<b>7.</b>	<b>Descripción de los módulos experimentales</b>	<b>56</b>
	7.1 Placas biológicas	56
	7.1.1 Tanque de aireación	57
	7.1.2 Sedimentador Secundario	58
	7.2 Lodos activados con recirculación hidráulica	58
	7.2.1 Tanque de aireación	58
	7.2.2 Sedimentador Secundario	60
	7.3 Equipo de aireación para ambos módulos	60
	7.4 Bomba dosificadora	61
<b>8.</b>	<b>Realización de pruebas</b>	<b>63</b>
	8.1 Instalación de los módulos experimentales	63
	8.1.1 Ubicación	63
	8.1.2 Sistema de alimentación del agua residual	64
	8.2 Secuencia de operación	65
	8.3 Muestreo y análisis	65
<b>9.</b>	<b>Resultados</b>	<b>70</b>
<b>10.</b>	<b>Procesos de tratamiento de lodos</b>	<b>87</b>
	10.1 Cantidad y características del lodo	87
	10.2 Tratamiento del lodo	88
	10.2.1 Digestión anaerobia	88
	10.2.2 Digestión aerobia.	88
	10.2.3 Tratamiento químico	89
	10.2.4 Tratamiento térmico	89
	10.2.5 Otros procesos de tratamiento	90
<b>11.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>91</b>
	<b>Apéndice A</b>	<b>93</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>100</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
3.1	Proceso de lodos activados.	16
3.2	Curva típica de concentración de sustrato soluble y SSVLM para un reactor batch.	19
4.1	Contactador biológico rotatorio.	30
4.2	Determinación de P y Ks	31
4.3	Curva obtenida en el estudio de NCR.	38
4.4	Comparación del funcionamiento de filtros rociadores para diferentes relaciones de recirculación.	39
4.5	Remoción de DBO <sub>5</sub> , torres empacadas.	43
5.1	Area bajo la curva (flujo pistón).	47
7.1	Módulos experimentales para el sistema de "placas biológicas".	56
7.2	Placas de malla plástica usada como empaque.	57
7.3	Módulo experimental para el sistema de "lodos activados con recirculación hidráulica".	59
7.4	Sistema de aeración.	61
7.5	Bomba y manguera "cortina aeradora".	62
8.1	Ubicación del cárcamo de bombeo.	63
8.2	Cárcamo de bombeo de aguas residuales domésticas.	64
8.3	Módulos experimentales en operación.	66
8.4	Comparación entre agua residual cruda y tratada.	67
8.5	Módulo de "Lodos activados c/recirc. hidráulica", 2a. etapa	68
8.6	Módulo de "Placas Biológicas 2a. etapa".	69
9.1	Resultados experimentales, DBO <sub>5</sub> , placas biológicas 1a. etapa.	72
9.2	Resultados experimentales, DBO <sub>5</sub> , lodos activados 1a. etapa.	74
9.3	Resultados experimentales, DQO, placas biológicas 1a. etapa.	76
9.4	Resultados experimentales, DQO, lodos activados 1a. etapa.	78
9.5	Resultados experimentales, DBO <sub>5</sub> , placas biológicas 2a. etapa.	80
9.6	Resultados experimentales, DBO <sub>5</sub> , lodos activados 2a. etapa.	82
9.7	Resultados experimentales, DQO, placas biológicas 2a. etapa.	84
9.8	Resultados experimentales, DQO, lodos activados 2a. etapa.	86



## LISTA DE TABLAS

TABLA		Página
1.1	Composición típica de aguas residuales domésticas.	4
2.1	Clasificación de los procesos biológicos.	12
4.1	Clasificación de filtros rociadores.	36
4.2	Características de las torres empacadas.	41
8.1	Programa de muestreo y análisis	67
9.1	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), placas biológicas 1a. etapa.	71
9.2	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), lodos activados 1a. etapa.	73
9.3	Demanda química de oxígeno (DQO), placas biológicas 1a. etapa.	75
9.4	Demanda química de oxígeno (DQO), lodos activados 1a. etapa.	77
9.5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), placas biológicas 2a. etapa.	79
9.6	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), lodos activados 2a. etapa.	81
9.7	Demanda química de oxígeno (DQO), placas biológicas 2a. etapa.	83
9.8	Demanda química de oxígeno (DQO), lodos activados 2a. etapa.	85
11.1	Porcentajes de remoción, 2a. etapa	91
11.2	Costos de tratamiento N\$/M <sup>3</sup> de agua tratada	92

---

## INTRODUCCION

---

En este trabajo se pretende contribuir con nuevos caminos para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico.

Tomando como base los fundamentos teóricos de los procesos biológicos de licor mezclado y película fija se desarrolló un sistema mixto de película fija sumergida en un tanque de aereación.

Las ventajas que se pretenden son contar con un sistema poco vulnerable desde los puntos de vista de proceso y mecánico.

Baja vulnerabilidad en el proceso porque los sistemas de película fija se recuperan más rápido a los episodios tóxicos o a las variaciones en cantidad y calidad del efluente.

Baja vulnerabilidad en la parte mecánica porque no tendrá partes en movimiento y se emplearán materiales plásticos que son inertes a la acción del agua residual.

Con estos propósitos se desarrolló conceptual y físicamente el sistema que se denominó "PLACAS BIOLÓGICAS".

Se determinaron teóricamente las dimensiones, el área de película fija, la aereación requerida para satisfacer el consumo de oxígeno y proporcionar el mezclado necesario, con los cuales se diseñó un modelo para llevar a cabo la experimentación.

Paralelamente, con la finalidad de comparar el sistema de placas biológicas, se construyó otro modelo para el sistema de lodos activados y se realizaron los experimentos en forma simultánea.

Los resultados obtenidos son alentadores ya que se lograron remociones de DBO del orden de 90%, para un influente con una concentración de 96.63 mg/l, con un tiempo de retención de 6.2Hr, en el caso del sistema de "Placas Biológicas".

Se produjeron lodos de alta sedimentabilidad, lo cual se comprobó obligando al lodo a hacer un recorrido por 4 tolvas que mostraron la diferencia de sedimentación entre la primera que fue abundante y la última que fue escasa.

Por lo anterior se estima que estos procesos mixtos podrán ser aplicados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas e incluso industriales, una vez determinada su tratabilidad por medios biológicos.

---

# CAPITULO 1

---

## AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

Las aguas residuales domésticas son el producto de agua potable más impurezas, proveniente de su uso en lavado de ropa, muebles, utensilios, baño personal y descargas sanitarias, junto con las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puedan agregarse, sin considerar las industriales<sup>1</sup>. Su estudio y tratamiento es de suma importancia por ser la principal fuente de generación de organismos patógenos, que constituyen un peligro para la salud pública<sup>2</sup>.

### 1.1 ASPECTOS CUANTITATIVOS

La dotación o abastecimiento promedio de agua potable es de 190 l/hab/día<sup>3</sup>, del cual se estima que del 60 al 70% corresponde a la descarga o aportación de aguas residuales. Estas cifras varían dependiendo de diversos factores, tales como:

- *Clima: A mayor temperatura aumenta la demanda promedio de agua potable y por tanto aumenta la aportación de aguas residuales.*
- *Tamaño de la población: A medida que las poblaciones crecen, la demanda de agua potable aumenta por el establecimiento de comercios y servicios.*
- *Disponibilidad: Limita o incrementa el consumo de agua potable.*

Un desglose del consumo doméstico de agua proporciona los diferentes usos en la siguiente forma<sup>4</sup>: 41% para descargas de sanitarios, 37% para aseo personal, 6% para uso culinario, 5% para uso potable, 4% para lavado de ropa, 3% para limpieza general del hogar, 3% para riego de jardines y 1% para lavado del carro familiar.

---

<sup>1</sup> STEEL Ernest W., *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 339.

<sup>2</sup> FAIR, Geyer, Okun., *Purificación de Aguas, Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales*, 1a. ed. México. Limusa, S.A. de C.V., 1971. p. 14.

<sup>3</sup> *Ibidem*, pp. 71, 158.

<sup>4</sup> *Ibidem* p. 150.

## 1.2 ASPECTOS CUALITATIVOS

El conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales domésticas es esencial en el diseño y operación de los sistemas de captación, tratamiento y disposición.

La calidad del agua residual es congruente con las actividades que la generan, las descargas domésticas contienen principalmente materia orgánica, nutrientes, grasas, aceites, sólidos y organismos patógenos.

Basándose en la composición del agua residual doméstica puede ser clasificada de acuerdo a valores máximos, medios y mínimos<sup>5</sup>. En la Tabla 1.1 se presenta dicha clasificación, con los datos típicos de concentración y composición.

### 1.2.1. CARACTERISTICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMESTICA

El agua residual doméstica fresca tiene un aspecto ligeramente aceitoso, jabonoso y es turbia. El agua en estado séptico tiene un pronunciado olor a ácido sulfhídrico, su color es gris oscuro y contiene sólidos suspendidos de menor tamaño. A temperatura del orden de 20°C el agua residual pasa de su condición fresca a séptica en un tiempo variable de 2 a 6 horas, dependiendo principalmente de la concentración de la materia orgánica<sup>6</sup>.

La característica física más importante del agua residual es su contenido total de sólidos, el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución.

Los sólidos domésticos incluyen los procedentes de inodoros, fregaderos, baños y lavaderos.

### SOLIDOS TOTALES

Analicamente, el contenido total de sólidos de un agua residual se define como toda materia que queda como residuo de evaporación de 103 a 105 °C<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.241.

<sup>6</sup> STEEL Ernest W., Abastecimiento de Agua y Alcantarillado, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 453.

<sup>7</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.244.

Los sólidos totales o residuos de evaporación pueden clasificarse como sólidos suspendidos y disueltos pasando un volumen conocido a través de un filtro, (el diámetro mínimo de los sólidos suspendidos es de aproximadamente una micra); la fracción de sólidos suspendidos incluyen los sólidos sedimentables que se asentarán en un cono Imhoff, en un periodo de 60 minutos<sup>8</sup>. Estos sólidos son una estimación de la cantidad de lodos que se podría remover por medio de una sedimentación primaria.

Los sólidos disueltos contienen sólidos coloidales (partículas con un diámetro aproximado de  $1\mu$  a  $1\mu$ ) y sólidos disueltos con moléculas orgánicas e inorgánicas de iones que están presentes en solución en el agua. Para remover estas partículas se requiere en general la oxidación biológica, seguida de una sedimentación.

Cada una de las categorías de sólidos descritas anteriormente pueden clasificarse a su vez en base a su volatilidad a  $600^{\circ}\text{C}$ . A esta temperatura, la fracción orgánica se evaporará en forma de gas y la fracción inorgánica permanecerá en forma de ceniza, de aquí los términos de sólidos suspendidos volátiles y fijos, así como sólidos disueltos fijos y volátiles.

### DBO<sub>5</sub> (DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO)

El principal parámetro de calidad del agua más ampliamente utilizado para describir la contaminación orgánica es la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), que es la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar la materia orgánica biodegradable de un agua residual, por una población heterogénea de microorganismos, principalmente bacterias, en condiciones aerobias, durante cinco días a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ <sup>10</sup>.

Para las aguas residuales domésticas, el valor de la DBO<sub>5</sub> representa aproximadamente las dos terceras partes de la demanda que sería ejercida si se oxidara toda la materia oxidable por vía biológica<sup>11</sup>. Los datos de DBO se utilizan para dimensionar las instalaciones de tratamiento y para medir la eficiencia de remoción de materia orgánica de ciertos procesos de tratamiento de agua. También sirve para calcular la velocidad a la que deberá suministrarse el oxígeno.

<sup>8</sup> *Ibidem*, p. 245.

<sup>9</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.245.

<sup>10</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.252.

<sup>11</sup> STEEL Ernest W., Abastecimiento de Agua y Alcantarillado, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 458.

**CARBON ORGANICO TOTAL (COT)**

Otro medio para medir la materia orgánica presente en el agua es el COT, especialmente aplicable a pequeñas concentraciones de materia orgánica.

**TABLA 1.1 COMPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS**

(Valores en mg/L a menos que se especifique otro)

CONSTITUYENTES	CONCENTRACION		
	Máxima	Media	Mínima
Sólidos Totales	1200	700	350
Disueltos Totales	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos Totales	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos Sedimentables (ml/L)	20	10	5
DBO <sub>5</sub>	300	200	100
Carbono Orgánico Total (COT)	300	200	100
DQO	1000	500	250
Nitrógeno Total (como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo Total (como P)	20	10	6
Orgánico	5	3	2
Inorgánico	15	7	4
Cloruros *	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> ) *	200	100	50
Grasas	150	100	50

\* Los valores aumentarán con la cantidad presente en el agua de suministro.

Datos tomados de: METCALF-Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed., España, Labor, S.A. 1977, p.241.

### DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La determinación de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales que contengan tóxicos para la vida biológica.

La Demanda Química de Oxígeno corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o permanganato en medio ácido<sup>12</sup>.

La DQO por lo general es mayor que la DBO porque es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente.

### COLIFORMES FECALES Y TOTALES

El tracto intestinal del hombre contiene innumerables bacterias en forma de bastoncillo conocidas como organismos coliformes. Cada persona evacua de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes por día, además de otras clases de bacterias.

Los organismos patógenos son evacuados por los seres humanos que se ven afectados por alguna enfermedad o que sean portadores de alguna enfermedad en particular. Dado que el número de organismos patógenos presentes en las aguas residuales son muy pocos y difíciles de aislar, el organismo coliforme, que es más numeroso y de determinación más sencilla, se utiliza como organismo indicador.

La presencia de organismos coliformes se interpreta como una indicación de que los organismos patógenos también pueden estar presentes y su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedades<sup>13</sup>.

El uso de los coliformes como organismos indicadores es problemática debido a que la *Aerobacter* y ciertas especies de *Escherichia* pueden crecer en el suelo. Por tanto, la presencia de coliformes no siempre significa contaminación con residuos humanos.

<sup>12</sup> RAMALHO Rubens S., Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed, traducido al español, España Reverté, S.A., 1991, p. 29.

<sup>13</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español, España, Labor, S.A., 1977, p.276.



## NUTRIENTES

Los compuestos de nitrógeno y fósforo son nutrientes básicos en el metabolismo de los organismos acuáticos.

La contaminación de un curso de agua por un fuerte crecimiento orgánico, estimulado por nutrientes inorgánicos se conoce como eutroficación.

Los organismos de que se trata son principalmente los microorganismos fotosintéticos llamados algas, su crecimiento tiende a estar controlado por la disponibilidad de los compuestos de nitrógeno y fósforo, produciendo una capa antiestética verde de lama sobre la superficie acuática.

## SAAM (Substancias activas al azul de metileno)

Los agentes tensoactivos son grandes moléculas orgánicas, ligeramente solubles en agua, que causan espumas en las plantas de tratamiento así como en las aguas a las que se vierten efluentes residuales.

Los agentes tensoactivos tienden a acumularse en la interfase aire-agua durante la aereación del agua residual, estos compuestos tienden a acumularse en la superficie de las burbujas de aire causando por ello una espuma muy estable.

## GRASAS Y ACEITES

Las grasas y los aceites son compuestos sumamente estables y de difícil descomposición por las bacterias. Las grasas y aceites de las aguas residuales domésticas provienen principalmente de la mantequilla, manteca de cerdo, margarinas, grasas, aceites vegetales, semillas, etc., además de los aceites lubricantes que llegan a los drenajes en volúmenes considerables provenientes de cocheras, talleres mecánicos y de las calles.

La mayor parte flota sobre las aguas residuales, aunque una parte se arrastra con los sólidos sedimentables. Tienden a cubrir la superficie del agua, interfieren con la acción biológica de las aguas superficiales y crean cúmulos de material flotante, formando películas de aspecto desagradable.

## TOXICOS

Los compuestos orgánicos que se encuentran a nivel de trazas tales como pesticidas, herbicidas y otros productos químicos usados en la agricultura, son tóxicos para gran número de formas de vida y, por tanto pueden llegar a ser peligrosos contaminantes.

Estos productos químicos no son constituyentes comunes del agua residual sino que suelen incorporarse fundamentalmente como consecuencia de los escurrimientos de zonas agrícolas, parques, calles, cocheras, etc.

---

## CAPITULO 2

---

### PROCESOS BIOLÓGICOS

El tratamiento biológico consiste en la aplicación controlada de procesos naturales por los cuales los microorganismos eliminan la materia orgánica disuelta y coloidal del agua residual, al mismo tiempo que ellos sufren un proceso de eliminación.

A fin de llevar a cabo este proceso natural en un tiempo razonable, es preciso disponer de un gran número de microorganismos en un reactor de tamaño relativamente pequeño.

Los objetivos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso de agua residual doméstica, el principal objetivo es reducir el contenido orgánico.

En la mayoría de los casos, el agua residual puede ser tratada biológicamente si se consigue un estricto control de las condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos.

#### 2.1 MICROORGANISMOS DEL AGUA

El entendimiento de la forma, estructura y actividades bioquímicas de los microorganismos importantes es básico para el diseño de un proceso de tratamiento biológico.

##### 2.1.1 BACTERIAS

Los microorganismos más empleados en el tratamiento biológico de las aguas residuales son las bacterias.

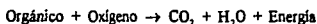
Una bacteria puede medir de 0.5 a 5 $\mu$  aproximadamente. Existen diferentes formas de bacterias, tales como<sup>1</sup>:

---

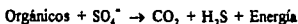
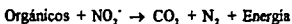
<sup>1</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.344.

- 1) Alargadas, llamadas bacilos.
- 2) Esféricas, llamadas cocos.
- 3) Espirales, llamadas espirilos.

Adicionalmente, se pueden clasificar en dos grupos, dependiendo de su acción frente al oxígeno libre: las que requieren oxígeno libre se denominan "aerobias", no pueden vivir en ausencia de oxígeno, el cual debe estar disponible en forma de oxígeno libre disuelto, produciendo energía para su desarrollo y multiplicación como se representa en la siguiente ecuación:



Los organismos que crecen en ausencia de oxígeno libre se llaman "anaerobios", el oxígeno libre es un tóxico para ellos e incluso pueden morir debido a su presencia en el medio ambiente en que se desenvuelven. Usan el oxígeno que existe en moléculas formadas con otros elementos, como son los nitratos y sulfatos, representados por las siguientes ecuaciones:



### 2.1.2 ALGAS

Las algas son plantas generalmente microscópicas de formas simples que crecen en los lechos de los ríos, impartiendo una coloración verdosa al agua. En general, ingieren materia inorgánica y utilizan la luz solar como fuente de energía.

Las algas consumen dióxido de carbono del aire y del agua en presencia de luz y sin ella realizan el proceso de respiración. Cuando están presentes en la corriente concentraciones extraordinariamente grandes de nitratos o fosfatos, aparece un considerable crecimiento de algas.

La contaminación de un cuerpo de agua por un fuerte crecimiento orgánico estimulado por nutrientes inorgánicos se conoce como eutroficación, lo cual es indeseable ya que aparte de su aspecto antiestético, existen dos puntos clave:

En primer lugar, la fotosíntesis implica la creación de materia orgánica a partir de materiales inorgánicos, y por tanto, la producción de cantidades de sustancias orgánicas donde antes sólo existían pocas.

Cuando los organismos fotosintéticos mueren sus componentes se convierten en nutrientes orgánicos, ejerciendo una demanda de oxígeno sobre la corriente acuática.

En segundo lugar, en ausencia de luz las algas usan el oxígeno para su proceso de respiración, oxidando compuestos orgánicos previamente fotosintetizados. En efecto, almacenan la energía luminosa en la forma de energía química, para usarla en ausencia de luz.

Un fuerte crecimiento de algas puede producir saturación de oxígeno disuelto en una corriente de agua durante el día y a la vez podrá causar una seria desoxigenación durante la noche.

Cuando existen cantidades grandes de algas en la superficie del agua, impiden el paso de la luz a los estratos inferiores y las algas en esta zona utilizan el oxígeno para respirar, aún de día.

### 2.1.3 HONGOS

Los hongos son considerados como organismos protistas multicelulares, heterótrofos y por lo tanto no fotosintéticos, obligados a utilizar la materia orgánica como fuente de energía y carbono.

La forma predominante de crecimiento es filamentosa, los filamentos individuales son llamados hifa (*hyphae*), las cuales son largas ramas de estructura tubular que se elongan en la punta.

La mayoría de los hongos son aerobios y tienen la habilidad de crecer bajo condiciones de baja humedad y pueden tolerar un medio ambiente con un pH relativamente bajo. El pH óptimo para la mayoría de las especies es alrededor de 5 a 6, siendo el rango de supervivencia entre 2 y 9. Los hongos tienen también un bajo requerimiento de nitrógeno, aproximadamente la mitad del requerido por las bacterias.

