

7  
2 of

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

LIBRO DE REGISTRO  
1987

MODIFICACIONES A LA OPERACION DEL BIOFILTRO  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DE C.U.

TESIS MANCOMUNADA  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N  
JOSE ARIAS DAVILA  
MARIA GUADALUPE HIDALGO PACHECO

1989

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.

## NOMENCLATURA

$V$  = volumen del reactor

$Q$  = gasto de influente

$Q_w$  = gasto de purga

$X_e$  = SSV en el efluente clorificado

$X$  = SSVLM

$X_w$  = SSV en la purga

SSV= sólidos suspendidos volátiles

LM = licor mezclado

$\theta$  = tiempo medio de retención celular

F/M= relación sustrato microorganismos

$S_0$  = sustrato inicial

DBO= demanda bioquímica de oxígeno

DQO= demanda química de oxígeno

SST= sólidos suspendidos totales

SSF= sólidos suspendidos fijos

# INDICE

Pág.

## OBJETIVOS

## INTRODUCCION

1

## 1. RESUMEN

3

## 2. CLASIFICACION DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO

### BIOLOGICO

7

### 2.1 *Fundamentos*

7

### 2.2 *Procesos de tratamiento aerobio de crecimiento suspendido*

9

#### 2.2.1 *Lodos activados*

10

##### 2.2.1.1 *Papel de los microorganismos en el proceso*

12

##### 2.2.1.2 *Parámetros de diseño*

13

##### 2.2.1.3 *Ejemplo de diseño de un proceso de lodos activados*

17

### 2.3 *Procesos de tratamiento aerobio con crecimiento fijo*

26

#### 2.3.1 *Filtro rociador*

26

##### 2.3.1.1 *Ecuaciones de diseño*

32

##### 2.3.1.2 *Características de empaques*

35

##### 2.3.1.3 *Ejemplo de diseño*

37

#### 2.3.2 *Otros procesos*

45

##### 2.3.2.1 *Tratamiento anaerobio*

47

2.3.2.2	Tratamiento aerobio-anaerobio	50
3.	TIPO DE REACTORES Y ECUACIONES CARACTERISTICAS	51
3.1	<i>Fundamentos</i>	51
3.2	<i>Típos de reactores</i>	55
3.2.1	Batch	55
3.2.2	Tanque reactor agitado de flujo continuo	59
3.2.3	Reactor tipo flujo piston	61
3.3	<i>Consideraciones para la selección de un modelo</i>	62
3.3.1	Bases para los modelos	65
3.3.2	Selección del modelo aplicado	67
4.	DESCRIPCION DE EQUIPO	70
4.1	<i>Sistema de alimentación y agua tratada</i>	70
4.1.1	Cárcamo doble de bombeo	72
4.1.2	Cárcamo de bombeo de influente	73
4.1.3	Cárcamo de bombeo de efluente	74
4.2	<i>Filtro percolador</i>	75
4.2.1	Dimensiones y empaque	75
4.2.2	Ventilación	77
4.2.3	Sistema de colección	81
4.3	<i>Sistema distribuidor</i>	81
4.4	<i>Caja partidora</i>	82

	Pág.
4.5 <i>Sedimentador secundario</i>	85
4.5.1 <i>Rastra</i>	89
5. METODOLOGIA	90
5.1 <i>Adaptaciones al sistema</i>	91
5.2 <i>Programa de muestreo</i>	92
5.3 <i>Control operacional</i>	96
6. DISCUSION DE RESULTADOS	98
6.1 <i>Eficiencias de remoción obtenidas con respecto al gasto, recirculación y tiempo de operación</i>	98
6.1.1 <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	98
6.1.2 <i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</i>	101
6.2 <i>Eficiencias obtenidas en el perfil de la biotorre</i>	104
6.3 <i>Estudio de la distribución de sólidos suspendidos en seis puntos medulares del sistema en estudio</i>	104
6.4 <i>Obtención de las constantes "n" y "k"</i>	112
7. CONCLUSIONES	117
8. BIBLIOGRAFIA	120
9. TABLAS DE RESULTADOS	125

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el obtener las condiciones óptimas de operación, implementando para ello la recirculación al sistema Biofiltro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Este trabajo es la continuación de un estudio realizado anteriormente; teniendo como enfoque principal, modificaciones al filtro percolador en los siguientes aspectos:

- 1) Es un estudio que antecede a éste, el sistema fue operado sin recirculación, presentándose rompimiento del flóculo a la salida de la biotorre en el cárcamo de bombeo de efluentes; repercutiendo en la eficiencia del sedimentador. Por consiguiente en este estudio el sistema se operará con recirculación, realizándose también un

seguimiento del comportamiento de los sólidos, con el propósito de observar su repercusión en las eficiencias.

2) Adaptación al sistema en sí.

Eliminar una "zona muerta" en el empaque, ocasionada por el chiflón del sistema distribuidor de influente que no moja dicha área. Por tal motivo se diseñarán 2 tipos de boquillas; una en forma de "Y" y la otra con un corte en el chiflón de 45° para conseguir así, un rociado en el centro del sistema.