La habilidad de los hongos para sobrevivir bajo condiciones de pH bajos y limitación de nitrógeno, hace que ellos sean importantes en el tratamiento biológico de algunas aguas residuales industriales y en el composteo de sólidos orgánicos.

#### 2.1.4 VIRUS

Un virus es la más pequeña estructura biológica que contiene toda la información necesaria para su propia reproducción.

Todos son parasitarios y no pueden crecer fuera de otro organismo vivo. Son altamente específicos tanto en lo que concierne al organismo huésped como a la enfermedad que producen.

Muchos virus que producen enfermedades al hombre se sabe que son excretados en las heces humanas. Los efluentes de aguas residuales normalmente contienen grandes cantidades de virus, que también están presentes en la mayoría de aguas superficiales sujetas a contaminación. Por su tamaño, la remoción de virus por procesos convencionales de tratamiento de agua no es segura, aunque los procesos normales de desinfección generalmente los dejan inactivos.

#### 2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS

El tratamiento biológico de las aguas residuales se clasifica de acuerdo a la presencia o ausencia de oxígeno molecular (aerobios o anaerobios, respectivamente) o a la combinación de ambos (facultativos).

En la tabla 2.1 se presenta los procesos antes mencionados, indicando algunos de los principales sistemas pertenecientes a cada clasificación:

En los procesos anaerobios la materia orgánica es descompuesta por bacterias anaerobias transformándola en materia celular y gases, tales como metano, dióxido de carbono y compuestos de azufre como mercaptanos y bióxido. No requiere de oxígeno libre para la respiración de los microorganismos.

En los procesos aerobios la materia orgánica es descompuesta por bacterias aerobias transformándola en materia celular, produciendo agua y dióxido de carbono. Requiere de oxígeno libre para la respiración de los microorganismos.

Los procesos biológicos más empleados son los aerobios, ya que los anaerobios presentan inconvenientes como la producción de malos olores y proliferación de moscas, además de producir un efluente muy agresivo desde el punto de vista bacteriológico, por lo que se descarta su aplicación en zonas urbanas y poco ventiladas.

## 2.3 PROCESOS AEROBIOS

Como se puede apreciar en la Tabla 2.1, dentro de los procesos biológicos aerobios, se encuentran clasificados los siguientes:

### 2.3.1 LICOR MEZCLADO

Los microorganismos se encuentran suspendidos en los tanques de aereación, lo cual les permite estar en contacto con la materia orgánica soluble que utilizan como sustrato o alimento. La aereación proporciona la mezcla para el choque de los microorganismos con la comida y también proporciona el oxígeno que se requiere para oxidar biológicamente la materia orgánica y para la respiración de los microorganismos.

**TABLA 2.1 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS**

PROCESOS BIOLÓGICOS	CARACTERÍSTICA	PRINCIPALES PROCESOS
<b>Anaerobios</b>	Cinética Natural	Fosas Sépticas Tanques Imhoff
<b>Facultativos</b>	Cinética Natural	Lagunas de Oxidación Lagunas Facultativas
<b>Aerobios</b>	Licor Mezclado	Lodos Activados Aereación Extendida Zanjas de Oxidación Lagunas Aereadas
<b>Aerobios</b>	Película Fija	Filtros Rociadores Biofiltros o Torres Empacadas Biodiscos
<b>Aerobios</b>	Mixtos	Lechos Fluidizados "Placas Biológicas"

### 2.3.2 PELICULA FIJA

Los microorganismos se encuentran adheridos a una superficie de plástico o piedra, formando una película biológica, que entra en contacto con la materia orgánica disuelta para alimentarse de esta.

La aereación se lleva a cabo generalmente por exposición al aire de la atmósfera de donde toman el oxígeno para la respiración, ya sea porque se hace pasar el agua a través de un lecho empacado como en el proceso de los biofiltros; o bien, porque el medio plástico entra y sale continuamente en el tanque que contiene el agua residual, como en el caso de los biodiscos.

### 2.3.3 MIXTOS

Resultan de la combinación de los procesos de licor mezclado y película fija.



---

## CAPITULO 3

---

### PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

El proceso de lodos activados, se basa en el principio básico de poner en contacto las aguas residuales con una población microbiana mixta, en forma de suspensión flocculenta en un sistema aereado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flocúlos microbianos, para formar un lodo<sup>1</sup>. La observación microscópica de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, los cuales cambian naturalmente en respuesta a la variación en la composición del agua residual y las condiciones que los rodean.

El proceso de lodos activados ha sido desarrollado como una operación continua con recirculación de lodo biológico para mantener la concentración de los lodos en el tanque de aereación al nivel necesario para un tratamiento efectivo y para que actúe como inóculo microbiano. Parte de los lodos se extraen para su descarga y se conocen como "lodos activados desechados o excedentes". La Figura 3.1 presenta un diagrama del proceso de lodos activados, en el que se indican sus principales variables.

#### 3.1 DEFINICION DE SIMBOLOS USADOS<sup>2</sup>

Para los sólidos en suspensión se emplean dos subíndices, por ejemplo,  $X_{V,j}$   $X_{NV,i}$ . El primer subíndice (V o NV) designa el carácter volátil o no volátil de los sólidos en suspensión, respectivamente.

El segundo subíndice (i) se refiere a la corriente específica de que se trate:

- alimentación fresca (corriente 1)
- alimentación combinada (corriente 2)
- efluente del reactor (corriente 3)
- líquido efluente (corriente 4)
- flujo inferior del clarificador secundario (corriente 5)

---

<sup>1</sup> WINKLER Michael, *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*, 1a. ed. México, Limusa, S.A. de C.V., 1986, p. 87.

<sup>2</sup> RAMALHO Rubens S., *Tratamiento de Aguas Residuales*, 1a. ed, traducido al español, España Reverté, S.A., 1991, p. 255.

**SÍMBOLOS:****1. Flujos** $Q_F$ , alimentación fresca ( $m^3/seg$ ) [corriente 1] $Q_R$ , recirculación ( $m^3/seg$ ) [corriente 7] $r$ , relación de recirculación ( $r = Q_R/Q_F$ ) $Q_O$ , alimentación combinada ( $m^3/seg$ );  $Q_O = Q_F + Q_R = Q_F(1+r)$   
[corriente 2];  $Q_O$  [corriente 2] =  $Q_O$  [corriente 3] $Q_e$ , efluente líquido ( $m^3/seg$ ) [corriente 4] $Q_w$ , lodos de desecho ( $m^3/seg$ ) [corriente 6].  $Q_F = Q_e + Q_w$  $Q_u$ , caudal inferior del sedimentador ( $m^3/seg$ );  $Q_u = Q_w + Q_r$  $Q_u = Q_w + rQ_F$  [corriente 5]**2. Concentración de DBO soluble ( $mg/L$ )** $S_F$ , DBO soluble de la alimentación fresca $S_O$ , DBO soluble de la alimentación combinada $S_e$ , DBO soluble del efluente**3. Concentración de Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) ( $mg/L$ )** $X_{V,F}$ , SSV en la alimentación fresca $X_{V,O}$ , SSV en la alimentación combinada $X_{V,a}$ , SSV en el reactor. Es la misma concentración de SSV en el efluente del reactor. $X_{V,u}$ , SSV en el flujo inferior del sedimentador secundario $X_{V,e}$ , SSV en el efluente del líquido.**4. Concentración de Sólidos Suspendedos No Volátiles (SSNV) ( $mg/L$ )** $X_{NV,F}$ , SSNV en la alimentación fresca $X_{NV,O}$ , SSNV en la alimentación combinada $X_{NV,a}$ , SSNV en el reactor ( $X_{NV,a} = X_{NV,O}$ ) $X_{NV,u}$ , SSNV en el flujo inferior del sedimentador secundario $X_{NV,e}$ , SSNV en el efluente líquido**5. Lodos de desecho** $(SSV)_w$ , Kg/día de SSV en el lodo de desecho $(SSNV)_w$ , Kg/día de SSNV en el lodo de desecho $(SST)_w$ , Kg/día de SST en el lodo de desecho.

6. Volumen del reactorV, Volumen del reactor ( $m^3$ )7. Producción de lodos $\Delta X_v$  (Kg/día)

En la Figura 3.1, las composiciones de las diferentes corrientes (numeradas del 1 al 7) están caracterizadas por 3 tipos de concentraciones:

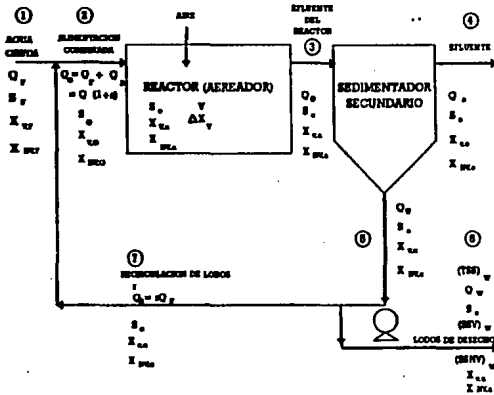


Figura 3.1 Proceso de lodos activados.

Tomado de: Ramalho Rabens S., Tratamiento de aguas residuales, 1a. ed. traducida al español. España, Reverte, S.A. 1991, p. 254.

**1.- Concentración de la DBO Soluble<sup>3</sup>.** Se simboliza mediante  $S_1$  y está formada por compuestos carbonosos en disolución. El diseño de las plantas de lodos activados está basado en la remoción de la DBO soluble. Esta remoción es el resultado del proceso de oxidación biológica.

<sup>3</sup> *Ibidem*, p. 254.

La alimentación del agua residual (*corriente 1*) entra al proceso con un valor  $S_F$ . El propósito del tratamiento es reducir este valor a  $S_e$  (*corriente 4*) por oxidación a través de la degradación biológica aerobia de la materia orgánica contenida en el agua residual.

En el proceso convencional de lodos activados hay una reducción de DBO soluble al 5-15 % del valor de alimentación, por tanto,  $S_e = 5-15\%$  de  $S_F$ . Esto representa una eficiencia de remoción de DBO soluble del 85-95 %.

La alimentación es combinada con los lodos de recirculación (*corriente 7*) y entra al reactor (*corriente 2*).

Para el reactor se toman en cuenta dos consideraciones fundamentales: 1) Régimen permanente y 2) Completamente mezclado.

El lodo  $\Delta X_v$  es continuamente formado en el reactor. La concentración de DBO soluble en el licor del reactor es denotado como  $S_e$ . Bajo condiciones de régimen permanente y completamente mezclado, la concentración de DBO soluble del efluente del reactor (*corriente 3*) también es igual a  $S_e$ .

El efluente del reactor se alimenta al sedimentador secundario. La corriente inferior de éste, se divide en dos, una salida y una recirculación, conservando ambas el mismo valor de  $S_e$ . El lodo recirculado es combinado con la alimentación para formar una alimentación combinada, cuya concentración se denota por  $S_0$ .

## 2.- Concentración de los Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)

En el proceso convencional de lodos activados, esta concentración se denota como  $X_{v,a}$ , usualmente seleccionado entre 2,000 y 3,000 mg/L<sup>4</sup>. Estos sólidos son referidos al licor mezclado como SSVLM (Sólidos suspendidos en el licor mezclado).

Similarmente, los sólidos suspendidos no volátiles son referidos como SSNVLM y los sólidos suspendidos totales como SSLM, por tanto:

$$SSLM = SSVLM + SSNVLM$$

Los sólidos suspendidos volátiles son producidos continuamente durante la aereación. La síntesis biológica de la materia da la cantidad de SSVLM en el reactor ( $\Delta X_v$  Kg/día). Es necesario mantener constante la concentración de SSVLM en el reactor, para remover una cantidad igual  $\Delta X_v$ .

<sup>4</sup> Ibíd., p. 257.

La descarga de lodos (*corriente S*) contiene una concentración de SSV designado como  $X_{V,U}$  ( $X_{V,U} > X_{V,B}$ ). Usualmente el valor de  $X_{V,U}$  es seleccionado entre 10,000 y 15,000 mg/L de SSV<sup>3</sup>. El efluente del clarificador tiene una concentración de SSV ( $X_{V,e}$ ) frecuentemente insignificante.

### 3.- Sólidos Suspendidos no Volátiles (SSNV)

La concentración de SSNVLM en el reactor es denotado como  $X_{NV,a}$  y es la misma en la alimentación combinada y en el efluente del reactor, esto es porque se encuentra totalmente mezclado y no hay producción de SSNV en el tanque de aeración:

$$X_{NV,a} = X_{NV,o}$$

La concentración de la alimentación fresca es designada como  $X_{NV,F}$ , la de la recirculación de lodos como  $X_{NV,U}$  y la alimentación combinada es denotada como  $X_{NV,o}$ .

Los SSNV en el efluente del reactor son separados por sedimentación en el sedimentador secundario, obteniéndose en la descarga de lodos con una concentración  $X_{NV,U}$  y en el agua del efluente con  $X_{NV,u}$ , que generalmente es insignificante.

## 3.2 RELACIONES CINÉTICAS

El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan un residuo específico y por lo tanto suministran la información básica necesaria para desarrollar el tamaño de los reactores biológicos aerobios. Esto se lleva a cabo experimentalmente, determinando la concentración de sustrato S, del agua residual (medido como DBO soluble o DQO) a intervalos de tiempo seleccionados mediante la extracción de muestras para su análisis. La masa de lodo biológico acumulado (SSVLM) es también analizada a los mismos intervalos para determinar su concentración. A continuación se presenta una curva típica de la concentración de S y de la variación de la cantidad de SSVLM con respecto al tiempo (Figura 3.2).

La concentración del sustrato soluble S del agua residual, la cual es medida por la concentración de materia orgánica decrece con el tiempo al ser oxidada la materia orgánica.

La concentración de SSVLM se incrementa durante el período en el cual está presente una cantidad considerable de sustrato para proveer de abundante comida a los microorganismos para su desarrollo. Este crecimiento corresponde a la síntesis celular de nuevos microorganismos, indicada en la figura anterior como "fase de síntesis".

<sup>3</sup> *Ibidem*, p. 258.

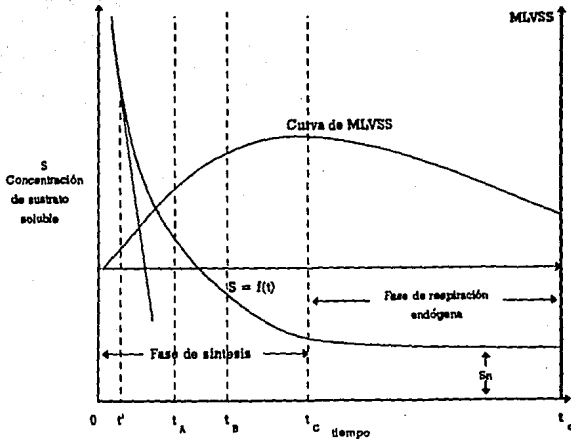


Figura 3.2 Curva típica de la concentración de sustrato soluble y SSVLM para un reactor batch

Tomado de: Ramalho Rubens S., Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed., traducida al español, España. Reverte, S.A., 1991, p. 261.

Después de un tiempo  $t_C$ , cuando la concentración de sustrato ha disminuido ya no hay suficiente comida y a partir de este punto los microorganismos comienzan a consumirse entre ellos mismos. Cuando esta "fase de canibalismo" tiene lugar, la concentración de SSVLM disminuye, ya que la velocidad de destrucción de microorganismos excede a la de síntesis de nuevas células. Esto corresponde a la "fase de respiración endógena".

Los datos cinéticos obtenidos para un reactor batch son resumidos en dos corolarios que a continuación se describen, el 2o. es comúnmente empleado para el diseño de reactores biológicos continuos.

- *1ro.* A altas concentraciones de sustrato, la remoción sigue una cinética de orden cero. Esto indica que la velocidad de remoción es esencialmente constante, independientemente de la concentración del sustrato. Esto corresponde a la sección de la figura anterior del tiempo 0 a t'.
- *2do.* La remoción de sustrato a bajas concentraciones (correspondiente a valores de DBO menores de 500 mg/l) sigue una cinética de 1er. orden, por lo que la velocidad de remoción es proporcional a la concentración de sustrato. En la figura 3.2 corresponde a la región entre los tiempos t<sub>A</sub> y t<sub>C</sub>.

### 3.3. BALANCE DE MATERIA PARA Q<sub>0</sub><sup>6</sup>

La corriente de alimentación combinada (Q<sub>0</sub>, m<sup>3</sup>/s) es calculada por la relación de recirculación, r, y la corriente de alimentación fresca Q<sub>F</sub>, la cual es:

$$r = Q_R / Q_F$$

$$Q_R = r Q_F$$

$$Q_0 = Q_F + Q_R = Q_F (1+r)$$

### 3.4 BALANCE DE MATERIA PARA S<sub>0</sub><sup>7</sup>.

La concentración de la DBO en la alimentación combinada (S<sub>0</sub>) es calculada por un balance al rededor de la conjunción de la alimentación fresca y la recirculación del lodo para formar la alimentación combinada.

$$\text{DBO entrada} = Q_F S_F + Q_R S_e = Q_F S_F + r Q_F S_e$$

$$\text{DBO salida} = Q_0 S_0 = Q_F (1+r) S_0$$

En condiciones de régimen permanente:

$$Q_F S_F + r Q_F S_e = Q_F (1+r) S_0$$

Por tanto, la concentración de la DBO en el influente con recirculación es:

$$S_0 = \frac{(S_F + r S_e)}{(1+r)}$$

<sup>6</sup> *Ibidem*, p. 315.

<sup>7</sup> *Ibidem*, p. 315.

### 3.5 BALANCES DE MATERIA PARA $X_{V,o}$ y $X_{NV,o}$ <sup>8</sup>

La concentración de sólidos volátiles,  $X_{V,o}$ , es establecido a partir de un balance de materia en la unión de la alimentación fresca,  $Q_F$ , y la recirculación  $Q_R$ .

$$SSV_{\text{entrada}} = Q_F X_{V,F} + Q_R X_{V,U}$$

$$SSV_{\text{salida}} = Q_o X_{V,o}$$

En condiciones de régimen permanente:

$$Q_F X_{V,F} + Q_R X_{V,U} = Q_o X_{V,o}$$

$$Q_F X_{V,F} + r Q_F X_{V,U} = Q_F (1 + r) X_{V,o}$$

La concentración de SSV en la alimentación combinada es:

$$X_{v,o} = \frac{(X_{v,F} + r X_{v,U})}{(1+r)}$$

Planteando un balance de materia similar para la concentración de sólidos en suspensión no volátiles en la alimentación combinada ( $X_{NV,F}$ ) se obtiene:

$$X_{NV,o} = \frac{(X_{NV,F} + r X_{NV,U})}{(1+r)}$$

### 3.6 PRODUCCION DE LODOS

#### BIOMASA PRODUCIDA PARA LA REMOCION DE SUSTRATO<sup>9</sup>

Un parámetro involucrado en la cantidad de producción de lodos es:

$$Y = \frac{\text{Kg de SSVLM}_{\text{producida}}}{\text{Kg de sustrato total}_{\text{removida}}}$$

<sup>8</sup> *Ibidem*, p. 316.

<sup>9</sup> *Ibidem*, p. 284.



Consecuentemente representa la producción de lodo biológico por Kg de sustrato removido.

$$\text{Kg de SSVLM}_{\text{producidos}} = Y (\text{Kg de sustrato total removido})$$

$$\text{Kg de SSVLM}_{\text{producidos}} = Y(S_0 - S_e)Q_0 = Y(S_0 - S_e)Q_f(1+r)$$

### BIOMASA PERDIDA POR RESPIRACION ENDOGENA<sup>10</sup>

Un parámetro correspondiente a la respiración endógena que involucra la oxidación de materia celular es  $k_d$ , cuya definición es:

$k_d$  = fracción de SSVLM por unidad de tiempo oxidada durante el proceso de respiración endógena.

Un valor de  $k_d = 0.1 \text{ día}^{-1}$  indica que el 10 % de los Kg totales de SSVLM presentes en el reactor continuo es oxidado por día.

$$k_d = \text{Kg de SSVLM}_{\text{oxidados}} / (\text{día})(\text{Kg de SSVLM}_{\text{en el reactor}})$$

De donde:

$$\text{Kg/día de SSVLM}_{\text{oxidados}} = k_d(\text{Kg de SSVLM}_{\text{en el reactor}})$$

Asumiendo régimen permanente los SSVLM presentes en el reactor continuo, es constante:

$$\text{Kg de SSVLM}_{\text{en el reactor}} = X_v, aV$$

Por lo tanto:

$$\text{Kg/día de SSVLM}_{\text{oxidados}} (\text{respiración endógena}) = k_d X_v, aV$$

### PRODUCCION TOTAL DE LODOS<sup>11</sup>

Se obtiene por la diferencia entre los SSVLM producidos y los perdidos en respiración endógena:

$$\text{Kg/día de SSVLM} = \Delta X_v = Y(S_0 - S_e)Q_f(1+r) - k_d X_v, aV$$

<sup>10</sup> *Ibidem*, p. 284.

<sup>11</sup> *Ibidem*, p. 285.

### 3.7 OXIGENO REQUERIDO:

#### OXIGENO REQUERIDO PARA LA OXIDACION DEL SUSTRATO<sup>12</sup>

$a = \text{Kg Oxígeno utilizado para la oxidación del sustrato/Kg de sustrato total removido}$

$\text{Kg de O}_2/\text{día} = a (\text{Kg de sustrato total removido})$

$\text{Kg de O}_2/\text{día} = a(S_o - S_e)Q_o = a(S_o - S_e)Q_F(1 + r)$

#### OXIGENO REQUERIDO EN LA RESPIRACION ENDOGENA<sup>13</sup>

El parámetro  $b$  está definido como los Kg de oxígeno utilizado por día por Kg de SSVLM en el reactor en el proceso de respiración endógena:

$b = \text{Kg O}_2/(\text{día})(\text{Kg de SSVLM en el reactor})$

De donde:

$\text{Kg O}_2/\text{día} = b(\text{Kg de SSVLM en el reactor})$

Por lo tanto:

$\text{Kg O}_2/\text{día} (\text{Respiración endógena}) = bX_v, aV$

#### OXIGENO TOTAL REQUERIDO<sup>14</sup>

Se obtiene sumando los resultados de los dos incisos anteriores:

$\text{Kg O}_2/\text{día} = \text{Kg O}_2/\text{día} + \text{Kg O}_2/\text{día}$

$\text{Kg O}_2/\text{día} = a(S_o - S_e)Q_F(1+r) + bX_v, aV$

A continuación se presentan los valores típicos de los parámetros biocinéticos ( $k$ ,  $Y$ ,  $k_d$ ,  $a$  y  $b$ ) para el tratamiento de aguas residuales domésticas<sup>15</sup>:

<sup>12</sup> *Ibidem*, p. 282.

<sup>13</sup> *Ibidem*, p. 283.

<sup>14</sup> *Ibidem*, p. 283.

<sup>15</sup> *Ibidem*, p.312.

- $k = 0.017 - 0.03 \text{ día}^{-1}$
- $Y = 0.73 \text{ Kg SSVLM/Kg de DBO}_{\text{removido}}$
- $kd = 0.075 \text{ Kg SSVLM}_{\text{oxidado}}/(\text{Kg SSVLM}_{\text{en el reactor}})(\text{día})$
- $a = 0.52 \text{ Kg de O}_2/(\text{día})(\text{Kg DBO}_5 \text{ removido})$
- $b = 0.106 \text{ Kg de O}_2/(\text{día})(\text{Kg de SSVLM}_{\text{en el reactor}})$

En el caso de aguas residuales, la concentración de saturación del  $\text{O}_2$  en el agua residual ( $C_{sw}$ ) es:

$$C_{sw} = B C_s$$

Donde:

$B$  = Es el coeficiente de saturación del  $\text{O}_2$  en el agua residual con respecto al coeficiente de la agua limpia.

Generalmente toma valores dentro del rango 0.92 - 0.98 <sup>16</sup>

$C_s$  = Concentración de saturación del  $\text{O}_2$  (mg/l) en agua limpia a 20 °C y 1 atm. de presión.

La eficiencia de aereación ( $N$ ) es afectada por la temperatura:<sup>17</sup>

$$N = N_0 \left[ \frac{(C_s - C_l)}{9.2} \right] \times 1.024^{(T-20)} \times u$$

De donde:

- $N$  = Eficiencia de aereación a la temperatura  $T$ , (Kg  $\text{O}_2$  / Hp Hr)
- $N_0$  = Eficiencia de aereación a condiciones estándar
- $C_l$  = Concentración de  $\text{O}_2$  disuelto en el reactor (mg/L)
- $u$  = Coeficiente de transferencia del  $\text{O}_2$  en aguas residuales = 70 % respecto a la transferencia de  $\text{O}_2$  en agua limpia.

<sup>16</sup> *Ibidem*, p. 201.

<sup>17</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.547.

### 3.8 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA

El requerimiento de potencia para la aereación, está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \text{Kg/hr de } O_2 \text{ requerido/N}$$

$$P = \text{Potencia (Hp)}$$

### 3.9 TIEMPO DE RESIDENCIA

El tiempo de residencia del reactor es calculado de acuerdo a dos criterios y se determina cual de ellos controla el diseño, dichos criterios son:

- 1ro. Calidad requerida por el efluente, depende de la remoción de la DBO soluble:

$$t = \frac{(S_f - S_e)}{(K \times X_v \cdot a \times S_e)}$$

Para el caso especial en que se toma en cuenta la materia no biodegradable ( $S_n$ ):

$$t = \frac{(S_f - S_e)}{[K \times X_v \cdot a \times (S_e - S_n)]}$$

- 2do. Carga orgánica, evaluada a partir de la relación  $F/M$  para la floculación y sedimentación óptima del lodo:

$$t = \frac{S_f}{[X_v \cdot a \times (F/M)]}$$

Los tiempos de residencia calculados por estos dos criterios son usualmente diferentes.

Para el caso de las aguas residuales que contienen sustratos fácilmente biodegradables, se prefiere el valor obtenido en el segundo caso. Por otro lado para el caso de aguas residuales conteniendo sustratos de difícil biodegradabilidad, el tiempo de residencia calculado en el primer caso puede ser preferible para el control del diseño.

### 3.10 RELACION F/M (SUSTRATO/MICROORGANISMOS)

La relación de alimentación a microorganismo expresa la carga de sustrato por tiempo unitario por unidad de masa de microorganismos en la etapa de aeración. Este parámetro es definido como:

$$F/M = \text{Kg de sustrato influente}/(\text{día})(\text{Kg SSVLM en el reactor})$$

De donde:

$$F = Q_0 S_0$$

$$M = X_{v,a} V$$

Por lo tanto:

$$F/M = Q_0 S_0 / X_{v,a} V = S_0 / X_{v,a} t$$

El rango de los valores óptimos de la relación F/M para una buena sedimentación de los lodos es:

$$0.6 > F/M > 0.3 \quad 18$$

### 3.11 VOLUMEN DEL REACTOR

El tiempo de residencia hidráulico es deducido a partir de la siguiente ecuación:

$$t_h = V/Q_0$$

Despejando el volumen del reactor, V.

$$V = Q_0 t_h$$

Como  $Q_0 = Q_F(1+r)$ , entonces:

$$V = Q_F(1+r) t_h$$

<sup>18</sup> RAMALHO Rubens S., Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed, traducido al español, España Reverté, S.A., 1991, p. 295.

### 3.12 CALCULO DE LA RECIRCULACION

La expresión para la relación de recirculación ( $r=QR/QF$ ) puede ser obtenida haciendo un balance de materia en el sedimentador secundario, de donde se obtiene:

$$r = (X_{v,a} - YJ + K_d [J/(kF)] - X_{v,F}) / (X_{v,u} - X_{v,a})$$

De donde:

$$J = S_F - S_e$$

$$F = S_e - S_n$$

---

## CAPITULO 4

---

### SISTEMAS DE PELICULA FIJA

El tratamiento de las aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de lama adherida a la superficie de un medio sólido de soporte<sup>1</sup>.

Cualquier superficie en contacto con un medio nutriente que contenga microorganismos desarrollará una capa biológicamente activa y en consecuencia, las películas biológicas adheridas constituyen una característica de este tipo de reactor biológico.

Los sistemas de película adheridas se pueden clasificar en dos tipos diferentes: estacionarios o de medio fijo y sistemas de medio en movimiento.

Sistemas de medios en movimiento: la película de lama microbiana y el medio sólido de soporte a la que está adherida, se mueven a través del líquido que está bajo tratamiento, como en el caso de los Contactores Biológicos Rotativos (CBR), también llamados Biodiscos.

Sistemas de medio fijo: el agua residual pasa sobre el medio estacionario como en los filtros rociadores y torres empacadas.

#### 4.1 CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS

En los contactores biológicos rotativos (CBR), una película de lama microbiana se adhiere sobre un medio de soporte parcialmente sumergido que gira lentamente sobre un eje horizontal, dentro del tanque, a través del cual fluyen las aguas residuales (Figura 4.1).

La película de lama queda expuesta sucesivamente a los nutrientes en las aguas residuales y al aire, debido a que el medio gira a una velocidad de aproximadamente 1 a 3 revoluciones por minuto.

---

<sup>1</sup> WINKLER Michael, Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho, 1a. ed. México, Limusa, S.A. de C.V., 1986, p. 183.

Al incrementarse el espesor de la película biológica, se dificulta la alimentación y respiración de los microorganismos del interior, en consecuencia mueren y se desprenden, iniciándose la formación de una nueva película biológica.

El desprendimiento de los microorganismos también se debe a las fuerzas cortantes originadas por la rotación de los discos al pasar por el agua. Los microorganismos desprendidos se mantienen en suspensión en el líquido, salen del tanque con el agua tratada y se dirigen hacia el sedimentador secundario, donde se separan.

Los discos cumplen varios propósitos como soporte para las poblaciones microbianas, dispositivo de mezclado en el tanque y oxigenación del medio. Estos discos se mantienen paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Los ejes tienen longitudes de 7.5 m aproximadamente.

Los contactores biológicos rotatorios son normalmente fabricados de poliestireno o policloro con diámetros comprendidos entre 3 y 4m. La superficie de los discos está sumergida aproximadamente un 40% en todo momento.

A partir de un balance de materia para el sustrato en un reactor perfectamente mezclado y utilizando la expresión cinética para el crecimiento bacteriano y la eliminación de sustrato se obtiene la expresión<sup>2</sup>:

$$Q_0(S_0 - S_e) = P \cdot A \left( \frac{S_e}{K_s + S_e} \right)$$

Donde:

$S_0$  = Concentración de DBO en el influente (mg/L)

$S_e$  = Concentración de DBO en el efluente (mg/L)

$Q_0$  = Gasto

$P, K_s$  = Constantes cinéticas

$A$  = Área requerida para la reducción de la DBO de  $S_0$  a  $S_e$ , la cuál esta dada por:

$$A = \frac{Q_0(S_0 - S_e)}{P \left[ \frac{S_e}{(K_s + S_e)} \right]}$$

<sup>2</sup> RAMALHO Rubens S., Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed, traducido al español, España Reverté, S.A., 1991, p. 501.



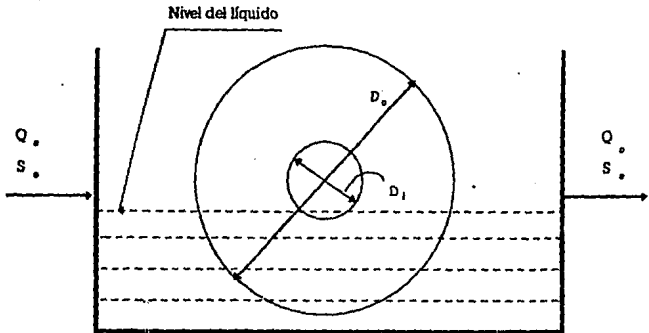


Figura 4.1 Contactor biológico rotatorio.

Tomado de: Ramelho Rubens S., Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed., traducida al español. España Reverte, S.a., 1991, p. 494.

Los valores de las constantes  $P$  y  $K_s$  se determinan experimentalmente en un equipo piloto, por medio de la forma lineal de la primer ecuación:

$$\frac{A}{Q_o(S_o - S_e)} = \frac{K_s}{P} \times \frac{1}{S_e} \times \frac{1}{P}$$

Al comparar gráficamente el inverso de la carga orgánica eliminada  $[A/Q_o(S_o - S_e)]$  y el inverso de la concentración del sustrato  $(1/S_e)$  en el efluente, se pueden obtener los valores de  $K_s$  y  $P$  (Fig. 4.2). Para la deducción del modelo, se establecen las siguientes consideraciones:

- 1ro. La eliminación del sustrato causada por los microorganismos suspendidos en el agua dentro del reactor es despreciable comparada con la eliminación debida a la biopelícula.

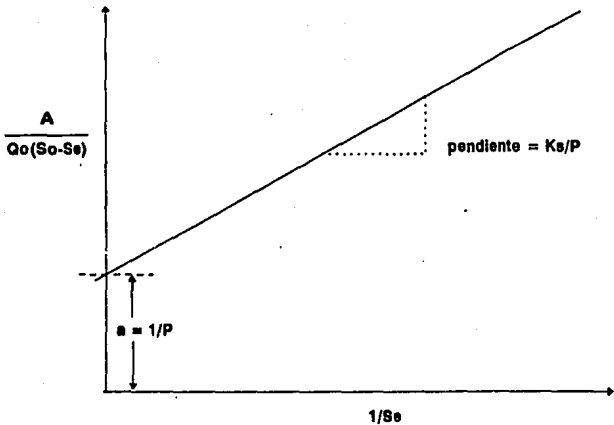


Figura 4.2 Determinación de los parámetros P y  $K_s$

- 2do. La rapidez de eliminación de sustrato se relaciona con la rapidez de crecimiento microbiano por medio del coeficiente de rendimiento (Y), definido como:

$$Y = \frac{\left(\frac{dX}{dt}\right)}{\left(\frac{dS}{dt}\right)} = \frac{dX}{dS}$$

Donde:

X = Concentración de microorganismos

S = Concentración de sustrato

t = tiempo

El término correspondiente a la rapidez de eliminación de sustrato es:

$$\left[ \frac{dS}{dt} \right] [V_A] = \left[ \frac{(\mu_{max})(X)}{Y} \right] [V_A] \left[ \frac{S}{K_S + S} \right]$$

Donde:

$$V_A = A d$$

$V_A$  = Volumen de biomasa activa

$\mu_{max}$  = Tasa máxima de crecimiento

$d$  = Espesor de biomasa activa

3ro. No toda la biopelícula es biomasa activa. El espesor activo  $d$  puede ser menor que el espesor total de la biopelícula o igual a este. La constante de capacidad de área está definida por:

$$P = \frac{(\mu_{max})(X)(d)}{Y}$$

#### ECUACION DE KINKANON STOVE

Este modelo se deriva de la siguiente forma:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que entra al} \\ \text{reactor} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que sale del} \\ \text{reactor} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que se remueve} \end{array} \right]$$

Esto puede escribirse como:

$$Q \cdot S_i = Q \cdot S_e + \frac{dS}{(A \cdot dt)} \cdot A$$

Donde:

$Q$  = Flujo ( $m^3/min$ )

$S_i$  = Concentración de DBO en el influente (mg/L)

$S_e$  = Concentración de DBO en el efluente (mg/L)

$A$  = Área del volumen ( $m^2$ )

Donde:

$$\frac{dS}{(A \cdot dt)} = \text{Utilización específica del sustrato (mg/min m}^2\text{)}$$

El término  $\frac{dS}{(A \cdot dt)}$  se puede expresar como:

$$\frac{dS}{(A \cdot dt)} = \frac{\left( \mu_{\max} \cdot \left( \frac{Q \cdot S_i}{A} \right) \right)}{\left( K_B + \left( \frac{Q \cdot S_i}{A} \right) \right)} \cdot A$$

Donde:

$\mu_{\max}$  = Tasa máxima específica de remoción de sustrato

$K_B$  = Constante de proporcionalidad

Sustituyendo las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$Q \cdot S_i = Q \cdot S_e + \frac{\left( \mu_{\max} \cdot \left( \frac{Q \cdot S_i}{A} \right) \right)}{\left( K_B + \left( \frac{Q \cdot S_i}{A} \right) \right)} \cdot A$$

Esta ecuación representa el modelo, la cual puede escribirse en sus tres formas:

- 1ra. Forma del método gráfico:

$$\frac{A}{Q \cdot (S_i - S_e)} = \frac{K_B}{\mu_{\max}} \cdot \frac{A}{Q \cdot S_i} + \frac{1}{\mu_{\max}}$$

Siendo similar a:  $y = ax + b$

Donde:

$$y = \frac{A}{Q^*(S_i - S_e)}$$

$$a = \frac{K_B}{\mu_{\max}}$$

$$x = \frac{A}{Q^* S_i}$$

$$b = \frac{1}{\mu_{\max}}$$

$$\frac{a}{b} = K_B$$

- 2da. En términos del área requerida para tratar un determinado desecho y obtener determinado DBO soluble del efluente:

$$A = \frac{Q^* S_i}{\left[ \frac{(\mu_{\max} \cdot S_i)}{(S_i - S_e)} - K_B \right]}$$

- 3ra. En la forma para calcular el efluente de cada etapa:

$$S_e = S_i - \frac{\mu_{\max} \cdot S_i}{\left[ K_B + \left( \frac{Q^* S_i}{A} \right) \right]}$$

En cualquiera de las tres formas que se use el modelo, los parámetros cinéticos  $\mu_{\max}$  y  $K_B$ , son los valores claves para obtener resultados satisfactorios. Si se conocen los parámetros cinéticos, entonces pueden usarse las ecuaciones 2da. y 3ra.

En caso de que no se conozcan, debe tratarse primero la ecuación 1ra., siendo necesario estudiar una planta piloto, con el fin de obtener los datos establecidos para determinar los parámetros cinéticos. Graficando  $A/Q(S_i - S_e)$  contra  $A/QS_i$ , resultará una línea recta; la pendiente de la línea determina el valor de  $K_B/\mu_{\max}$  y la intersección en el eje "y" será  $1/\mu_{\max}$ . Por lo tanto el valor de  $K_B$  se calcula dividiendo la pendiente entre la intersección de "y". De esta forma se obtienen los valores de  $\mu_{\max}$  y  $K_B$ .

## 4.2 FILTROS ROCIADORES

En los sistemas de medio fijo, el medio sólido de soporte está dispuesto en forma de un lecho empacado a través del cual gotea el agua residual. Las superficies mojadas del medio de empaque desarrollan una película de lama microbiana, y el agua residual fluye sobre la superficie del empaque en una delgada capa que está en contacto con la lama microbiana por un lado y con la atmósfera en los espacios intersticiales del empaque por el otro. El oxígeno se disuelve en la superficie de la capa del líquido en movimiento y es transferido a través de la capa líquida a la capa de lama microbiana<sup>3</sup>.

El oxígeno y los nutrientes del líquido se difunden hacia el interior de la película microbiana para ser metabolizados por la población microbiana de la lama.

Los medios de empaque usados en este sistema presentan un área de contacto muy grande entre la capa de líquido y el aire, aumentando la absorción del oxígeno por la capa líquida y presentando de manera similar una gran área de contacto entre el líquido y la lama microbiana, con lo que se aumenta la transferencia de nutrientes y oxígeno a los microorganismos.

El suministro del agua residual al filtro rociador se distribuye usualmente sobre la superficie superior del lecho por medio de un sistema móvil de distribución.

Las dimensiones del lecho de secado, en el que se dispone el medio sólido de soporte depende de la naturaleza del medio y de la concentración y tipo del agua residual a tratar. Un lecho usado en el tratamiento de las aguas residuales domésticas mide típicamente 2 m de profundidad y 110 m de diámetro, pero los utilizados en el tratamiento de las aguas residuales industriales, pueden medir hasta 40 m de diámetro y en algunos casos la profundidad puede ser de hasta 12 m<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> WINKLER Michael, Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho, 1a. ed. México, Limusa, S.A. de C.V., 1986, p. 183-184.

<sup>4</sup> *Ibidem*, p. 185.

Los filtros rociadores son clasificados en alta, media y baja tasa de acuerdo a la carga hidráulica y orgánica presentes. La carga hidráulica es el volumen total del líquido, incluyendo la recirculación por unidad de tiempo por unidad de área del filtro. La carga orgánica es expresada como los Kg de DBO por día por unidad de volumen del medio ( $\text{Kg}/\text{m}^3$  día). En la tabla 4.1 se presenta la clasificación de los filtros rociadores, así como sus principales características:

TABLA 4.1 CLASIFICACION DE FILTROS ROCIADORES

	BAJA TASA	TAJA TASA	VELOCIDAD ALTA	VELOCIDAD SUPER ALTA	CAPAS ASPERAS
Carga hidráulica ( $\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$ )	1-1.45	4.5-10.8	10.8-43	16-98	65-195
Carga orgánica (g DBO <sub>5</sub> /litro $\cdot$ m <sup>3</sup> )	74-370	260-520	370-445		
Recirculación	ausente	usual	siempre	usual	normalmente requerido.
Muecas en el filtro	muchas	varias	varias	pocas	pocas
Operación	intermitente	varias	continuo	continuo	continuo
Profundidad (m)	1.8-2.5	1.8-2.5	1-2.5	arriba de 12	1-6
Recencia de DBO %	80-85	50-70	65-80	65-85	40-65
Calidad del efluente	totalmente nitrificado	alguna nitrificación	alguna nitrificación	nitrificación limitada	no nitrificado

Basado tomado de: Water Pollution Control Federation, Operation of Wastewater Treatment Plant "MOP 11". 1a. ed., USA. Lancaster Penn, 1976, p. 94.