3) Con lo anterior se pretende aumentar la calidad del agua que se envía a cisternas para riego de las áreas verdes de Ciudad Universitaria. Así como incrementar la cantidad de sólidos que arrastra el agua tratada por el biofiltro y que originan un rápido taponamiento del lecho filtrante.

## 1. INTRODUCCION

La planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU), tiene como influente las aguas residuales provenientes de la Ciudad Universitaria y de la colonia Copilco El Alto. Esta última es importante ya que asegura un suministro mínimo de agua durante los periodos vacacionales.

Actualmente la planta opera con un gasto de diseño de 40 l/s y consta de: un desarenador que equivale a un pretratamiento, tres sistemas de tratamiento biológico, que con fines de investigación, docencia, trabajan en paralelo, cada uno con su correspondiente sedimentador secundario, un proceso de filtros de arena y por último desinfección mediante dosificación de cloro.

El filtro percolador o biofiltro tiene un gasto de diseño de

10 l/s, y es uno de los tres sistemas con que cuenta la planta, además de lodos activados y biodisco que tratan 20 y 10 l/s respectivamente, esta planta empezó a operar en octubre de 1982.

El biofiltro fue retirado de operación posteriormente por presentar múltiples problemas operativos y como consecuencia baja eficiencia.

Por lo anterior se inició esta investigación en octubre de 1986 principiando con el protocolo de arranque. El estudio comprendió tres aspectos independientes de los cuales corresponde a cada uno su respectivo informe. Con el presente estudio se concluyó la investigación cumpliendo con las metas específicas de cada una de las etapas, sin perder la finalidad principal de; garantizar el gasto de operación con su más alta eficiencia.

## 1. RESUMEN

El presente trabajo muestra los estudios realizados para la evaluación del filtro percolador; sistema biológico que se encuentra en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU). Los puntos desarrollados en los capítulos correspondientes contienen las siguientes especificaciones:

Capítulo 2. Clasificación de Sistemas de Tratamiento Biológico:

- Procesos de tratamiento aeróbico de crecimiento suspendido. En este tipo de proceso se consideró como ejemplo representativo el sistema de lodos activados, para el cual se describen: las bases teóricas, los parámetros de diseño comúnmente empleados como: tiempo medio de re

retención celular y relación  $F/N$ . Se presenta un problema de diseño y su solución.

- Procesos de tratamiento aerobio con crecimiento fijo. Como ejemplo de este tipo de proceso se considera el filtrador rociador que al igual que en el caso anterior se detallan los fundamentos teóricos, las ecuaciones de diseño, las principales características físicas de los medios de empaque, y se presenta un problema de diseño y su solución. Se presentan brevemente los fundamentos teóricos de otros procesos como: lagunas aeradas fosas de estabilización (fotosintética y aeración mecánica).
- Procesos anaerobios. Se describe la digestión de lodos
- Proceso aerobio-anaerobio. Se describe la estabilización facultativa.

### Capítulo 3. Tipo de reactores y ecuaciones características

Se presenta un balance de materia generalizado y se caracterizan y describen las ecuaciones para cada uno de los tipos de reactores biológicos: reactor tipo tanque agitado con flujo continuo, reactor tipo flujo pistón, así como el fundamento teórico de éstos.

Se plantean las consideraciones necesarias para la selección de modelos de reactores, las bases de dichos modelos y por último se fundamenta la selección del modelo aplicado para el tratamiento de datos generados en este estudio.

#### Capítulo 4. Descripción del equipo

En la descripción del equipo se detallan las partes de que consta el sistema filtro percolador que son: sistemas de alimentación y agua tratada, cárcamo doble de bombeo: de in-fluente y efluente; filtro percolador: incluye sistema de colección, distribución, ventilación; caja partidora, sedimentador secundario y su rastra.

#### Capítulo 5. Metodología

La metodología se basó en el control y fijación de ciertas variables operativas como: carga hidráulica, porcentaje de recirculación con dichas cargas, frecuencia de rociado, así como la caracterización y determinación de las condiciones en las cuales el sistema presenta la máxima eficiencia en remoción.

Para los aspectos fisicoquímicos se muestreó en 5 puntos situados a lo largo de la biotorre y en sentido del flujo, para el monitoreo de sólidos suspendidos se fijaron 6 puntos de la

trayectoria en el recorrido del agua en el sistema. Por otra parte se describen las adaptaciones operacionales al sistema distribuidor y se fundamenta el tratamiento estadístico que se aplica en el siguiente capítulo.

## Capítulo 6. Discusión de resultados

En este capítulo se aprecian las gráficas y tablas de las eficiencias de remoción obtenidas con respecto a: gasto, recirculación, tiempo de operación para la Demanda Química de Oxígeno ( $DQO$ ), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), así como la interpretación, y el comportamiento de la eficiencia.

Se presenta el estudio de la distribución de sólidos suspendidos en 6 puntos medulares del sistema, que permite desglosar la relación de la eficiencia del sistema biológico y el sedimentador.

Se obtienen las constantes " $n$ " y " $k$ " empleando el método propuesto por Eckenfelder, para cada carga empleada durante la experimentación con recirculación de 25%.