### CRITERIOS DE DISEÑO

Numerosos investigadores han intentado definir el proceso fundamental de los filtros rociadores por la correlación de las variables que afectan su operación. Basándose en el análisis de datos de operación han establecido ecuaciones o curvas que mejor se ajustan a los datos disponibles. Los resultados de este análisis de datos condujeron al desarrollo de numerosas fórmulas empíricas. Las fórmulas empíricas para diseño más complejas son las propuestas por National Research Council (NCR) y Eckenfelder, entre otras.

## FORMULA DE NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NCR)

La fórmula desarrollada por NCR fue el resultado de un extenso análisis de filtros rociadores empacados con piedra. Estos análisis están basados en el hecho de que el contacto entre el medio de empaque y la materia orgánica depende de las dimensiones del filtro y que mientras más grande sea el área de contacto, mayor será la eficiencia. Sin embargo, una gran carga aplicada, disminuirá su eficiencia, por lo tanto, las cantidades que determinan la eficiencia en un filtro rociador es la combinación de la efectividad de contacto y la carga aplicada.

Con los datos obtenidos de 34 plantas de filtros rociadores seleccionados para el estudio de NCR, se obtuvo una curva con parámetros de "carga aplicada/área efectiva de contacto" ( $W/VF$ ) contra el % de remoción de DBO (Figura 4.3). Para una etapa simple o la primera<sup>5,6,7,8</sup>:

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0.443 \cdot \left( \frac{W_1}{V \cdot F} \right)^{1/2}}$$

Segunda etapa:

$$E = \frac{100}{1 + \frac{0.443}{(1 - E_1) \cdot \left( \frac{W_2}{V \cdot F} \right)^{1/2}}}$$

Donde:

$E_1$  = % de eficiencia de remoción a través del filtro de la primera etapa y tanque de sedimentación.

<sup>5</sup> Water Pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plant Design "Manual of Practice Núm.8", 1a. ed., USA, Lancaster Press, 1977, p 293-294.

<sup>6</sup> METCALF Eddy, Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales, 1a. ed. Traducida al español. España. Labor, S.A., 1977, p.367.

<sup>7</sup> STEEL Ernest W., Abastecimiento de Agua y Alcantarillado, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 512.

<sup>8</sup> BENEFIELD Larry D. & RANDALL C. W., Biological Process Design for Wastewater Treatment, 1a. ed., USA, Prentice-Hall, Inc., 1980, pp. 396-398.



$W_1$  = DBO (Kg/día) de carga en el filtro de la primera etapa, sin incluir la recirculación.

$V$  = Volumen del filtro rociador en  $m^3$ .

$F$  = Número de pasos del material orgánico:

$$F = (1 + R/I) / [1 + (1 - P) R / I]$$

$R/I$  = Relación de recirculación (Flujo recirculado/Influente a la planta).

$P$  = Factor de peso con valor aproximado a 0.9

$E_2$  = % de eficiencia de remoción a través del filtro de la segunda etapa y tanque de sedimentación.

$W_2$  = DBO (Kg/día) de carga en el filtro de la segunda etapa, sin incluir la recirculación.

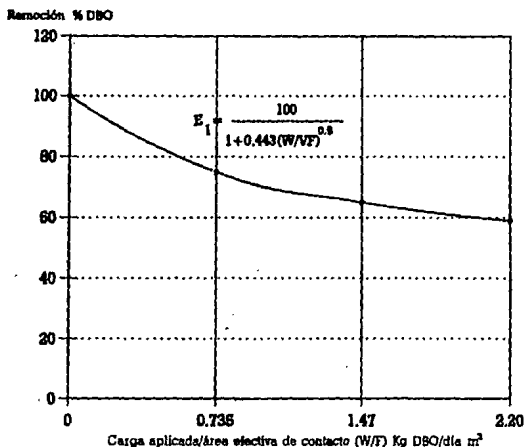


Figura 4.3 Curva obtenida en el estudio de NCR

Datos tomados de: Water Pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plant Design, manual of practice # Lancaster Press, U.S.A. 1977 p. 204

La figura 4.4 es una guía para el diseño y selección de la mejor relación de recirculación para obtener la remoción de DBO deseada a partir de la DBO aplicada a el filtro rociador.

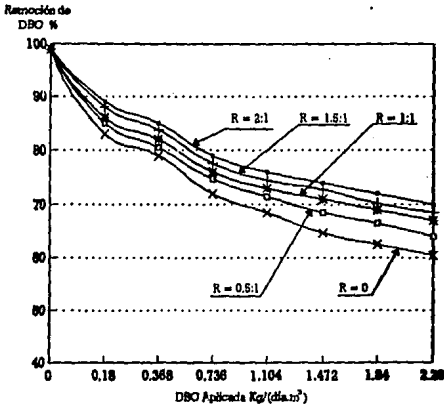


Figura 4.4 Comparación del funcionamiento de filtros rociadores para diferentes relaciones de recirculación.

Datos tomados de: Water pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plant Design, manual of practice No. 8; ed. Lancaster Press, U.S.A., 1977, p. 205.

## FORMULA DE ECKENFELDER

Eckenfelder propuso la siguiente ecuación aplicable a todos los medios de empaque<sup>9, 10, 11, 12</sup>:

$$\frac{L_e}{L_o} = \exp \left[ \frac{k \cdot D^{(1-m)}}{\left(\frac{Q}{A}\right)^n} \right]$$

$$L_e = \frac{L_o + (R \cdot L_o)}{1 + R}$$

Donde:

$L_i$  = Concentración de DBO en el influente mg/L (No incluye recirculación)

$L_o$  = Concentración de DBO en el influente mg/L (incluyendo recirculación)

$L_e$  = Concentración de DBO remanente en el efluente del filtro rociador, mg/L

$R$  = Relación de recirculación, %

$m$  = Exponente de la profundidad del filtro indicativo de la distribución de la lama biológica con la profundidad; para una distribución uniforme (1-m) es igual a 1.

$n$  = Exponente característico del medio.

$Q$  = Carga hidráulica incluyendo la recirculación, gpm

$A$  = Área del filtro, ft<sup>2</sup>

$D$  = Profundidad del filtro

$k$  = Constante de tratabilidad

El tiempo de residencia,  $t$  (tiempo de contacto), está dado por las características de operación y el medio:

$$t = \frac{C \cdot D}{\left(\frac{Q}{A}\right)^n}$$

<sup>9</sup> Water Pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plant Design "Manual of Practice Núm.8", 1a. ed., USA, Lancaster Press, 1977, p 207.

<sup>10</sup> STEEL Ernest W., *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 514.

<sup>11</sup> WINKLER Michael, *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*, 1a. ed. México, Limusa, S.A. de C.V., 1986, p. 234-235.

<sup>12</sup> RAMALHO Rubens S., *Tratamiento de Aguas Residuales*, 1a. ed, traducido al español, España Reverté, S.A., 1991, p. 478-479.

Donde C y n varían con cada tipo de medio y con las características hidráulicas. El exponente n ha sido evaluado como 1/3 para flujo turbulento y 2/3 para flujo laminar. La constante C está definida como la cantidad de película activa por unidad de volumen a través de la profundidad del filtro y se puede calcular como:

$$C = \frac{1}{D^n}$$

### 4.3 TORRES EMPACADAS

Cierto número de medios de empaque de fabricación especial tienen un uso cada vez mayor debido a que ofrecen altas fracciones de espacio, con amplios espacios intersticiales en el empaque, y pesan aproximadamente la décima parte de lo que pesan los medios minerales en operación. Esta ligereza en el peso permite utilizar lechos mucho más profundos, donde las capas inferiores del empaque son capaces de resistir una profundidad de lecho de 7 a 10 m de profundidad junto con la lama asociada.

La alta fracción de espacios vacíos y los amplios espacios intersticiales permite aplicar al lecho grandes cargas de nutrientes orgánicos, sin correr el riesgo de obstruir el lecho, debido al excesivo crecimiento de la lama, por lo que se les conoce también como "Medios de super tasa". A continuación se muestra la tabla 4.2 con las principales características de las torres empacadas:

**TABLA 4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS TORRES EMPACADAS**

CARACTERÍSTICAS	TORRES EMPACADAS
CARGA HIDRAULICA (m <sup>3</sup> /ha día)	140400 - 842400
CARGA ORGANICA (g/m <sup>3</sup> día)	ARRIBA DE 4800
RECIRCULACION	USUALMENTE
PROFUNDIDAD (m):	ARRIBA DE 12.2
REMOCION DE DBO (%):	65-85

Datos tomados de: Water Pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plant Design "Manual of Practice Núm. 8", 1a. ed., USA, Lancaster Press, 1977, p 283.

La configuración de los empaques debe promover la distribución uniforme del líquido, haciendo mínima la canalización, y presentar una superficie específica de alta capacidad de humectación.

Los valores específicos de superficie de los medios de soporte especialmente fabricados, varían notablemente según la configuración que se usa y están dados normalmente por los fabricantes.

**DISEÑO**

- **1ro.** Determinar la carga específica de DBO ( $T_b$ ) perteneciente al valor requerido de purificación, (Ver Figura 4.5).

- **2do.** Calcular la carga de DBO<sub>5</sub>, mediante la siguiente ecuación

$$T_b = Q_d \cdot S_1$$

Donde:

$T_b$  = Carga de DBO<sub>5</sub> actuando sobre la torre empacada (g/d)

$Q_d$  = Flujo diario (m<sup>3</sup>/d)

$S_1$  = Concentración de DBO promedio (g/m<sup>3</sup>)

- **3ro.** Calcular el volumen de empaque necesario

$$V = T_b / T_{bf}$$

Donde:

$V$  = Volumen de empaque (m<sup>3</sup>)

$T_b$  = Carga de DBO actuando sobre la torre (g/d)

$T_{bf}$  = Carga específica de DBO (g/m<sup>3</sup>d)

- **4to.** Calcular la superficie horizontal con:

$$F_v = V/H; (m^2)$$

Donde:

$F_v$  = Superficie horizontal (m<sup>2</sup>)

$H$  = Altura de la torre (m)

$V$  = Volumen del medio (m<sup>3</sup>)

- **5to.** Comprobar que la carga superficial específica se encuentra entre 1.5 y 2.0 (m/h), mediante la siguiente ecuación:

$$V_F = Q_d / F_v$$

Donde:

$V_F$  = Carga superficial específica (m/h)

$Q_d$  = Flujo diario (m<sup>3</sup>/d)

$F_v$  = Superficie horizontal (m<sup>2</sup>)

6to. Con base en la carga superficial específica ajustada  $V_F$ , se calcula nuevamente la cantidad de agua ( $Q$ ) que fluirá a través de la torre, mediante la siguiente expresión:

$$Q = F_V \times V_F \times 24 \text{ (m}^3/\text{d)}$$

Donde:

$Q$  = Cantidad total de agua residual fluyendo a través de la torre ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$F_V$  = Superficie de la torre ( $\text{m}^2$ )

$V_F$  = Carga superficial específica ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) en la torre relacionado con el promedio diario de flujo.

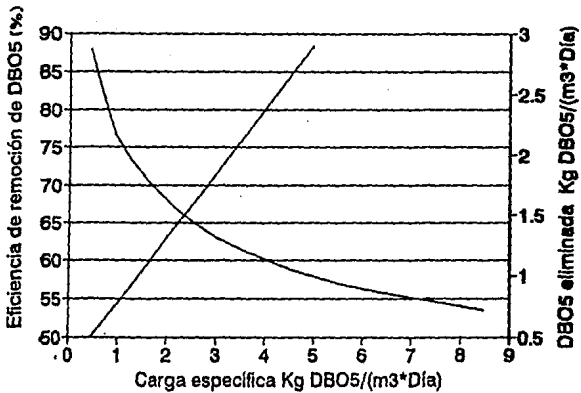


Figura 4.5 Gráfica de remoción de DBO, Torres Empacadas

7mo. Calcular el % de recirculación

$$R = \frac{Q - Q_d}{Q_d} * 100$$

Donde:

Q = Flujo de agua residual total fluyendo en la torre (m<sup>3</sup>/d)

Q<sub>d</sub> = Cantidad de agua residual a ser tratada diariamente (m<sup>3</sup>/d)

R = Recirculación (%)

8vo. La calidad del agua tratada (efluente) se determina por:

$$S_e = \frac{S_1 \times \eta_{DBO_5}}{100}$$

Donde:

S<sub>1</sub> = Concentración de DBO en el influente (g/m<sup>3</sup>)

η<sub>DBO<sub>5</sub></sub> = Eficiencia de eliminación de DBO (%)

S<sub>e</sub> = Concentración de DBO en el efluente (g/m<sup>3</sup>)

---

## CAPITULO 5

---

### PLACAS BIOLÓGICAS

#### 5.1 ECUACION GENERAL

El sistema de "Placas Biológicas" es un proceso empleado para el tratamiento de aguas residuales en el que un medio plástico se emplea como soporte para el crecimiento biológico.

Para el desarrollo conceptual de las ecuaciones de diseño se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Presenta el modelo de flujo pistón en el que la concentración de sustrato inicial es diferente a la final y va disminuyendo a los largo de su recorrido por la sección empacada.*
- *Se considera un reactor biológico continuo bajo condiciones de flujo turbulento.*
- *La remoción de sustrato sigue una cinética de primer orden, por lo que la velocidad de remoción es proporcional a la concentración de sustrato y al área de la película biológica.*

El balance de materia para el sustrato se representa como:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que entra al reactor} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que sale del reactor} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Masa de sustrato} \\ \text{que es oxidada} \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que entra al reactor} \end{array} \right] = Q \cdot S_0$$



$$\left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato que} \\ \text{sale del reactor} \end{array} \right] = Q \cdot S_e$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Masa del sustrato} \\ \text{que es oxidada} \end{array} \right] = P \cdot A \cdot S_m$$

La velocidad a la cual el sustrato es oxidado es proporcional a la concentración de sustrato y al área de medio fijo, por lo que se introduce una constante  $P$  ( $m^3/m^2 \cdot \text{día}$ ). Por lo que el balance de materia queda como:

$$Q S_o = Q S_e + P \cdot A \cdot S_m$$

El área de empaque requerida se calcula con la ecuación siguiente:

$$A = \frac{Q(S_o - S_e)}{P \cdot S_m}$$

## 5.2 CONCENTRACION EN FLUJO PISTÓN

En este caso la concentración de sustrato  $S_m$  representa una concentración promedio, por lo que para encontrar dicha concentración se calcula el área bajo la curva y se divide entre el rango de la variable independiente,  $(X_2 - X_1)$ .

No debe considerarse una relación lineal, pues de esta forma se obtendría que el valor medio es igual a:  $(S = S_o + S_e/2)$ , el cual es mayor que el valor real.

Por lo que se integra para obtener un valor del área bajo la curva (Figura 5.1):

$$X_m = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x) \, dx}{\int_{x_1}^{x_2} 1 \, dx} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x) \, dx}{(X_2 - X_1)}$$

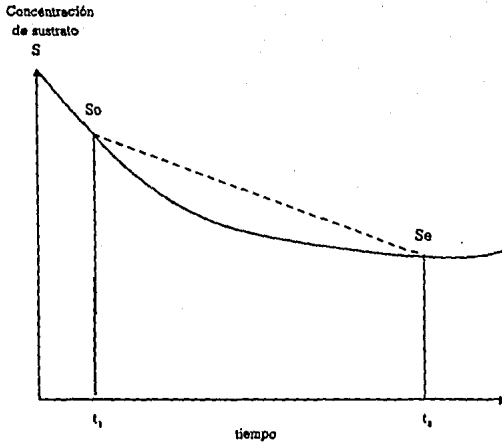


Figura 5.1. Area bajo la curva (flujo pistón).

$$X_m = \frac{S_0 \int_0^t e^{-kt} dt}{(\theta - 0)}$$

Resolviendo la integral:

$$\int_0^t e^{-kt} dt$$

Sustituyendo:

$$u = -kt$$

$$du = -k dt$$

Queda:

$$-\frac{1}{k} \int_0^{\theta} e^{-k\theta} d\theta = -\frac{1}{k} e^{-k\theta} + C$$

$$-\frac{1}{k} e^{-k\theta} \Big|_0^{\theta} = -\frac{e^{-k\theta}}{k} + \frac{1}{k} = \frac{1}{k} (1 - e^{-k\theta})$$

Por lo tanto:

$$S_{\theta} = \frac{S_0}{k\theta} (1 - e^{-k\theta})$$

### 5.3 BIODEGRADABILIDAD

Para calcular el valor de  $S_{\theta}$  se requiere conocer el valor de  $k$ , para lo cual se parte de la condición en que no existe restricción alguna en cuanto a la disponibilidad de área para el crecimiento de la película biológica.

$$\frac{dS}{dt} = -K \cdot S \quad ; \quad \int_{S_0}^{S_{\theta}} \frac{dS}{S} = -k \int_0^{\theta} dt$$

$$\ln S \Big|_{S_0}^{S_{\theta}} = -K \cdot t \Big|_0^{\theta} \quad ; \quad \ln \frac{S_{\theta}}{S_0} = -K\theta$$

$$K = -\frac{\ln \left( \frac{S_{\theta}}{S_0} \right)}{\theta}$$

La constante  $K$  representa una constante cinética global, cuando el área disponible para crecimiento de la película biológica no es un factor limitante.

## CAPITULO 6

### DISEÑO DE LOS MODULOS EXPERIMENTALES

#### 6.1 LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA

##### 6.1.1. TANQUE DE AERACION

$X_{va}$ = Concentración de SSV en el reactor (mg/l)	3,000.000
$a$ = Kg de O <sub>2</sub> /(día)(Kg de DBO <sub>5</sub> removida)	0.730
$S_f$ = Concentración de DBO <sub>5</sub> de entrada (mg/l).	200.000
$S_e$ = Concentración de DBO <sub>5</sub> de salida (mg/l).	25.000
$b$ = Kg de O <sub>2</sub> /(día)(Kg SSVLM reactor)	0.075
$S_n$ = Concentración de DBO <sub>5</sub> no biodegradable (mg/l).	10.000
$X_{vu}$ = Concentración de SSV en recirculación (mg/l).	12,000.000
$X_{vf}$ = Concentración de SSV en el agua cruda (mg/l).	0.000
$k$ = 0.017 a 0.03 = 0.02 día <sup>-1</sup>	0.020
$F/M$ = 0.3 a 0.6 (supuesto)	0.300
$X_{vfv}$ = Concentración de SSV en el agua cruda (mg/l)	20.00
$X_{vve}$ = Concentración de SSV en el efluente	20.00

#### CALCULO DE LA RECIRCULACION

Considerando que el criterio de calidad del efluente es el que predomina en el diseño

$r1 = (X_{va} - a J + b J / (k G)) - X_{vf} / (X_{vu} - X_{va})$	32.400
--	--------

Donde:

$J = S_f - S_e$	175.000
$G = S_e - S_n$	15.000

Considerando que el criterio de floculación es el que predomina en el diseño

$r2 = (X_{va} - a J (F/M) + b S_f - X_{vf} (F/M)) / ((X_{vu} - X_{va}) (F/M) - b S_e)$	32.492
--	--------

Donde:

$J = S_f - S_e$	175.000
-----------------	---------

Los resultados son:

$r1 =$ Recirculación en (%).	32.400
$r2 =$ Recirculación en (%).	32.492

#### CONCENTRACION DE LA DBO EN EL INFLUENTE DE LA RECIRCULACION

$So1 = (Sf + r1 Se)/(1 + r1)$	30.240
$So2 = (Sf + r2 Se)/(1 + r2)$	30.225

$Soi =$  Concentración de la DBO en el influente, con la recirculación (mg/L)

#### TIEMPO DE RESIDENCIA

Considerando que el criterio de calidad del efluente es el que predomina en el diseño

$t1 = (So1 - Se) / (k Xva (Se - Sa))$	0.006
$t =$ Tiempo de residencia o retención (días).	0.006
$t =$ Tiempo de residencia o retención (Hr).	0.140

Considerando que el criterio de floculación es el que predomina en el diseño.