## Capítulo 7. Conclusiones.

## Capítulo 8. Bibliografía.

## 2. CLASIFICACION DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLOGICO

### 2.1 *Fundamentos*

Los objetivos principales en el tratamiento biológico de aguas de desecho son: remover los sólidos coloidales y estabilizar la materia orgánica.

Los procesos biológicos se clasifican con base en la dependencia de oxígeno de los microorganismos responsables de la oxidación del contenido orgánico contaminante. En procesos aerobios, la estabilización de los contaminantes se realiza por microorganismos aerobios y facultativos; en procesos anaerobios por microorganismos anaerobios y facultativos. Los procesos donde existe la presencia de microorganismos aerobios, anaerobios y facultativos usualmente se denominan sistemas aerobio-anaerobio ó facultativo.

El proceso de tratamiento se lleva a cabo por:

- Operaciones unitarias físicas; las cuales emplean predominantemente fuerzas físicas, por ejemplo: cribado, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración.
  
- Procesos químicos unitarios; que utilizan la reacción entre los contaminantes y ciertos reactivos químicos específicos o reacciones químicas para remover los contaminantes, o convertirlos en otros productos de mayor facilidad de manejo; por ejemplo precipitación, adsorción, desinfección.

Procesos biológicos unitarios que son de gran importancia debido a que como se mencionó anteriormente, remueven del agua los contaminantes (materia orgánica biodegradable en solución), los cuales son convertidos a gases y tejido celular, que es factible de separarle por sedimentación del agua tratada.

Los procesos biológicos unitarios se clasifican en:

	Aerobio:	Sistema con oxígeno disuelto
PROCESO	Anóxico:	Sistema sin oxígeno disuelto, pero se encuentra combinado con $NO_3$ , $SO_4$ , etc.
	Anaerobio:	Sistema con ausencia total de oxígeno.

Dichos procesos individuales pueden a su vez implementarse con los siguientes sistemas:

- Con microorganismos en suspensión
- Con microorganismos fijos en una película
- Combinación de película fija y crecimiento en suspensión.

La combinación de las dos clasificaciones anteriores conduce a una tercera que define ya en concreto a los sistemas.

## 2.2 *Procesos de tratamiento aerobio de crecimiento suspendido*

Los principales sistemas de tratamiento biológico de crecimiento suspendido son: 1) El proceso de lodos activados, 2) El de nitrificación de crecimiento suspendido, 3) Lagunas de aeración, 4) El de digestión aerobia, y 5) Fosas de estabilización de alta tasa. De estos, el proceso de lo-

dos activados es el más comúnmente usado para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas, por esta razón se describe con mayor detalle.

### 2.2.1 Lodos activados

Este proceso se desarrolló en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockport y fue llamado así debido a que involucra la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar aeróbicamente un desecho contaminante. Actualmente existen en operación muchas versiones del proceso original, pero fundamentalmente todos ellos son similares al proceso convencional de lodos activados (ver fig 1), en el cual un desecho, usualmente agua doméstica, es estabilizado biológicamente en un reactor bajo condiciones aeróbicas. El ambiente aerobio se logra por el uso de difusores o bien por aeración mecánica. El contenido del reactor se conoce como licor mezclado. Después que el agua de desecho es tratada en el reactor, la masa biológica resultante es separada del líquido en un tanque sedimentador. De éstos una porción es recirculada al tanque de aeración y la otra debe ser desechada, ya que de otra forma los microorganismos se incrementarían hasta que el sistema no los pudiese mantener por más tiempo, ocasionando problemas operacionales. El nivel al cual la masa biológica puede ser almacenada depende de la eficiencia de tratamiento deseada y otras consideraciones relacionadas

### Procesos de lodos activados

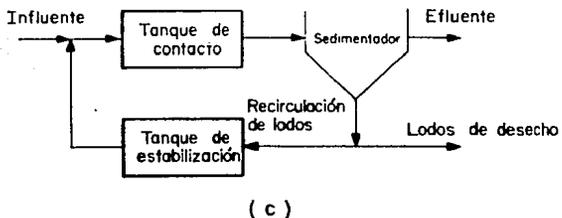
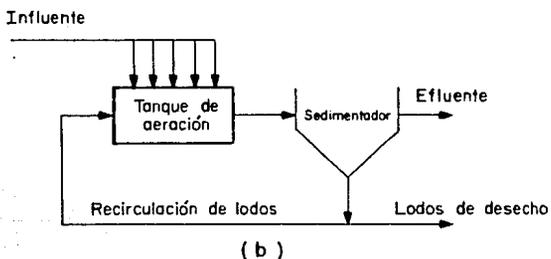
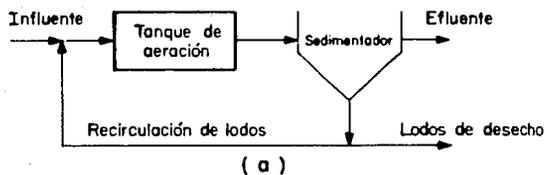


Fig 1 Variaciones de lodos activados a) convencional, b) aeración por etapas, c) contacto-estabilización

con la cinética de crecimiento.

#### 2.2.1.1 Papel de los microorganismos en el proceso

Para diseñar y operar eficientemente los procesos de lodos activados, es primordial entender la importancia de los microorganismos en el sistema.

En la naturaleza el papel de las bacterias es descomponer la materia orgánica producida por otros organismos vivos. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes debido a que ellos son los responsables de la descomposición del material orgánico contaminante. En el reactor o tanque mezclador, una porción del desecho orgánico es usado por bacterias aerobias y facultativas para obtener la energía que utilizan en la síntesis del resto del material orgánico en las nuevas células. Solo una parte del contaminante original es en realidad oxidado a compuestos de baja energía, como  $NO_3$ ,  $SO_4$  y  $CO_2$ , la otra parte es sintetizada dentro del material celular. También se forman muchos productos intermedios antes de obtener el producto final de la oxidación.

Mientras las bacterias son los microorganismos que en realidad degradan la materia orgánica del desecho, las actividades metabólicas de otros microorganismos también son importantes

tes en el sistema de lodos activados. Por ejemplo, los protozoarios y rotíferos actúan como "pulidores" del efluente. Los primeros degradan bacterias dispersas que no flocculan, mientras que los segundos eliminan algunas pequeñas partículas biológicas flocculantes que no sedimentan.

Además, mientras es importante que las bacterias degraden el desecho orgánico con tanta calidad como sea posible, también es importante que formen un flóculo satisfactorio, lo cual es un prerrequisito para la separación efectiva de los sólidos biológicos en la unidad de sedimentación. Esto se observa, ya que al incrementar el tiempo medio de retención celular, las características de sedimentación del flóculo biológico también se incrementan.

#### 2.2.1.2 Parámetros de diseño

Para el sistema de lodos activados convencional el tiempo medio de retención celular es el siguiente:

$$\theta_c = \frac{V X}{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e} \quad [2.1]$$

donde

$V$  = volumen del reactor

$Q$  = gasto de influente

$Q_w$  = gasto de purga

$X_e$  = SSV en el efluente clarificado

$X$  = SSVLM

$X_w$  = SSV en la purga.

En un sistema con una operación adecuada del sedimentador, la cantidad de células en el efluente es muy pequeña, y la ec (1) se simplifica a:

$$\theta_c = X/Q_w$$

Ya que  $X_e$  tiende a cero el término  $(Q - Q_w) X_e$  es despreciable y la expresión se simplifica.

La razón para lo anterior es que, como la edad media de las células se incrementa, la carga superficial se reduce y los microorganismos empiezan a producir polímeros extracelulares, eventualmente favorecedores del aglomerado en una capa de lodo.

Los parámetros más comúnmente usados son: 1) Tiempo medio de retención celular y la relación F/M-sustrato/microorganismos. El punto 1 se vio antes, la relación F/M está definida como:

$$F/M = \frac{S_o}{\theta X} \quad (2.2)$$

donde:

$S_0$  = concentración de  $DBO$  ó  $DQO$  en el influente,  $g/m^3$

$\theta$  = tiempo de retención hidráulico en el tanque de aeración

$X$  = concentración de  $SSV$  en el tanque de aeración.

La presencia de polímeros y el lodo favorecen la formación de partículas floculantes que pueden ser removidas rápidamente en sedimentación por gravedad. Para desechos domésticos se requiere un tiempo medio de residencia del orden de 3 a 4 días para llevar a cabo una sedimentación efectiva.

Aunque se obtengan excelentes flóculos constantes y permanentemente, el efluente del sistema puede ser alto en sólidos biológicos debido a: mal funcionamiento de la unidad de sedimentación secundaria, una mala operación de la unidad de aeración, o a causa de la presencia de microorganismos filamentosos, tales como Esfareolitos y Hongos.

En el tratamiento de aguas residuales, es a menudo deseable estabilizar algunos compuestos inorgánicos que tienen una  $DQO$ . El compuesto inorgánico más importante es el amoníaco, debido a que su presencia en el efluente de la planta puede estimular la disolución de oxígeno en la corriente a través del proceso biológico de nitrificación. En la nitrificación el amoníaco es oxidado biológicamente a nitrito. El nitrito es a su vez oxidado por otro grupo de microorganismos a nitra

to. El nitrato es el estado de oxidación final de los compuestos de nitrógeno, y como tales representan un producto estabilizado.

Si la nitrificación se realiza en un sistema de lodos activados y por ello se elimina de la corriente final, es primordial hacer ajustes más allá de lo necesario para una operación segura y para la estabilización de la materia orgánica. Primero se debe suministrar oxígeno adicional para el proceso de nitrificación. Segundo se debe tener un tiempo de residencia largo. Las bacterias que realizan esta oxidación son estrictamente autótrofos y son totalmente diferentes de las heterótrofas que son las responsables de la degradación de la materia orgánica. Las bacterias nitrificantes tienen una tasa de crecimiento mucho más lenta que la de las bacterias heterótrofas y requieren un tiempo de residencia largo para ser efectivas.

Jenkins y Garrison, (1968) encontraron que para un tratamiento de agua residual doméstica por el proceso de lodos activados a una temperatura de 21 a 22°C, se requiere un tiempo medio de residencia de unos diez días para asegurar la nitrificación.