$t2 = So2 / Xva (F/M)$	0.034
$t =$ Tiempo de residencia o retención (días).	0.034
$t =$ Tiempo de residencia o retención (Hr).	0.806

Por el valor más alto en los tiempos de residencia, encontramos que el criterio que predomina es el de la floculación.

Los valores indicados son:

$t$ (días) =	0.034
$So$ (mg/L) =	30.225
$r$ (%) =	32.492

#### RELACION F/M = SUSTRATO/MICROORGANISMOS

$F/M = So / [Xva t]$	0.300
----------------------	-------

Se acepta este valor ya que se encuentra dentro del intervalo recomendado de:

$0.3 < F/M < 0.6$
-------------------

**VOLUMEN DEL REACTOR**

Datos:

$Q_f$ = Caudal medio en mL/s	1.05
$t$ = Tiempo de residencia o retención, en segundos (s)	15,080
$t$ = Tiempo de residencia o retención, en horas (h)	4.19

Usando la ecuación:

$V = Q_f(1+r)t$	
-----------------	--

Se calcula:

$V$ = Volumen total del reactor en litros	20.98
---	-------

Para:

$H$ = Tirante seleccionado en cm	28.500
----------------------------------	--------

y utilizando la ecuación de:

$A = V/H$	
-----------	--

Se calcula:

$A$ = Area en cm <sup>2</sup>	736.10
-------------------------------	--------

Volumen por unidad en litros	20.98
Area por unidad en cm <sup>2</sup>	736.10
Ancho promedio en centímetros	6.49
Largo en centímetros	113.50

**PRODUCCION DE LODOS**

$X_v = a(S_o - S_e) Q_f (1+r) - b X_v V$ en mg/d	6,869.250
$Q_f$ = Caudal al día en litros por día	90.720
$X_v$ = g de lodos producidos en un día	6.869

Cálculo de la concentración de lodos del sedimentador secundario,  $C_x$  en mg/L:

Caudal de lodos = $X_v / C_x$ en L/d	0.572
% del caudal influente = $[Q \text{ de lodos} / Q \text{ total}] * 100$	0.631

Concentración de SSV del influente con recirculación

$X_{vo} = [X_{vf} + r X_{vu}] / [1+r]$	2,942.850
--	-----------

**BALANCE DE MATERIA**

$X_{va} - X_{vo} = X_v \text{ en g/d}$	6.869
Comparando $X_v$ 's: $\text{dif } X_v =$	0

**REQUERIMIENTOS DE AEREACION**

El criterio de aeración recomendado por Benefield (Pag. 294) indica que la cantidad de aire requerida para la transferencia de Oxígeno por difusión es de 5.6 a 8.5 m<sup>3</sup>/min por cada 28 m<sup>3</sup> de volumen del tanque de aeración, lo cual asegura la transferencia de Oxígeno y un buen mezclado.

Tomando como base este criterio tenemos:

a) 5.6 m<sup>3</sup>/min/28 m<sup>3</sup>

Aire requerido en m <sup>3</sup> /min/m <sup>3</sup> :	0.2000
Volumen del tanque de aeración en litros:	21.5500
Volumen del tanque de aeración en m <sup>3</sup> :	0.0216
Aire requerido en m <sup>3</sup> /min:	0.0043
Aire requerido en cm <sup>3</sup> /min	4310.0000

b) 8.5 m<sup>3</sup>/min/28 m<sup>3</sup>

Aire requerido en m <sup>3</sup> /min/m <sup>3</sup> :	0.30
Volumen del tanque de aeración en litros:	21.55
Volumen del tanque de aeración en m <sup>3</sup> :	0.02
Aire requerido en m <sup>3</sup> /min:	0.01
Aire requerido en cm <sup>3</sup> /min	6541.96

La cantidad de aire necesaria debe estar entre los dos valores obtenidos anteriormente.

Tomando en cuenta los valores obtenidos por recomendación por Benefield, se elige la cantidad de aire de 5,000 cm<sup>3</sup>/min debido a que las bombas disponibles proporcionan 2,500 cm<sup>3</sup>/min de aire cada una.

## 6.1.2. SEDIMENTADOR SECUNDARIO:

Considerando que el tiempo de retención recomendado para sedimentadores secundarios es de 2 a 3 Hr se obtiene el volumen:

Utilizando la siguiente fórmula:

$$V = Q \cdot t$$

Se calcula el volumen del sedimentador secundario

Q = Caudal medio (L/hr)	3.78
t = tiempo de retención seleccionado (Hr)	2.50
V = Volumen (litros)	9.45
V = Volumen (cm <sup>3</sup> )	9450.00

Utilizando la siguiente fórmula:

$$A = V / h$$

Se calcula el área superficial del sedimentador secundario.

V = Volumen (cm <sup>3</sup> )	9450.00
h = Tirante seleccionado (cm)	27.00
A = Área superficial (cm <sup>2</sup> )	350.00

Utilizando la siguiente fórmula:

$$L = A / b$$

se calcula la longitud del sedimentador secundario.

A = Área superficial (cm <sup>2</sup> )	350.00
b = Ancho seleccionado	9.00
L = Largo del sedimentador secundario	38.89



## 6.2 PLACAS BIOLÓGICAS

## 6.2.1. TANQUE DE AERACION

## PARAMETROS DE DISEÑO

So = Concentración DBO5 de entrada (mg/L)	200.00
Se = Concentración de DBO5 de salida (mg/L)	20.00
Qf = Caudal medio (mL/s)	1.05
θ = Tiempo de retención seleccionado (días)	0.14

## CALCULO DE LA CONSTANTE CINÉTICA K

$$K = (\ln So/Se)/\theta$$

K = Constante cinética (día <sup>-1</sup> )	16.45
---	-------

## CALCULO DE LA CONCENTRACION PROMEDIO Sm

$$S_m = So/K\theta * (1 - e^{-k\theta})$$

Sm = Concentración de DBO5 promedio (mg/l)	78.17
--	-------

## CALCULO DEL AREA DE EMPAQUE REQUERIDA

$$A = Q (So - Se) / (P * S_m)$$

Qf = Caudal medio (m3/s)	0.0000011
P = Constante (m3/m2 día)	0.11752
A = Area de empaque requerida en m2	1.78

## 6.2.2. SEDIMENTADOR SECUNDARIO:

Considerando que el tiempo de retencion recomendado para sedimentadores secundarios es de 2 a 3 Hr se obtiene el volumen:

$V = Q \cdot t$	
Q = Caudal medio (l/hr)	3.78
t = tiempo de retención seleccionado (Hr)	3.00
V = Volumen (litros)	11.34
V = Volumen (cm <sup>3</sup> )	11340.00

Calculo del área superficial:

$A = V / h$	
V = Volumen (cm <sup>3</sup> )	11340.00
h = Tirante seleccionado (cm)	22.50
A = Area superficial (cm <sup>2</sup> )	504.00

Calculo del largo del sedimentador secundario:

$L = A / b$	
A = Area superficial (cm <sup>2</sup> )	504.00
b = Ancho seleccionado	15.00
L = Largo del sedimentador secundario	33.60

---

## CAPITULO 7

---

### DESCRIPCION DE LOS MODULOS EXPERIMENTALES

#### 7.1 PLACAS BIOLÓGICAS

Este módulo está construido de acrílico transparente de 5mm de espesor (Figura. 7.1). Sus dimensiones exteriores se muestran en el Apéndice A, Figura A.1 y son:

Largo total = 51.5 cm

Ancho total = 32 cm

Altura total = 46 cm

Altura de tolvas = 10 cm

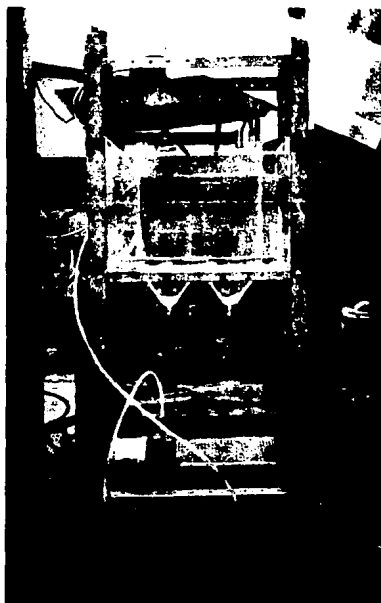


Figura 7.1  
Módulo experimental  
para el sistema  
"placas biológicas"

## 7.1.1 TANQUE DE AEREACION

En forma perimetral al módulo se encuentra el tanque de aereación (Figura A.2 Vista Superior) con un largo total de 124.5 cm, ancho de 7 o 7.5 cm de acuerdo a la sección correspondiente y tirante = 25 cm, para dar un volumen total de 22.69 litros, quedando un bordo libre de 10 cm (Figura A.1 Corte A-A'). Este tanque contiene dos secciones paralelas con un empaque de malla plástica (Figura. A.2 Corte B-B'). Cada sección de empaque está compuesto por 5 placas de malla en forma rectangular de 36.5 cm de largo por 23.5 cm de ancho, con una separación entre placas de 2.8 cm (Figura 7.2), proporcionando un área de medio fijo =  $1,715.5 \text{ cm}^2$ .

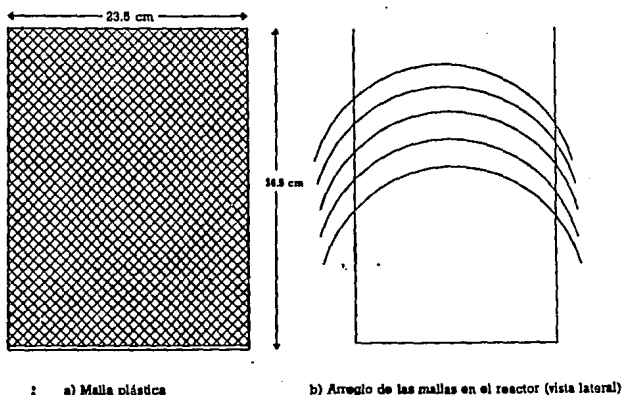


Figura 7.2 Placas de malla plástica usada como empaque

El caudal de agua residual cruda de 63 ml/min llega al tanque de aereación por un extremo a una altura de 27 cm y recorre toda su longitud, pasando por las dos secciones empacadas con un tiempo de residencia en esta zona de 3.36 Hr, para pasar posteriormente al sedimentador secundario (Figura A.2 Vista Superior).

### 7.1.2 SEDIMENTADOR SECUNDARIO

En el centro del módulo se encuentra el sedimentador secundario (Figura. A.2 Vista Superior) con 35 cm de largo y 15.5 cm de ancho, el efluente del tanque de aereación llega a él por medio de cuatro orificios colocados a 25 cm de altura en la placa de acrílico que separa el sedimentador secundario del tanque de aereación.

El sedimentador con las dos tolvas de 10 cm de altura y 1.06 litros de volumen cada una, están divididas a la mitad por una placa de acrílico con el fin de observar la diferencia en cantidad de lodos sedimentados en cada sección. Dicha placa cuenta con orificios en un extremo para permitir el paso del agua y llegar finalmente a una pequeña sección de 7.5 cm por 7.5 cm con fondo inclinado (Figura A.3 Corte A-A') donde quedarán los lodos que no hayan sedimentado en las tolvas en un tiempo de retención total = 3.13 Hr.

Tanto las tolvas como la sección de fondo inclinado cuentan con salidas para la descarga de lodos (Figura A.1).

El efluente del Sedimentador Secundario sale de la sección de fondo inclinado por medio de un tubo colocado a 22.5 cm de altura (Figura A.1).

## 7.2 LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA

El material con que se construyó este módulo es acrílico transparente de 5 mm de espesor (Figura 7.3). Las dimensiones totales del módulo indicadas en la figura A.4 son:

Largo = 52.5 cm	Altura del reactor = 35 cm
Ancho = 32 cm	Altura de tolvas = 10 cm

### 7.2.1 TANQUE DE AEREACION

Perimetralmente se encuentra el tanque de aereación (Figura A.5 vista Superior) con un largo total de 124.5 cm, ancho de 10 y 5 cm y tirante = 28.5 cm, para dar un volumen total de 31.13 litros, quedando un bordo libre de 6.5 cm (Figura A.6).

Este tanque contiene dos secciones paralelas con una placa de acrílico inclinada de 40.5 cm de largo y 21.87 cm de ancho, sumergida 5 cm por debajo del nivel del agua, la cual proporciona una zona de reposo o sedimentación parcial, comunicada en la parte inferior con la sección aereada (Figura A.5 Vista Superior y Figura A.6 corte B-B').



**Figura 7.3** Módulo experimental para el sistema "Lodos activados con recirculación hidráulica"

El volumen correspondiente a la zona aerada es de 24.21 litros y a la zona de reposo de 6.92 litros. El caudal de agua residual cruda de 63 ml/min llega al tanque de aeración por un extremo a una altura de 30 cm y recorre toda su longitud, la cual se encuentra debidamente aerada, comunicándose en la parte superior con la zona de reposo dividida por la placa, en donde se lleva a cabo una sedimentación parcial, regresando los lodos sedimentados a la sección aerada y poniéndose en contacto nuevamente con el licor mezclado, en un tiempo de retención en la zona aerada = 6.2 Hr.

El efluente del tanque de aireación entra al sedimentador secundario por cuatro orificios colocados a 28.5 cm de altura en la placa de acrílico que separa el sedimentador secundario del tanque de aireación (Figura A.5 Vista Superior).

### 7.2.2 SEDIMENTADOR SECUNDARIO

En el centro del módulo se encuentra el sedimentador secundario (Figura A.5 Vista Superior) con dos tolvas de 10 cm de altura para recolección de lodos, divididas a la mitad por una placa de acrílico con orificios en un extremo para permitir el paso del agua a las dos secciones (Figura A.6). Por último, el agua pasa a una pequeña sección de 5 cm por 5 cm con fondo inclinado donde quedarán los lodos que no hayan sedimentado en las tolvas. Cada tolva y la sección de fondo inclinado cuentan con salidas para la descarga de los lodos (Figura A.4).

Las dimensiones del sedimentador secundario son:

Ancho	= 9.5 cm
Largo	= 40.5 cm
Tirante	= 27 cm
Volumen	= 12.39 litros
Tiempo de retención	= 3.28 Hr
Altura de tolvas	= 10 cm
Volumen de tolvas	= 1.65 litros

El efluente tratado proveniente del sedimentador secundario sale del módulo por un tubo colocado a 27 cm de altura.

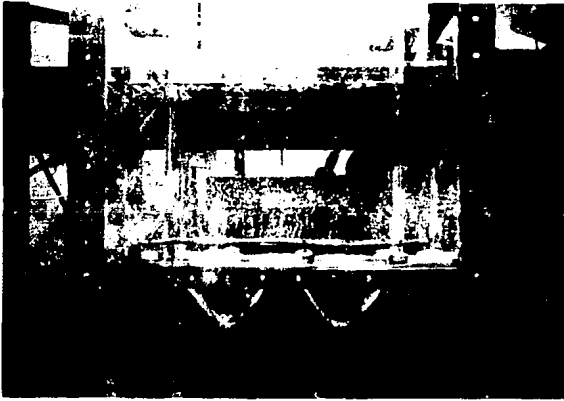
### 7.3 EQUIPO DE AERACION PARA AMBOS MODULOS

El sistema de aireación utilizado es el mismo para los dos módulos, tanto para el de lodos activados con recirculación hidráulica como para el de placas biológicas (Figura 7.4).

Se emplearon bombas de aire con dos salidas cada una, marca "Optima" para acuarios (Figura 7.5), con las siguientes características:

Aire de salida	= 2500 cm <sup>3</sup> /min
Electricidad	= 15 Voltz, 60 Hz
Peso	= 280 g

Dimensiones = 125 X 8.5 X 6.5 cm  
 Conexión de aire = Manguera de plástico 5 mm de diámetro



**Figura 7.4 Sistema de aeración**

El aire se distribuye a lo largo de los tanques de aeración por medio de mangueras porosas "cortinas aereadoras", fijadas en el fondo de los tanques, que por ser extremadamente permeables permiten una distribución uniforme del aire, produciendo una cortina de burbujas (Figuras. A.3 Corte B-B', A.6 Corte B-B' y 7.4).

#### **7.4 BOMBA DOSIFICADORA**

La bomba empleada para la alimentación del agua residual a los dos módulos es una bomba dosificadora de diafragma marca "Burflo" (Figura 7.1) con las siguientes características:

Serie:	100
Modelo:	068
Descarga Máxima:	257 litros/día
Presión Máxima:	4.2 Kg/cm
Electricidad:	115 Voltz, 60 Hz
Peso:	2.7 Kg



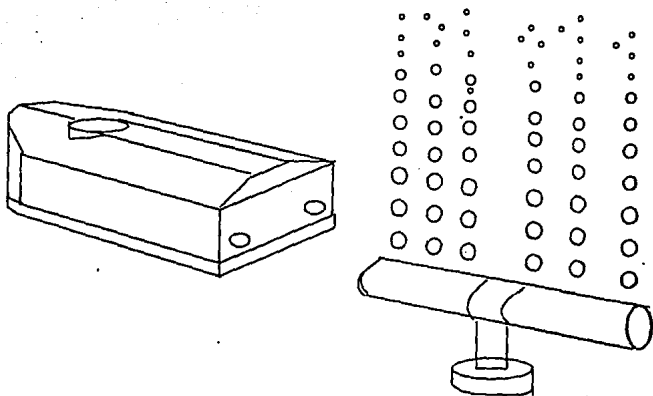


Figura 7.5 Bomba de aire y manguera "cortina aeradora"

## CAPITULO 8

### REALIZACION DE PRUEBAS

#### 8.1 INSTALACION DE LOS MODULOS EXPERIMENTALES

##### 8.1.1 UBICACION

El agua residual cruda se tomó del cárcamo de bombeo "San Cristóbal" perteneciente a la Delegación de Xochimilco, ubicado en la calle Las flores No. 10 Col. San Cristóbal entre las calles Dalia y las flores. (Figura 8.1)

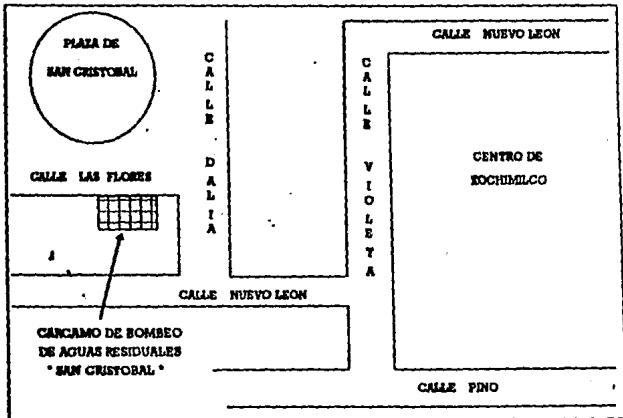


Figura 8.1 Ubicación del cárcamo de bombeo

### 8.1.2 SISTEMA DE ALIMENTACION DEL AGUA RESIDUAL

El suministro del agua residual a los módulos de "Placas Biológicas" y "Lodos activados con recirculación hidráulica", se llevó a cabo por medio de la bomba dosificadora.

Como el agua residual del cárcamo contenía una gran cantidad de materia flotante (Figura 8.2) y sólidos sedimentados en el fondo, fué necesario colocar al inicio de la manguera de succión una malla plástica con un claro cuadrado de 1 mm, sumergiéndola a dos metros a partir del nivel del agua y a 5 metros del fondo del cárcamo, quedando así a una altura apropiada para evitar la succión de material que pudiera obstruir la bomba dosificadora y el sistema de alimentación a los módulos experimentales.



**Figura 8.2** Cárcamo de bombeo de aguas residuales domésticas

Las mangueras utilizadas para la alimentación a los módulos fueron de material plástico transparente con el fin de facilitar la observación de cualquier obstrucción que pudiera presentarse.

## 8.2 SECUENCIA DE OPERACION

Para el arranque y operación de los módulos experimentales se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- 1ro. Llenado de los reactores con el agua residual haciendo uso de la bomba dosificadora, regulándola hasta proporcionar un caudal constante de 63 ml/min a cada uno de los módulos.
- 2do. Conexión del aire.
- 3ro. Funcionamiento continuo de ambos módulos durante dos semanas para lograr su estabilización (Figura 8.3).
- 4to. Los dos módulos experimentales se cubrieron con plástico negro al observarse la presencia de algas con el fin de evitar su crecimiento.

### PLACAS BIOLÓGICAS

Este módulo se dejó funcionando por dos semanas para dar oportunidad a la formación de la película biológica adherida a la malla plástica, descargando los lodos diariamente.

### LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA

En la primer semana de funcionamiento para este módulo se llevó a cabo la recirculación manual de los lodos sedimentados al tanque de aereación cada 8 horas, diariamente. En la segunda semana los lodos únicamente se descargaron.

## 8.3 MUESTREO Y ANALISIS

Una vez alcanzada la estabilización en el funcionamiento de ambos módulos, se prosiguió a efectuar la toma de muestras tanto del agua residual cruda como del agua tratada (Figura 8.4) para el análisis químico de las mismas y la determinación de los porcentajes de remoción.

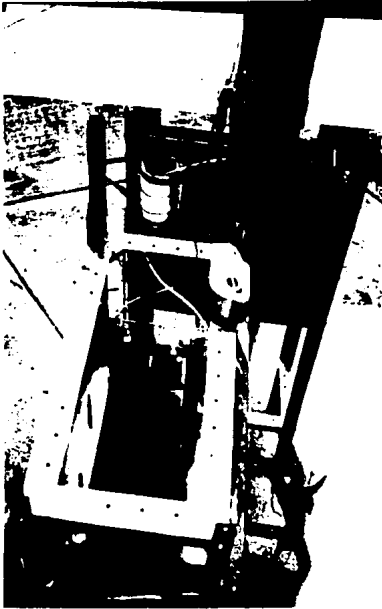


Figura 8.3 Módulos experimentales en operación



Figura 8.4 Comparación entre agua residual cruda y agua tratada

El muestreo y análisis se llevó a cabo de acuerdo al siguiente programa (Tabla 8.1).

Tabla 8.1 Programa de muestreo y análisis.

ANÁLISIS	FRECUENCIA		AGUA RESIDUAL	EFLUENTE
	Veces día	No días		
Sólidos sedimen-tables (ml/L)	1	1	X	
Sólidos totales (mg/L)	1	1	X	
Sólidos disueltos (mg/L)	1	1	X	
Sólidos suspendidos (mg/L)	1	1	X	
DBO <sub>5</sub> soluble (mg/L)	1	15	X	X
DQO soluble (mg/L)	1	15	X	X

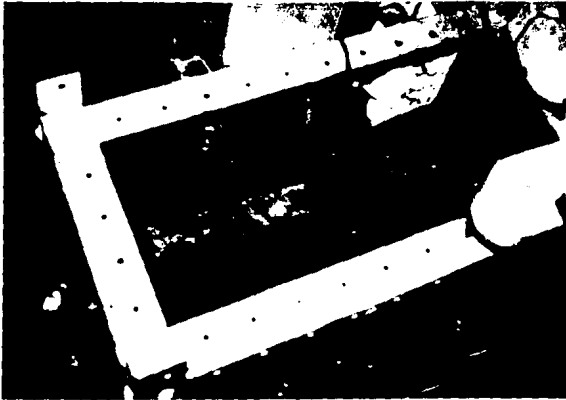
Cabe destacar que las muestras del agua residual cruda fueron tomadas en la descarga de la bomba dosificadora y las del efluente en la salida de la última sección de fondo inclinado. Las pruebas de DBO5 y DQO fueron divididas en dos etapas variando únicamente la cantidad de oxígeno.

**1ra. ETAPA (Figura 8.3):**

No. de bombas de oxígeno por módulo:	1
No. de salidas por bomba:	2
No. de "Cortinas aereadoras por módulo":	2

**2a. ETAPA (Figuras 8.5 y 8.6):**

No. de bombas de oxígeno por módulo:	2
No. de salidas por bomba:	2
No. de "Cortinas aereadoras por módulo":	4



**Figura 8.5** Módulo de "Lodos activados con recirculación hidráulica" 2a. etapa.

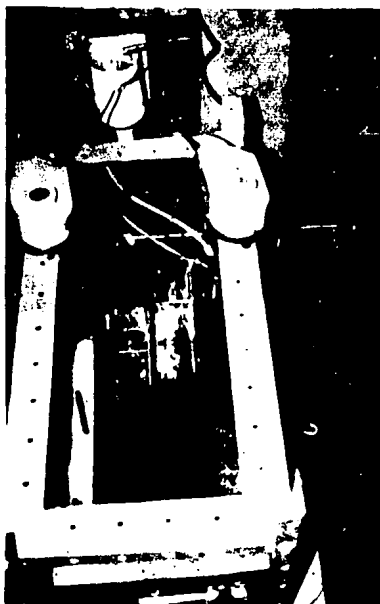


Figura 8.6 Módulo de "Placas Biológicas" 2a. etapa.



---

## CAPITULO 9

---

### RESULTADOS

Los sólidos contenidos en el agua residual cruda, muestreada en la descarga de la bomba dosificadora son:

Sólidos Sedimentables	= 0 ml/L
Sólidos Totales	= 634.5 mg/L
Sólidos Disueltos	= 552 mg/L
Sólidos Suspendidos	= 82 mg/L

En las tablas 9.1-9.8 se presentan los valores obtenidos en los análisis de Demanda Química (DQO) y Bioquímica (DBO<sub>5</sub>) de Oxígeno Solubles, realizados tanto al agua residual cruda como a la tratada.

En cada tabla se indican los valores obtenidos en mg/L de DBO<sub>5</sub> o DQO según corresponda, indicado a qué módulo y a qué etapa pertenecen.

La última columna de datos muestra el porcentaje de remoción del parámetro correspondiente, cuyos resultados se grafican posteriormente (Figuras 9.1 - 9.8).

**TABLA 9.1 DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>)  
FLACAS BIOLÓGICAS 1a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Influyente (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	147.50	55.00	62.71
2	140.00	54.00	61.43
3	130.00	47.50	63.46
4	133.34	47.50	64.38
5	141.67	55.00	61.18
6	74.17	26.00	64.95
7	124.17	42.50	65.77
8	135.23	51.21	62.13
9	128.15	47.20	63.17
10	95.00	36.43	61.65
11	122.00	43.92	64.00
12	129.50	47.59	63.25
13	115.25	41.05	64.38
14	135.34	50.47	62.71
15	127.26	46.56	63.41
<b>Suma</b>	<b>1878.58</b>	<b>691.93</b>	<b>948.58</b>
<b>Promedio</b>	<b>125.24</b>	<b>46.13</b>	<b>63.24</b>

# % REMOCION DBO

## PLACAS BIOLÓGICAS

→ 1a. ETAPA

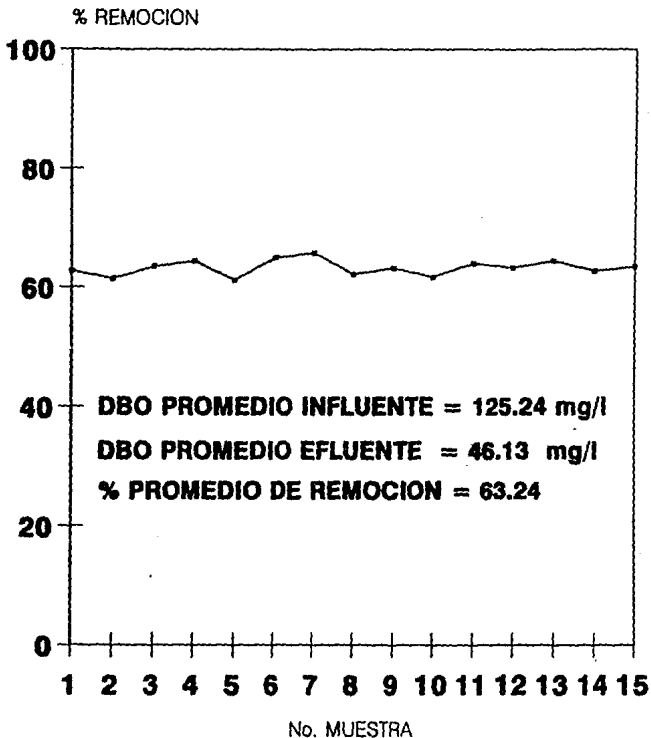


Figura 9.1

**TABLA 9.2 DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>), LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA 1a. ETAPA**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Influyente (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	147.50	57.50	61.02
2	140.00	61.50	56.07
3	130.00	51.50	60.38
4	133.34	51.50	61.38
5	141.67	58.30	58.85
6	74.17	30.50	58.88
7	124.17	47.50	61.75
8	135.23	59.77	55.80
9	128.15	53.31	58.40
10	95.00	41.64	56.17
11	122.00	48.92	59.90
12	129.50	53.42	58.75
13	115.25	48.63	57.80
14	135.34	53.93	60.15
15	127.26	51.21	59.76
<b>Suma</b>	<b>1878.58</b>	<b>769.13</b>	<b>885.06</b>
<b>Promedio</b>	<b>125.24</b>	<b>51.27</b>	<b>59.00</b>

# % REMOCION DBO

## LODOS ACTIVADOS

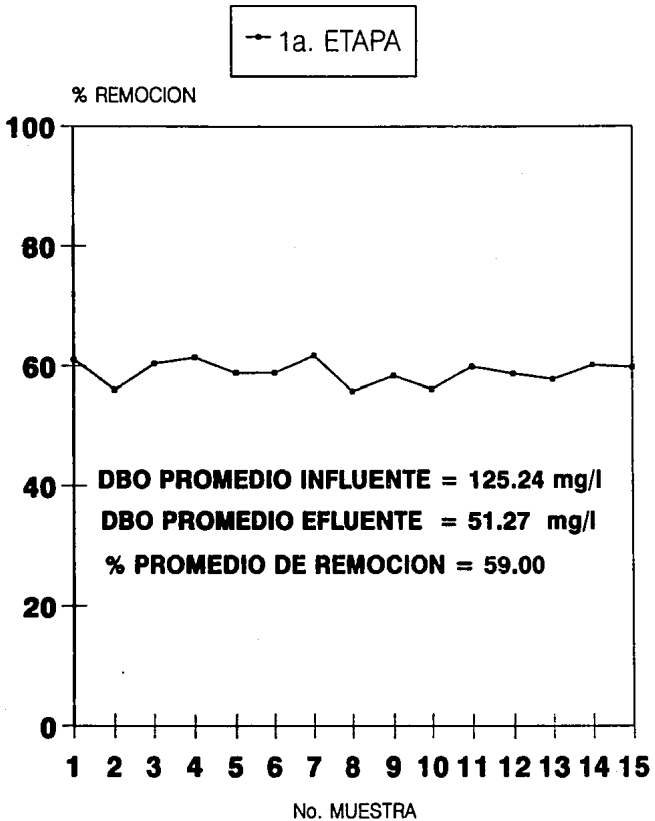


Figura 9.2

**TABLA 9.3 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)  
PLACAS BIOLOGICAS 1a. ETAPA.**

No. de Muestra	DQO Influyente (mg/L)	DQO Efuyente (mg/L)	% de Remoción
1	200.00	80.00	60.00
2	270.00	94.00	65.19
3	200.00	80.00	60.00
4	224.00	86.40	61.43
5	240.00	90.00	62.50
6	230.40	89.60	61.11
7	220.00	86.40	60.73
8	211.20	86.40	59.09
9	215.40	86.16	60.00
10	235.00	93.29	60.30
11	223.50	84.04	62.40
12	232.80	86.14	63.00
13	221.60	87.97	60.30
14	238.50	93.97	60.60
15	224.45	86.86	61.30
<b>Suma</b>	<b>3386.85</b>	<b>1311.23</b>	<b>917.95</b>
<b>Promedio</b>	<b>225.79</b>	<b>87.42</b>	<b>61.20</b>

# % REMOCION DQO

## PLACAS BIOLÓGICAS

→ 1a. ETAPA

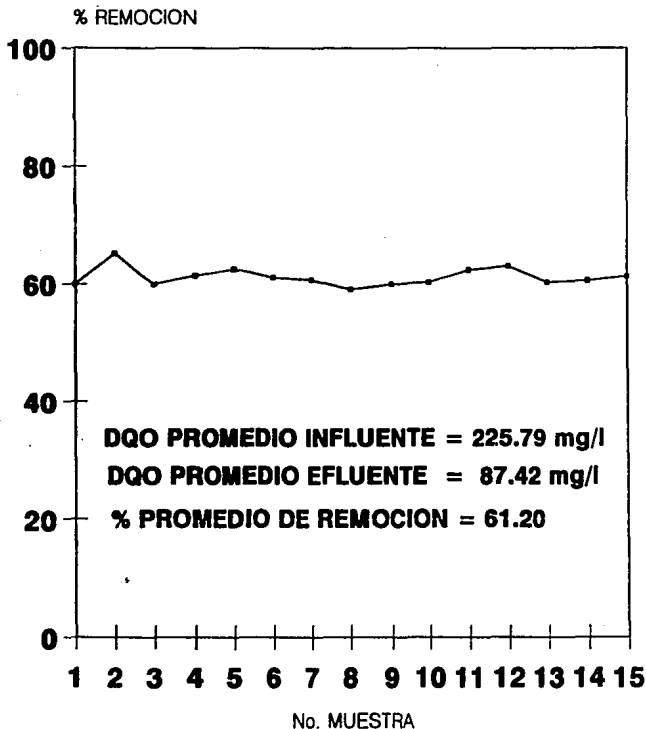


Figura 9.3

**TABLA 9.4 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO), LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA 1a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DQO Influyente (mg/L)</b>	<b>DQO Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	200.00	90.00	55.00
2	270.00	130.00	51.85
3	200.00	90.00	55.00
4	224.00	99.84	55.43
5	240.00	110.00	54.17
6	230.40	101.76	55.83
7	220.00	96.00	56.36
8	211.20	96.00	54.55
9	215.40	99.08	54.00
10	235.00	105.04	55.30
11	223.50	102.03	54.35
12	232.80	108.25	53.50
13	221.60	104.15	53.00
14	238.50	107.32	55.00
15	224.45	101.52	54.77
<b>Suma</b>	<b>3386.85</b>	<b>1540.99</b>	<b>818.11</b>
<b>Promedio</b>	<b>225.79</b>	<b>102.73</b>	<b>54.54</b>



# % REMOCION DQO

## LODOS ACTIVADOS

1a. ETAPA

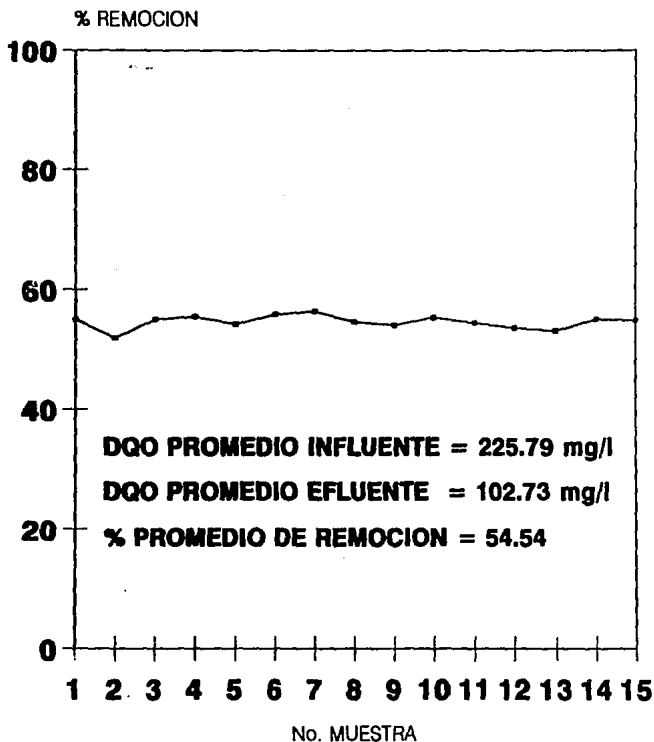


Figura 9.4

**TABLA 9.5 DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>)  
PLACAS BIOLÓGICAS 2a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Influyente (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	38.33	4.17	89.12
2	83.33	8.33	90.00
3	70.83	7.50	89.41
4	95.83	8.33	91.31
5	139.17	10.83	92.22
6	139.17	13.33	90.42
7	122.37	13.46	89.00
8	98.58	11.93	87.90
9	110.20	10.89	90.12
10	65.42	7.10	89.15
11	115.20	12.79	88.90
12	78.40	7.06	90.99
13	110.25	12.01	89.11
14	88.00	8.8	90.00
15	94.44	9.06	90.41
<b>Suma</b>	<b>1449.52</b>	<b>145.59</b>	<b>1348.06</b>
<b>Promedio</b>	<b>96.63</b>	<b>9.71</b>	<b>89.97</b>

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

# % REMOCION DBO

## PLACAS BIOLÓGICAS

→ 2a. ETAPA

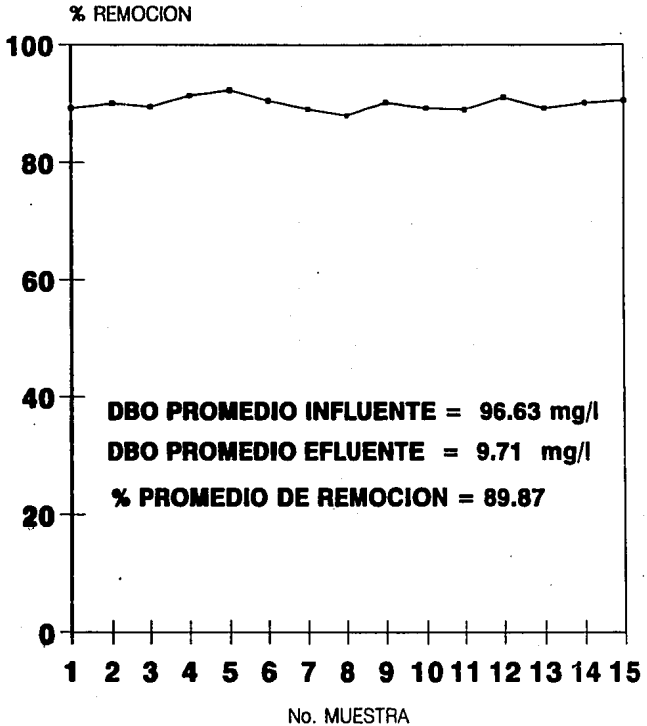


Figura 9.5

**TABLA 9.6 DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>), LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA 2a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Influyente (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	38.33	6.67	82.60
2	83.33	12.50	85.00
3	70.83	10.00	85.88
4	95.83	13.33	86.09
5	139.17	20.83	85.03
6	139.17	20.83	85.03
7	122.37	20.07	83.60
8	98.58	15.40	84.38
9	110.20	16.53	85.00
10	65.42	11.18	82.91
11	115.20	19.35	83.20
12	78.40	10.97	86.00
13	110.25	17.09	84.50
14	88.00	13.11	85.10
15	94.44	14.22	84.94
<b>Suma</b>	<b>1449.52</b>	<b>222.08</b>	<b>1269.26</b>
<b>Promedio</b>	<b>96.63</b>	<b>14.80</b>	<b>84.62</b>

# % REMOCION DBO LODOS ACTIVADOS

→ 2a. ETAPA

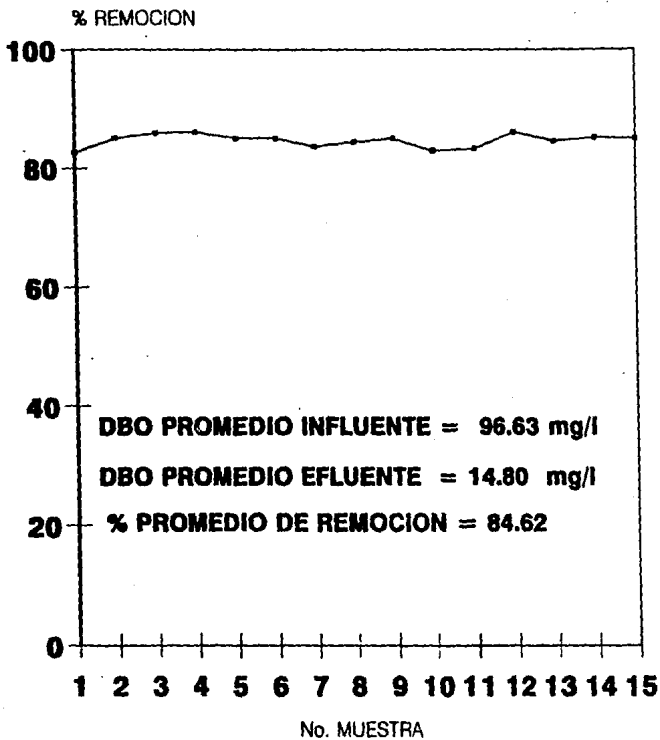


Figura 9.6

**TABLA 9.7 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)  
PLACAS BIOLÓGICAS 2a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DQO Influyente (mg/L)</b>	<b>DQO Efluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	248.00	41.40	83.31
2	247.20	32.00	87.06
3	230.00	36.80	84.00
4	266.80	41.40	84.48
5	257.80	36.80	85.73
6	257.60	36.80	85.71
7	243.80	38.64	84.15
8	245.70	35.38	85.60
9	254.20	42.19	83.40
10	255.10	38.90	84.75
11	244.80	37.89	84.53
12	259.35	35.14	86.45
13	254.40	38.38	84.91
14	242.00	35.94	85.15
15	245.60	37.57	84.70
<b>Suma</b>	<b>3752.35</b>	<b>565.21</b>	<b>1273.93</b>
<b>Promedio</b>	<b>250.15</b>	<b>37.68</b>	<b>84.92</b>