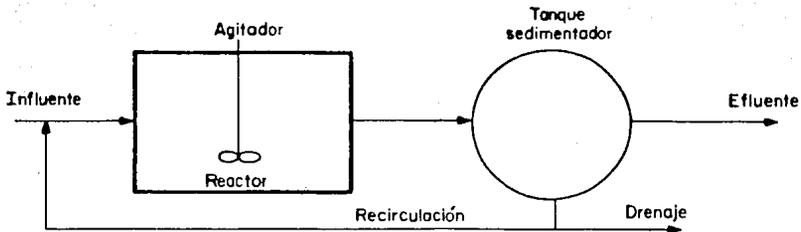


Fig 2 Reactor de tanque agitado de flujo continuo

### 2.2.1.3 Ejemplo de diseño de un proceso de lodos activados

Diseñar un proceso de lodos activados de tanque agitado con flujo continuo, para tratar  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua residual que tiene una  $\text{DBO}_5$  de  $250 \text{ mg/l}$ . El efluente debe contener una  $\text{DBO}_5$  de  $20 \text{ mg/l}$  ó menor. Se supone una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  y que las condiciones siguientes son aplicables.

1. Los SSV del influente son despreciables al reactor
2. La razón en el licor mezclado de SSV a SS es 0.8
3. La concentración de lodos de retorno es de  $10,000 \text{ mg/l}$  de SS
4.  $\text{SSVLM} = 3500 \text{ mg/l}$

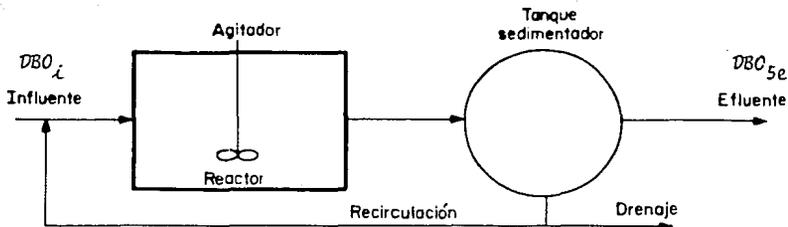


Fig 2 Reactor de tanque agitado de flujo continuo

#### 2.2.1.3. Ejemplo de diseño de un proceso de lodos activados

Diseñar un proceso de lodos activados de tanque agitado con flujo continuo, para tratar  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua residual que tiene una  $DBO_5$  de  $250 \text{ mg/l}$ . El efluente debe contener una  $DBO_5$  de  $20 \text{ mg/l}$  o menor. Se supone una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  y que las condiciones siguientes son aplicables.

1. Los SSV del influente son despreciables al reactor
2. La razón en el licor mezclado de SSV a SS es 0.8
3. La concentración de lodos de retorno es de  $10,000 \text{ mg/l}$  de SS
4.  $SSVLM = 3500 \text{ mg/l}$

5. Tiempo medio de retención celular de diseño =  $\theta_c^d = 10$  días
6. Régimen hidráulico del reactor = Tanque agitado de flujo continuo
7. El efluente contiene 22 mg/l de sólidos biológicos, de los cuales el 65% son biodegradables
8. El valor de la  $DBO_5$  se obtiene multiplicando la  $DBO_L$  por 0.68 (que corresponde a un valor de  $K$  de  $0.1 \text{ d}^{-1}$  en la ecuación de  $DBO$ )
9. En un día el flujo más alto es 2.5 veces el promedio del gasto.

#### SOLUCION

1. Estimar la concentración de  $DBO$  soluble en el efluente usando la siguiente relación:

$$DBO_5 \text{ efluente} = DBO_5 \text{ soluble de influente que no se elimina} + DBO_5 \text{ de los sólidos suspendidos del efluente}$$

- a) Determinar la  $DBO_5$  de los sólidos suspendidos en el efluente

- i) Porción biodegradable de los sólidos biológicos del efluente =  $0.65 * 22 \text{ mg/l} = 14.3 \text{ mg/l}$

ii)  $DBO_L$  absoluta de los sólidos biodegradables del efluente  
 $te = DBO_5 * 1.42 = 14.3 \text{ mg/l} * 1.42 = 20.3 \text{ mg/l}$

iii)  $DBO_5$  de los sólidos del efluente =  $20.3 * 0.68 =$   
 $13.8 \text{ mg/l}$

b) La  $DBO_5$  soluble en el efluente está dada por

$$S_T = S_S + S_i$$

$$S_T = DBO_5 \text{ total}$$

$$S_S = 20 - 13.8 = 6.2 \text{ mg/l}$$

$$S_S = DBO_5 \text{ soluble}$$

$$S_i = DBO_5 \text{ sólidos}$$

2. Determinar la eficiencia del tratamiento

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$$

a) La eficiencia basada en la  $DBO$  soluble es:

$$E_S = \frac{250 - 6.2}{250} * 100 = 97.5\%$$

b) La eficiencia total de la planta es

$$E_{total} = \frac{250 - 20}{250} * 100 = 92\%$$

3. Cálculo del volumen de reactor. Se puede determinar con las siguientes ecuaciones

$$X = \frac{\theta_c^d Y (S_0 - S)}{\theta (1 + K_d \theta_c^d)} \quad (2.3) \quad \text{y} \quad \theta = \frac{V}{Q} \quad (2.4)$$