# % REMOCION DQO PLACAS BIOLÓGICAS

→ 2a. ETAPA

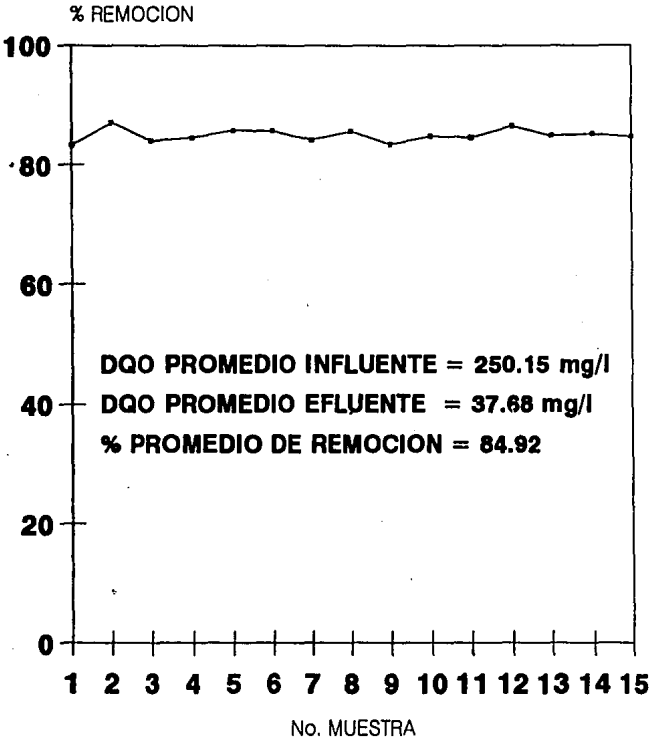


Figura 9.7

**TABLA 9.8 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO), LODOS ACTIVADOS CON RECIRCULACION HIDRAULICA 2a. ETAPA.**

<b>No. de Muestra</b>	<b>DQO Influyente (mg/L)</b>	<b>DQO Effluente (mg/L)</b>	<b>% de Remoción</b>
1	248.00	50.60	79.60
2	247.20	45.20	81.72
3	230.00	46.00	80.00
4	266.80	50.60	81.03
5	257.80	50.60	80.37
6	257.60	51.52	80.00
7	243.80	46.00	81.13
8	245.70	47.91	80.50
9	254.20	51.34	79.80
10	255.10	47.70	81.30
11	244.80	47.49	81.30
12	259.35	49.48	80.60
13	254.40	51.00	79.95
14	242.00	46.46	80.80
15	245.60	46.66	81.00
<b>Suma</b>	<b>3752.35</b>	<b>728.56</b>	<b>1208.72</b>
<b>Promedio</b>	<b>250.15</b>	<b>48.57</b>	<b>80.58</b>



# % REMOCION DQO

## LODOS ACTIVADOS

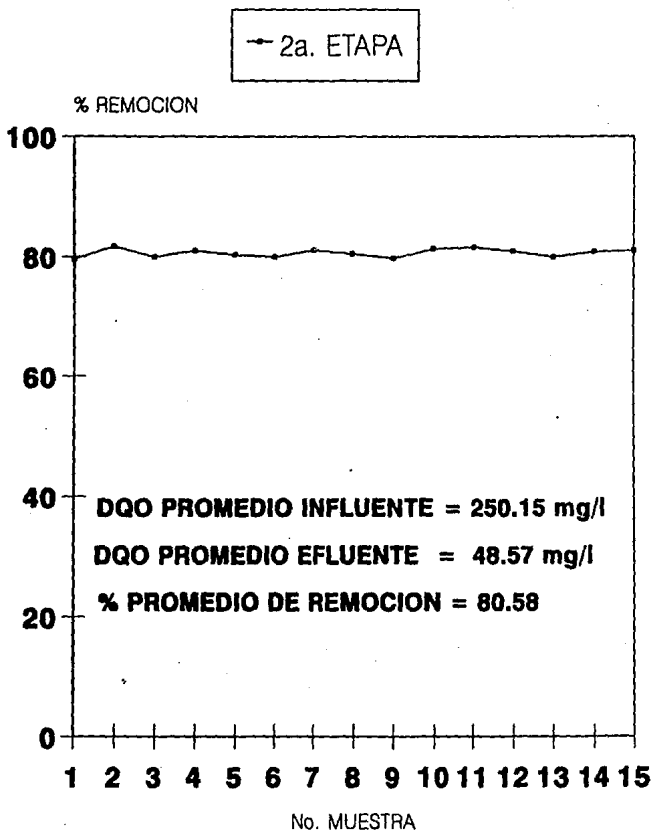


Figura 9.8

---

## CAPITULO 10

---

### PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS

El conjunto de sólidos suspendidos que entran a un sistema de tratamiento, así como los sólidos biológicos generados en el tratamiento biológico, son descargados en algún punto del proceso de tratamiento. El tipo y cantidad de lodos generados depende hasta cierto punto de los tipos de tratamiento primarios y secundarios empleados.

#### 10.1 CANTIDAD Y CARACTERISTICAS DEL LODO

El lodo generado en un sistema de tratamiento está formado por los sólidos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua no tratada que han sido eliminados en el sedimentador primario, junto con los sólidos orgánicos generados en el tratamiento secundario y que son eliminados en el sedimentador secundario.

La cantidad normal de sólidos suspendidos en un agua residual doméstica es de 90 g/día por persona y la concentración de los mismos es de 200 a 250 mg/L<sup>1</sup> dependiendo de la calidad del suministro de agua. De estos aproximadamente el 60 % se eliminan en la sedimentación primaria, el resto es oxidado en el tratamiento secundario o incorporado a la masa biológica. La cantidad de sólidos generados en el proceso secundario varía entre 0.4 y 0.5 Kg/Kg de DBO<sub>5</sub> aplicada para los sistemas de película fija y dependiendo de la edad del lodo entre 0.2-1.0 Kg/Kg de DBO<sub>5</sub> aplicada para los de licor mezclado.

El contenido de agua en los lodos está compuesta por una fracción libre y separable por sedimentación, otra atrapada en los intersticios de las partículas de los flóculos, separable por sistemas mecánicos y la ligada químicamente en el interior o exterior de las células bacterianas y separable únicamente por la destrucción de las células.

El contenido de agua en el volumen del lodo es por lo general del 70 al 75%, por lo que todas las técnicas de tratamiento de los lodos van dirigidos a la reducción del agua y por lo tanto del volumen de los lodos.

---

<sup>1</sup> STEEL Ernest W., Abastecimiento de Agua y Alcantarillado, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981, p. 521

## 10.2 TRATAMIENTO DEL LODO

El tratamiento del lodo consiste en un conjunto de procesos biológicos, químicos y físicos, los cuales se aplican para alterar las características del lodo a fin de mejorar su deshidratación. Los procesos biológicos dan lugar al mismo tiempo a una cierta disminución del contenido total de sólidos (alrededor del 35 %).

Los procesos de tratamiento incluye la digestión de los lodos (aerobios y anaerobios), coagulación química y tratamiento térmico. La selección del proceso de tratamiento debe estar basado en la factibilidad técnica-económica.

### 10.2.1 DIGESTION ANAEROBIA

En la digestión anaerobia los lodos son calentados y sometido a un alto grado de mezclado. La temperatura se mantiene a 35 °C, el mezclado es suficiente para mezclar completamente el contenido del reactor una vez al día.

La digestión anaerobia es un proceso de dos etapas, en las cuales los compuestos orgánicos complejos presentes en el lodo en primer lugar son descompuestos en productos mas simples (principalmente ácidos grasos de cadena corta). Estos compuestos son reducidos a continuación a metano y anhídrido carbónico por medio de un grupo diferentes de bacterias.

Los sólidos digeridos procedentes de los digestores anaerobios pueden deshidratarse, sin tratamiento adicional en lechos de secado.

### 10.2.2 DIGESTION AEROBIA

Los procesos aerobios, son mucho menos susceptibles a las alteraciones biológicas que los anaerobios. Los sistemas aerobios contienen un gran número de organismos distintos los cuales pueden oxidar los compuestos orgánicos complejos por diversas vías bioquímicas y por lo tanto no se ven afectados tan fácilmente por las sustancias tóxicas.

La digestión aerobia consigue una reducción de sólidos volátiles comparable a la de los digestores anaerobios.

El lodo digerido por vía aerobia, correctamente acondicionado y manejado, puede deshidratarse en lechos de secado, filtros al vacío ó por prensado. El tratamiento químico a veces es necesario para un secado satisfactorio para procesos mecánico.

### 10.2.3 TRATAMIENTO QUIMICO

El tratamiento químico puede aplicarse a lodos digeridos o no. Los productos químicos que se aplican son coagulantes metálicos (sales de aluminio y de hierro) y polímeros.

El mecanismo de tratamiento químico, consiste en la neutralización de las cargas eléctricas y la formación de puentes por medio de los polímeros que dan lugar a la agrupación de las partículas individuales en estructuras entrelazadas con suficiente rigidez y porosidad que permite la salida del agua.

Las dosis necesarias de químicos son función del pH, alcalinidad, concentración de fosfatos y concentración de sólidos, tiempo de almacenamiento del lodo y origen del mismo (lodo primario o secundario). Las dosis normales para la utilización de cloruro férrico y cal para un lodo con un 5 % de sólidos, es de 1000 mg/L de  $FeCl_3$  y de 3500 mg/L de cal. La dosis de polímero son de 100 mg/L, lo cual es ventajoso ya que reduce el costo del tratamiento químico al tiempo que reduce la masa total del lodo y su contenido de materiales inertes. Los polímeros pueden ser aniónicos, catiónicos o no iónicos. La determinación del tipo de polímero y su dosis adecuada debe hacerse por medio de ensayos de pruebas de jarras.

### 10.2.4 TRATAMIENTO TERMICO

El agua contenida en los lodos, parte se encuentra en estado libre, atrapada en el floculo y asociada con los sólidos. El tratamiento térmico destruye la estructura de las células liberando incluso el agua atrapada dentro de las mismas.

Este proceso de tratamiento permite una deshidratación mecánica del lodo hasta un grado no alcanzable mediante otras técnicas de tratamiento, con lo que se consigue normalmente concentraciones de sólidos del orden del 40 al 50 % en la deshidratación con filtros de vacío o centrífuga.

En el tratamiento térmico los lodos se mezclan con aire y se calientan de 180 - 200 °C. El tiempo de retención del proceso es de 20 a 30 minutos a presiones del orden de 15 Kg/cm<sup>2</sup>.

## 10.2.5 OTROS PROCESOS DE TRATAMIENTO

Entre otros procesos de tratamiento de lodos, se pueden mencionar:

- **Espesado**
- **Deshidratación.**
- **Combustión**
- **Congelación.**

El espesado es una técnica de concentración por la cual los lodos relativamente diluidos, aumenta su concentración de sólidos y se disminuye su volumen, reduciendo por lo tanto las unidades de tratamiento posterior; los equipos utilizados son los sedimentadores estáticos y los sedimentadores por flotación.

Los sistemas de deshidratación van desde los lechos de secado a sistemas mecánicos de alta complejidad (filtros al vacío y filtros prensa). La selección del sistema de deshidratación depende del proceso de tratamiento anterior y el sistema de manejo posterior y la forma de la disposición final de los lodos secos.

La combustión (incineración) de los lodos, reduce los lodos a unas cenizas sin contenido de humedad, el costo de este proceso está justificado en pocos casos, a menos que la disposición de terrenos para la disposición final esté muy limitada y las distancias de transporte sean muy grandes, los principales equipos utilizados son: Equipos de pirólisis, incineradores ciclónicos, hornos eléctricos, incineradores de lecho fluidizado y hornos de pisos.

La congelación puede ser útil para la deshidratación de los lodos, pero la congelación es muchas veces demasiado rápida para los lodos biológicos, lo cual tiene como resultado una compactación de los floculos y mal drenaje del agua al descongelar.

---

## CAPITULO 11

---

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por los resultados obtenidos, se concluye que la segunda etapa experimental presenta el mayor porcentaje promedio de remoción de la demanda Bioquímica y Química de Oxígeno (Tabla 11.1).

**Tabla 11.1 PORCENTAJE DE REMOCION 2a. ETAPA**

PLACAS BIOLOGICAS		Lodos Activados	
% DQO	% DBO5	% DQO	% DBO5
84.92	89.87	80.58	84.62

Dentro de esta 2da. etapa, el sistema biológico con más alto porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO es el de "PLACAS BIOLOGICAS", por lo que resulta ser un buen sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas que puede ser empleado como un tratamiento alternativo.

Así mismo, las características de sedimentación de los lodos provenientes del módulo de "PLACAS BIOLOGICAS" fueron mejores. En este sistema la mayoría de los lodos generados y sedimentados se encontraban en la primera sección de las tolvas, en la segunda sección los lodos eran pocos y tanto en la tercera como en la cuarta prácticamente no existían.

En cuanto al sistema de "Lodos activados con recirculación hidráulica" la tolvas con mayor cantidad de lodos sedimentados fueron la primera y la segunda, con menor cantidad en la tercera y menor aún en la cuarta.

Los costos de tratamiento del agua residual, estimados para los diferentes procesos presentados en este trabajo, se resumen en la Tabla 11.2.

Tabla 11.2 COSTOS DE TRATAMIENTO NS/M3 DE AGUA TRATADA

TRATAMIENTO	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO						
	2	10	20	50	100	200	400
Placas biológicas	1.89	0.94	0.73	0.61	0.60	0.59	.57
Lodos activados con recirculación hidráulica	2.46	1.33	1.04	0.89	0.81	0.76	0.69
Lodos activados convencionales	2.65	1.47	1.15	0.99	0.90	0.85	0.77

A partir de las observaciones y datos obtenidos en la operación de los dos módulos experimentales, se recomienda:

- Colocar chaffines en el tanque de aereación del sistema de lodos activados en la parte inferior de la sección de sedimentación parcial para obligar a los lodos sedimentados a regresar a la zona aereada.
- Extender el análisis para los dos sistemas a una mayor cantidad de parámetros con aguas residuales domésticas de características diferentes al agua residual empleada en este estudio (Zona Xochimilco).

---

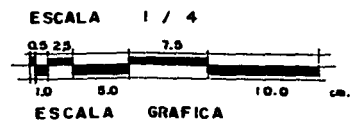
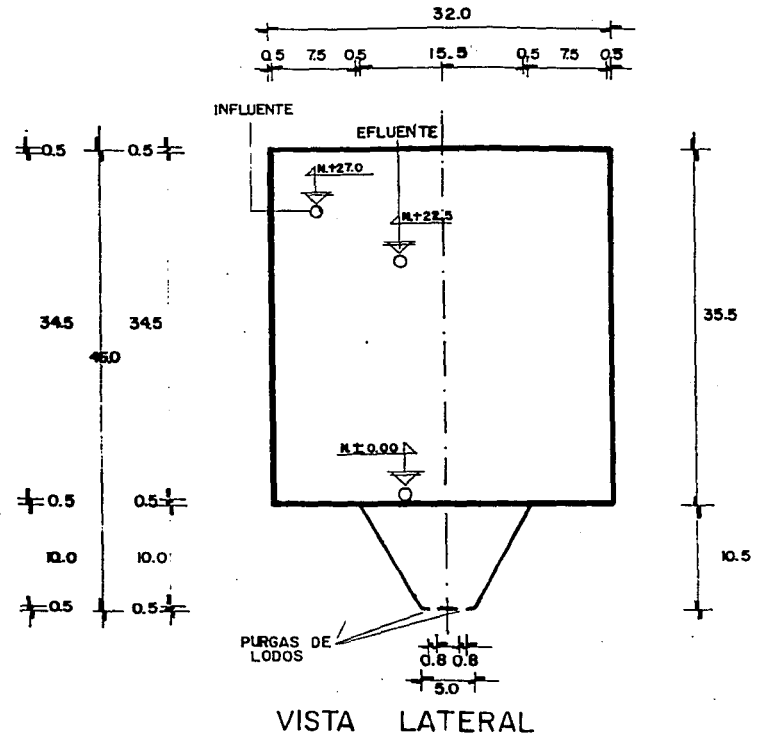
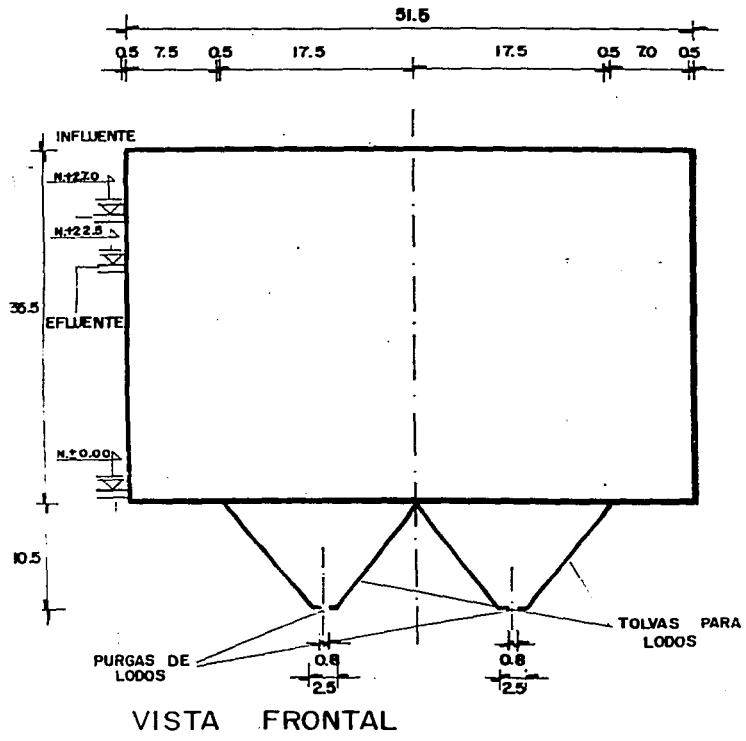
## APENDICE A

---

### PLANO

- A.1 Módulo experimental "Placas Biológicas", vistas frontal y lateral.
- A.2 Módulo experimental "Placas Biológicas", vista superior y perspectiva.
- A.3 Módulo experimental "Placas Biológicas", cortes A-A' y B-B'
- A.4 Módulo experimental "Lodos activados con recirculación hidráulica", vista frontal y lateral.
- A.5 Módulo experimental "Lodos activados con recirculación hidráulica", vista superior y perspectiva.
- A.6 Módulo experimental "Lodos activados con recirculación hidráulica", cortes A-A' y B-B'



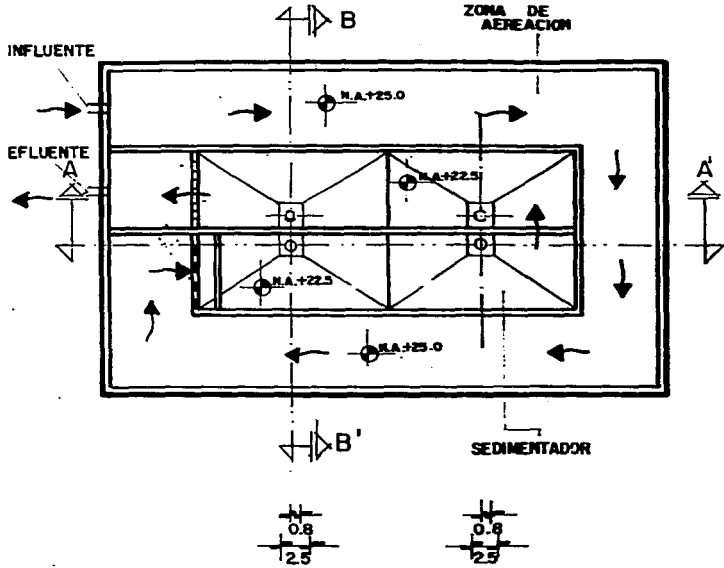
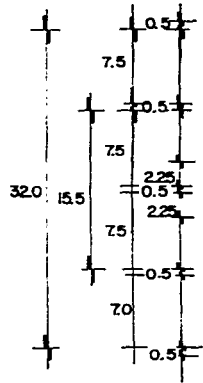
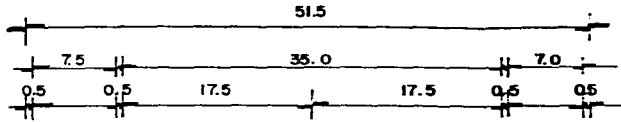


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

MÓNICA LOPEZ SANTOS

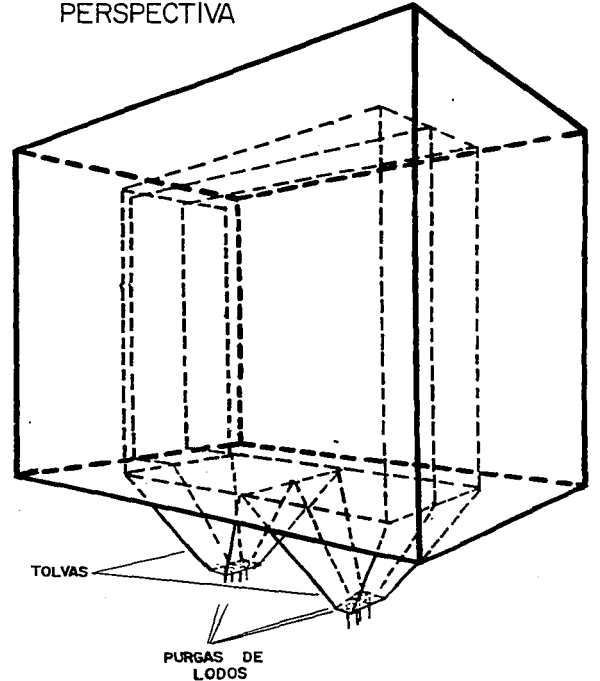
FIGURA A.1 MÓDULO EXPERIMENTAL "PLACAS BIOLÓGICAS" VISTA FRONTAL Y LATERAL



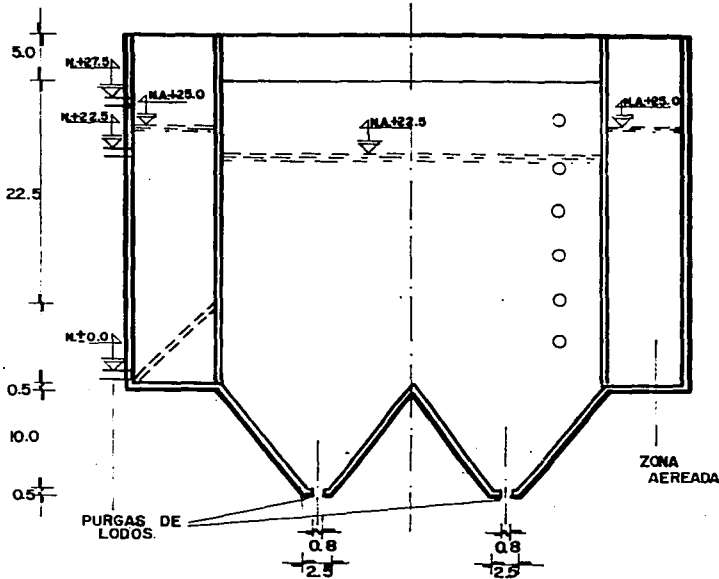
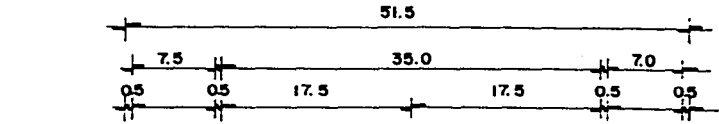
VISTA SUPERIOR



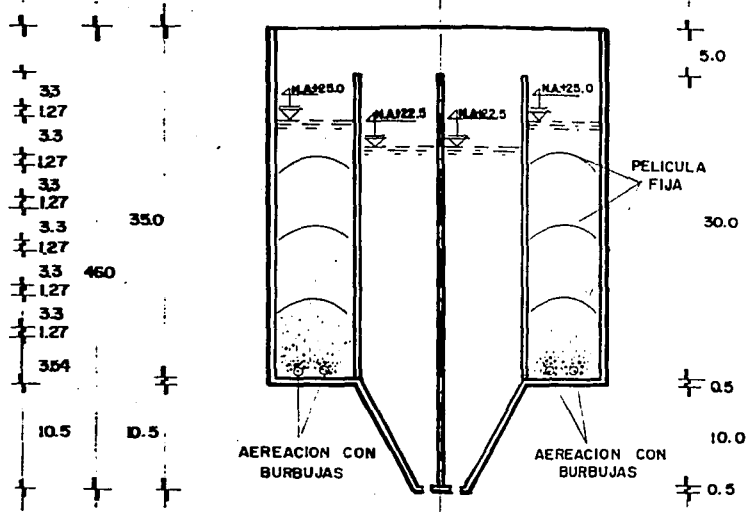
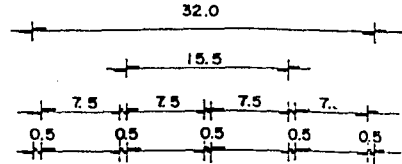
PERSPECTIVA



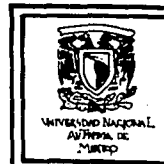
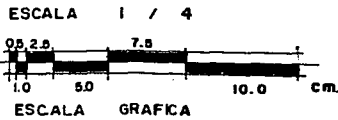
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE QUÍMICA  
 MONICA LOPEZ SANTOS  
 FIGURA A.2 MODULO EXPERIMENTAL  
 "PLACAS BIOLÓGICAS"  
 VISTA SUPERIOR Y PERSPECTIVA



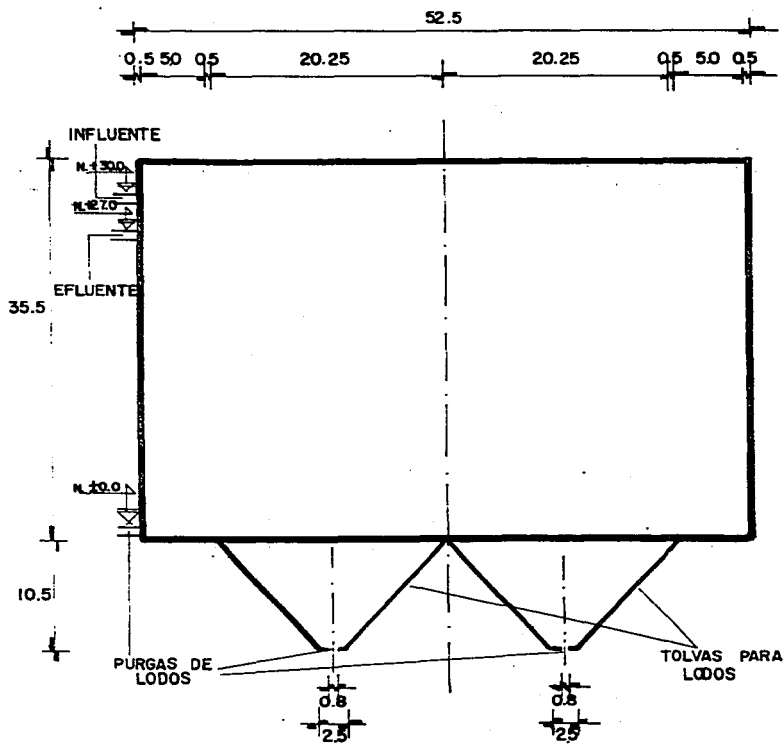
CORTE A-A'



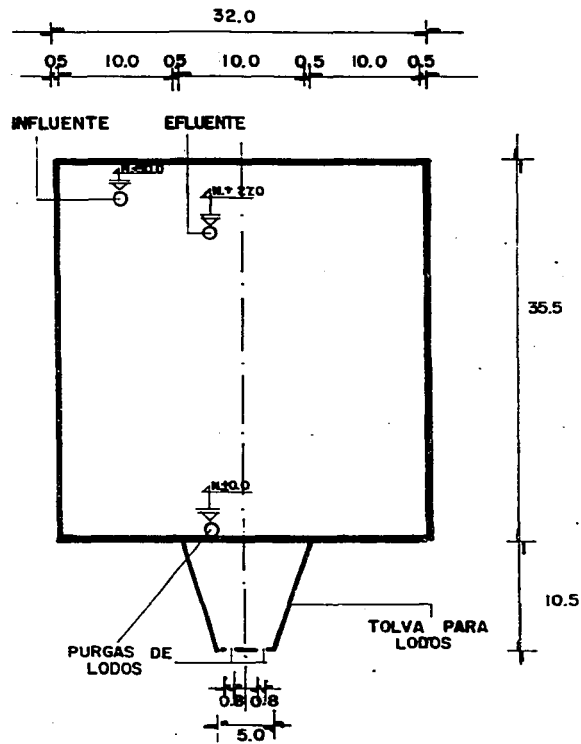
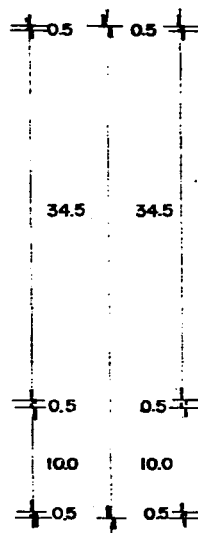
CORTE B-B'



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE QUÍMICA  
 MONICA LOPEZ SANTOS  
 FIGURA A.3 MODULO EXPERIMENTAL  
 "PLACAS BIOLÓGICAS"  
 CORTES A-A' Y B-B'



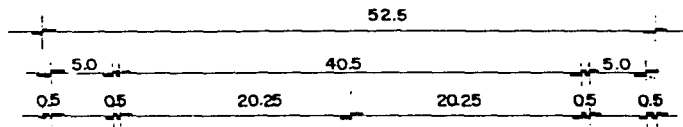
VISTA FRONTAL



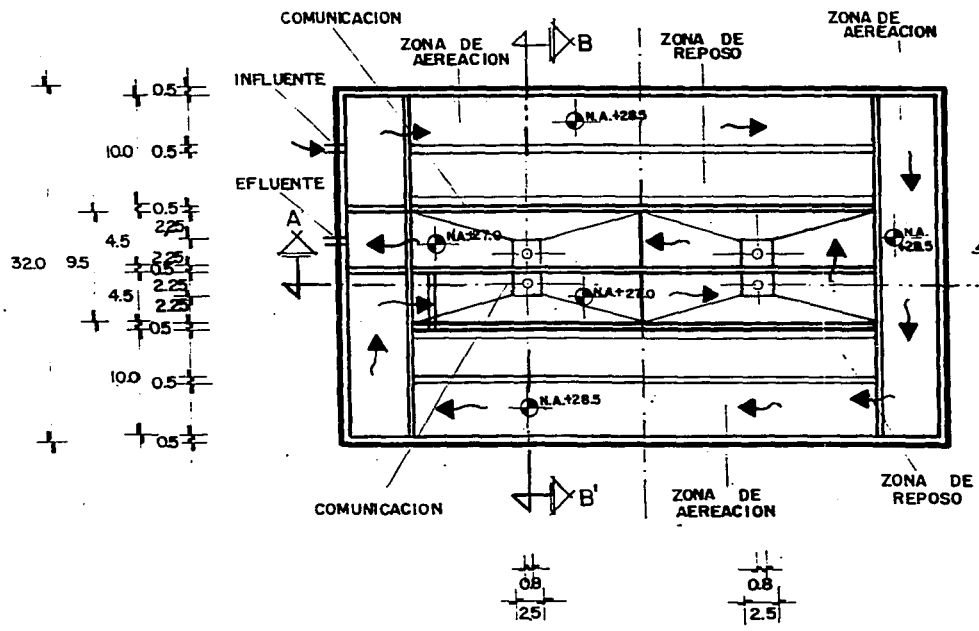
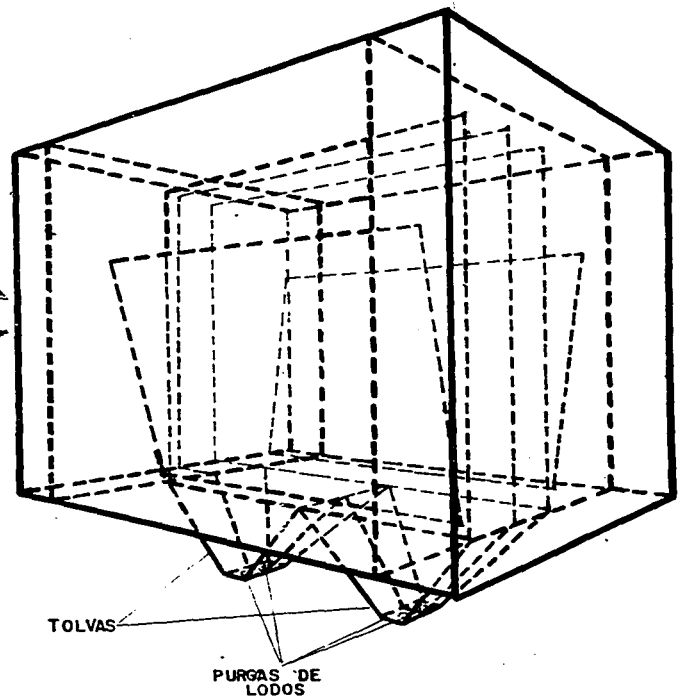
VISTA LATERAL



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE QUÍMICA  
 MONICA LOPEZ SANTOS  
 FIGURA A.4 MÓDULO EXPERIMENTAL  
 'LÓDOS ACTIVADOS CON  
 RECIRCULACIÓN HIDRAULICA'  
 VISTA FRONTAL Y LATERAL

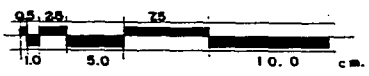


PERSPECTIVA



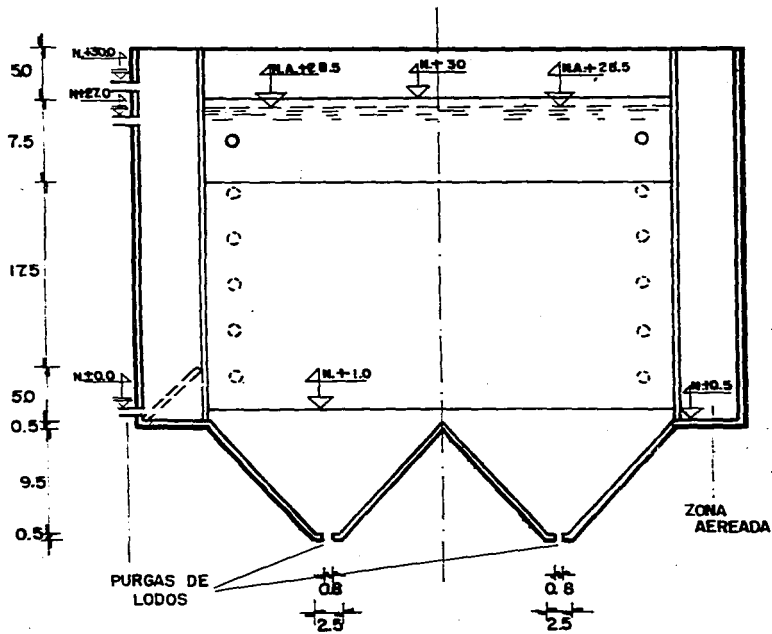
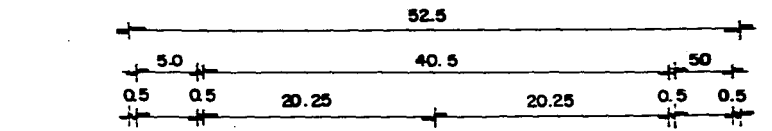
VISTA SUPERIOR

ESCALA 1 / 4

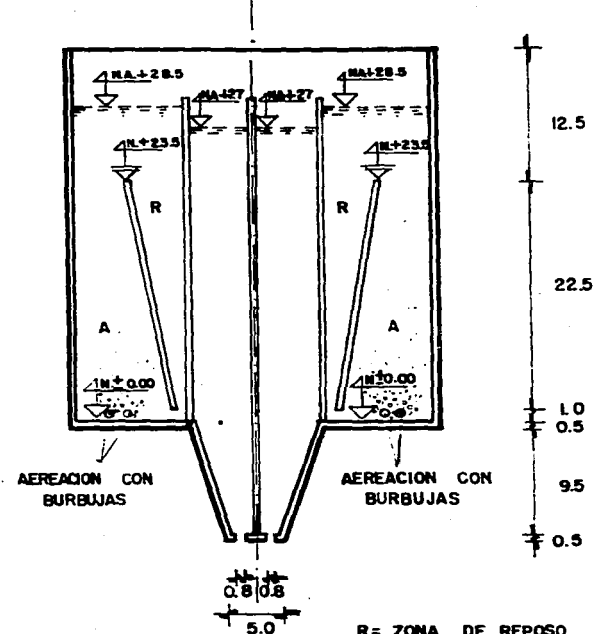
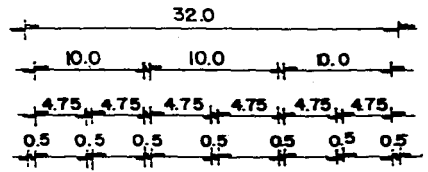


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE QUÍMICA  
 MONICA LOPEZ SANCOS

FIGURA A.5 MODULO EXPERIMENTAL  
 "Lodos Activados con  
 Recirculación Hidráulica"  
 VISTA SUPERIOR Y PERSPECTIVA



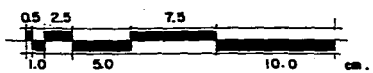
CORTE A-A'



CORTE B-B'

R = ZONA DE REPOSO  
A = ZONA DE AERACION

ESCALA 1 / 4



ESCALA GRAFICA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA  
MONICA LOPEZ SANTOS

FIGURA A.6 MODULO EXPERIMENTAL  
'LODOS ACTIVADOS CON CIRCULACION HIDRAULICA'  
CORTES A-A' Y B-B'

## BIBLIOGRAFIA

**BENEFIELD Larry D. & RANDALL C. W.**, Biological Process Design for Wastewater Treatment, 1a. ed., USA, Prentice-Hall, Inc., 1980.

**Departamento del sanidad del estado de Nueva York**, Manual de tratamiento de aguas, 1a. Ed. México, Limusa S.A., 1991.

**Departamento del sanidad del estado de Nueva York**, Manual de tratamiento de aguas negras, 1a. Ed. México, Limusa S.A., 1991.

**FAIR, Geyer, Okun.**, Purificación de Aguas, Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales, 1a. ed. México. Limusa, S.A. de C.V., 1971.

**G.M. Fair, J.C. Charles & D.A. Okun**, Purificación de Aguas, Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales, Vol. II, 1a. ed., México. Limusa, S.A., 1971.

**LOPEZ Alegría Pedro**, Abastecimiento de Agua Potable y Disposición y Eliminación de Excretas, México, Instituto Politécnico Nacional, 1990.

**METCALF & EDDY**, Tratamiento y Depuración de Aguas Residuales, 1a. Ed. Traducido al español por Labor S.A., España. 1977.

**NALCO CHEMICAL COMPANY**, The Nalco Water Handbook, 2a. ed. USA, McGraw-Hill, 1988.

**RAMALHO Rubens S.**, Tratamiento de Aguas Residuales, 1a. ed., traducido al español, España Reverte, S.A., 1991.

**Standard Methods for examination of water and wastewater**, 17a. Ed. APHA, AWWA, Washington D.C., 1989

**STEEL Ernest W.**, Abastecimiento de Agua y Alcantarillado, 5a. ed., España. Gustavo Gili, S.A. 1981.

**Tebbutt T.H.Y.**, Fundamentos de control de la calidad del agua, 1a. Ed., México, Limusa, S.A., 1990.

**Water Pollution Control Federation, Operation of Wastewater Treatment Plants, MOP 11, USA, Landcaster Press., 1976.**

**Water Pollution Control Federation, Wastewater Treatment Plants Design, MOP 8, USA, Landcaster Press., 1977.**

**WINKLER M. Tratamiento Biológico de Aguas de desecho, 1a. Ed., México, Limusa, S.A., 1986.**

**WOLFGANG Pürschel, El Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas, 1a. Ed., España. Urmo, S.A., 1976.**