- a) Sustituyendo  $\theta$  en la ec (2.3) y despejando  $V$  nos dá:

$$V = \frac{\theta_c^d Q Y (S_0 - S)}{X (1 + K_d \theta_c^d)}$$

- b) Cálculo del volumen de reactor usando la siguiente información:

$$\theta_c^d = 10 \text{ d}$$

$$Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s} * 86\,400 \text{ s/día} = 21,600 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Y = 0.50 \text{ mg/mg}$$

$$S_0 = 250 \text{ mg/l}$$

$$S = 6.2 \text{ mg/l}$$

$$X = 3500 \text{ mg/l}$$

$$K_d = 0.06 \text{ d}^{-1} \text{ (coeficiente cinético)}$$

$$V = \frac{10 \text{ d} * 21600 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} * 0.5 \text{ mg mg}^{-1} * (250 - 6.2) \text{ mg l}^{-1}}{3500 \text{ mg l}^{-1} * (1 + 0.06 \text{ d}^{-1} * 10 \text{ d})}$$

$$V = 4\,702 \text{ m}^3$$

4. Cálculo de la cantidad de lodos que deben ser desechados al día

- a) Obtener  $y_{obs}$  con la ec 2.5

$$y_{obs} = \frac{y}{1 + K_d \theta_c^d} = \frac{0.5}{1 + 0.06 * 10} = 0.3125$$

- b) Determinación de los lodos activos desechados con la ecuación 2.6

$$\begin{aligned} P_x &= y_{obs} Q (S_o - S) (10^3 \text{ g/kg})^{-1} \\ &= \frac{0.3125 * 21600 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} * (250 - 6.2) \text{ gm}^{-3}}{10^3 \text{ g Kg}^{-1}} \\ &= 1645.7 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

- c) Obtención de la purga de lodos basada en los sólidos suspendidos totales

$$P_{x(SS)} = \frac{1645.7 \text{ kg/d}}{0.8} = 2057.1 \text{ kg/d}$$

5. Cálculo de la cantidad de lodos eliminados si el drenado se realiza (a) del tanque de aeración y (b) en la recirculación de lodos. Despreciando la pérdida de sólidos en el efluente, la cantidad de lodos eliminada es:

a) Del tanque de aeración, con la ecuación 2.7

$$Q_{wa} \sim \frac{V}{\theta_c^d}$$

$$\sim \frac{4702 \text{ m}^3}{10 \text{ d}} = 470.2 \text{ m}^3/\text{D}$$

b) De la recirculación con la ecuación 2.8

$$Q_{wr} \sim \frac{V \cdot X}{\theta_c^d \cdot X_r}$$

$$\sim \frac{4702 \text{ m}^3 \cdot 3500 \text{ mg/L}}{10 \text{ D} \cdot (10000 \text{ mg/L} \cdot 0.8)} = 205 \text{ m}^3/\text{d}$$

6. Estimar la tasa de recirculación, con un balance de masa a la entrada del reactor.

Concentración de SSV en el tanque = 3500 mg/L

Concentración de SSV en la recirculación = 8000 mg/L

$$3500 (Q + Q_R) = 8000 (Q_R)$$

$$\frac{Q_R}{Q} = \alpha = 0.78$$

7. Cálculo del tiempo de retención hidráulico para el reactor

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{4702 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} * 3600 \text{ s H}^{-1}} = 5.2 \text{ H} \quad (2.4)$$

8. Determinación de los requerimientos de oxígeno basada en la  $DBO_L$  máxima.

a) Cálculo de la masa máxima de  $DBO_L$  del agua residual que es removida en el proceso, asumiendo que la  $DBO_5$  es igual a  $0.68 DBO_L$

$$\begin{aligned} \text{Masa de } DBO_L \text{ removida} &= \frac{Q (S_o - S) (10^3 \text{ g/kg})^{-1}}{0.68} \quad (2.9) \\ &= \frac{21600 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} * (250 \text{ g m}^{-3} - 6.2 \text{ g m}^{-3}) * 10^{-3} \text{ g}^{-1} \text{ kg}}{0.68} \\ &= 7744 \text{ kg/d} \end{aligned}$$

b) Cálculo de requerimiento de oxígeno con la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} \text{kg } O_2/\text{d} &= \frac{Q (S_o - S) * (10^5 \text{ g/kg})^{-1}}{6} - 1.42 P_x \quad (2.10) \\ &= 7744 \text{ kg d}^{-1} - 1.42 * 1645.7 \text{ kg d}^{-1} \\ &= 5407.1 \text{ kg/d} \end{aligned}$$

## 9. Chequeo de F/M y el factor de carga volumétrica

a) F/M se determina con la ecuación 2.2

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} = \frac{250 \text{ mg/l}}{5.2 \text{ hr} * \frac{dL}{24h} * 3500 \text{ mg/l}} = 0.33 \text{ d}^{-1}$$

b) Cálculo de la carga volumétrica

$$\begin{aligned} \text{carga volumétrica} &= \frac{S_0 Q (10^3 \text{ g/kg}^{-1})}{V} && (2.11) \\ &= \frac{250 \text{ g m}^{-3} * 21600 \text{ m}^3 * \text{g}^{-1} \text{ kg}}{4702 \text{ m}^3} \\ &= 1.15 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \end{aligned}$$

10. Cálculo del volumen de aire requerido, asumiendo que la eficiencia de transferencia de oxígeno de la unidad de aeración es del 8%. Se debe usar un factor de seguridad de 2 para determinar el volumen de diseño de los sopladores.

a) El requerimiento teórico de aire, asumiendo que este contiene 23.2% en peso de oxígeno es:

$$\frac{5407 \text{ kg/d}}{1.201 \text{ kg/m}^3 * 0.232} = 19406 \text{ m}^3/\text{d}$$

b) Cálculo del requerimiento de aire

$$\frac{19406 \text{ m}^3/\text{d}}{0.08} = 242,575 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{o } 168 \text{ m}^3/\text{min}$$

c) Requerimiento de aire de diseño

$$2 * 168 = 336 \text{ m}^3/\text{min}$$

11. Chequeo de volumen de aire usando el valor determinado en el paso 10b

a) Aire requerido por unidad de volumen:

$$\frac{242,575 \text{ m}^3/\text{d}}{21,600 \text{ m}^3/\text{d}} = 11.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

b) Aire necesario por kilogramo de  $\text{DBO}_5$  removido

$$\frac{242,575 \text{ m}^3/\text{d}}{(250 \text{ g}/\text{m}^3 - 6.2 \text{ g}/\text{m}^3)(21,600 \text{ m}^3/\text{d}) 10^{-3} \text{ kg}/\text{g}}$$

$$= 46.1 \text{ m}^3/\text{kg de } \text{DBO}_5 \text{ removida}$$

### 2.3 Procesos de tratamiento aerobio con crecimiento fijo

Los procesos de tratamiento biológico con crecimiento fijo usualmente son utilizados para remover la materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales. Son también empleados para realizar la nitrificación (la conversión de nitrógeno en la forma de amoníaco a nitrato). Los procesos de crecimiento fijo incluyen al filtro rociador, el contacto biológico rotatorio y el reactor de nitrificación de lecho fijo. Debido a que el filtro rociador es el más comúnmente usado, y el tema de este trabajo nos enfocaremos a él:

#### 2.3.1 Filtro rociador

El primer filtro rociador fue puesto en operación en Inglaterra en 1893. El concepto de filtro rociador nace del uso de filtros de contacto, los cuales se componen de un recipiente empacado con piedras, el agua residual se alimenta en la parte superior ocasionando el contacto entre el desecho y el lecho por un corto tiempo, después se drena y se deja reposar antes de repetir el ciclo. Las limitaciones del filtro de contacto incluyen una relativamente alta incidencia al atascamiento, requiere un largo tiempo de reposo y se pueden usar cargas relativamente bajas.

El filtro rociador se diseña para vencer estas limitaciones.

El filtro percolador consiste de un lecho altamente permeable, en el cual los microorganismos están sujetos, el agua residual es rociada sobre este lecho. El empaque del filtro usualmente consiste de rocas, variando en tamaño de 1 a 4 pulgadas de diámetro. La profundidad, varía con cada diseño en particular, generalmente de 3 a 8 pies; una profundidad promedio es de 6 pies. Los filtros rociadores que emplean empaque plástico se construyen con profundidades de 30 a 40 pies. El lecho del flujo es usualmente circular y el agua cruda se distribuye en el domo del lecho por medio de un distribuidor. En el filtro rectangular, el residuo se aplica a través de boquillas espreadoras fijas. Cada filtro tiene un sistema de dren inferior para colección del agua tratada y algunos sólidos biológicos que se desprenden del medio de crecimiento. Este sistema de drenaje es importante como una unidad de colección y como una estructura porosa a través de la cual el aire puede circular.

El material orgánico presente en el agua de desecho se degrada por una población de microorganismos que se desarrollan y adhieren al empaque. El material orgánico del líquido se adsorbe por la película biológica. En la parte exterior de la biomasa el material orgánico es degradado por microorganismos aerobios; debido a que los microorganismos crecen y se reproducen, el espesor de la biopelícula se incrementa a causa de esto, el oxígeno se consume antes que pueda penetrar a

lo más profundo de la película biológica. De esta manera se establece un ambiente anaerobio cercano a la superficie del empaque.

Ya que la capa biológica incrementa su espesor, el material orgánico adsorbido es metabolizado antes de que pueda llegar a los microorganismos cercanos a la cara del medio. Como resultado de no tener disponible una fuente orgánica externa para el carbón celular, los microorganismos cercanos a la superficie del empaque entran en una fase de crecimiento endógena. En esta fase, los microorganismos pierden su habilidad para adherirse a la superficie del medio. Debido a lo anterior el líquido aplicado desprende la capa biológica y una nueva biopelícula se empieza a desarrollar. Este fenómeno de pérdida de masa biológica es primordialmente una función de las cargas hidráulica y orgánica aplicadas al filtro. La carga hidráulica es considerada por su efecto cortante, y la carga orgánica para la tasa de metabolización de la biopelícula. Basándose en los valores de las cargas hidráulicas y orgánicas, los filtros son divididos en cuatro clases: tasa baja, intermedia, alta y super alta. Las características de cada una de ellas se describen en la siguiente tabla.

TABLA 2.1. CLASIFICACION DE FILTROS

PARAMETRO	BAJA	INTERMEDIA	ALTA	SUPER ALTA
C. Hidráulica, $m^3/m^2 \cdot día$	1-4	4-10	10-40	40-200
C. Orgánica, $kg/m^3 \cdot día$	0.08-0.32	0.24-0.48	0.32-1.0	0.80-6.0
Taza de recirculación	0	0-1	1-3; 2-1	1-4
Empaque	Roca, escoria, etc.	roca, escoria, etc.	roca, escoria, materiales sintéticos	materiales sintéticos
Requerimientos de potencia $KW/10^3 m^3$	2-4	2-8	6-10	10-20
Moscas	muchas	intermedia	rocas, las larvas salen con el lavado	pocas o nada
Desprendimiento de biopelícula	intermitente	intermitente	continua	continua
Intervalos de dosificación	no más de 5 min (generalmente intermitente)	15 a 60 seg. (continuos)	no más de 15 seg. (continuo)	continuo
Efluente	usualmente completamente nitrificado	parcialmente nitrificado	nitrificado a bajas cargas	nitrificado a bajas cargas

La comunidad biológica del filtro con-  
de protistas, como bacterias aer  
ultativas, hongos, algas y protozoari  
res, como lombrices, larvas de insecto

Las bacterias facultativas, aerobias y  
función de descomponer el material org  
agua residual que se aplica al filtro.  
también responsables de la estabilización  
nico, pero su contribución es general  
bajo condiciones de pH ácido ó con ci  
les. Las algas solo pueden crecer en  
filtro donde la luz solar alcanza a l  
algas no toman participación directa  
agua residual, pero durante las horas  
geno al agua cruda alimentada. Desde  
rativo pueden causar atascamiento en  
tro.

Los protozoarios son principalmente de  
en el proceso de lodos activados, su f  
ar los desechos pero sí controlar la

otros organismos como caracoles, lombr  
alimentan de la biopelícula del filtro  
esto ayudan a conservar la población b

principalmente  
obias y fa  
superio-

tienen la  
ido en el  
son tam-  
mente orgá-  
este solo  
industria  
rior del  
neral, las  
ción del  
cionan oxí-  
vista ope-  
del fil-

ta. Como  
estabili-  
bacterial.

tos, se  
ultado de  
un estado

de alto crecimiento ó rápida utilización del alimento.

Las variaciones en las poblaciones individuales de la comunidad biológica descritas arriba ocurren en el fondo del filtro por cambios en la carga hidráulica y orgánica, composición del influente, pH, temperatura, disponibilidad de aire y otros factores.

Como en el proceso de lodos activados, la unidad de sedimentación es una parte importante del proceso filtro percolador. Este es necesario para la remoción de sólidos suspendidos que se desprenden durante los periodos de descarga con filtros de tasa baja y para remoción de pequeñas cantidades de sólidos que se desprenden continuamente en filtros de alta tasa. Cuando se emplea la recirculación, los sólidos biológicos no son tan importantes como en lodos activados. En el proceso del filtro rociador, la mayoría de los microorganismos activos están fijos en el empaque y no salen del reactor. Sin embargo la recirculación puede ayudar, en la sedimentación, el propósito principal es diluir la corriente del influente y conducir el efluente a un nuevo tratamiento. La recirculación es incluida casi siempre en los procesos de alta tasa.

### 2.3.1.1 Ecuaciones de diseño

A causa de las características inestables de la capa biológica y las condiciones hidráulicas impredecibles, es muy difícil desarrollar un modelo cinético. Los estudios han conducido a la cinética biológica de los reactores de película fija, pero su aplicación en diseños a gran escala no se ha podido demostrar. Sin embargo la ecuación (1) y las ecuaciones propuestas por Eckenfelder (2) y por Bruce y Mertens (3) se pueden adecuar para describir la remoción observada en filtros rociadores. Estas ecuaciones son

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp \left[ - (khK_o) \frac{wZ}{Q} \right] \quad (2.3)$$

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp \left[ - K Z S_a^m \left( \frac{A}{Q} \right)^n \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp \left[ - K_T S_a^a Q_v^{-b} \right] \quad (2.5)$$

donde

$S_e$  =  $DBO_5$  del efluente sedimentado, mg/l

$S_i$  =  $DBO_5$  del agua residual aplicada, mg/l

$K, K_T$  = constantes de velocidad de remoción observada, m/d

$wZ$  = área superficial del medio,  $m^2$

$Z$  = profundidad del filtro

$$S_a = \text{área superficial específica por unidad de volumen, m}^2 \text{ m}^3 \\ = A_\delta / V$$

$$A_\delta = \text{área superficial, m}^2$$

$$V = \text{volumen, m}^3$$

$$A = \text{área transversal del filtro, m}^2$$

$$Q = \text{flujo volumétrico, m}^3/\text{d}$$

$$Q_v = \text{flujo volumétrico aplicado por unidad de volumen, m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{D}$$

$m, n, a, b = \text{constantes empíricas.}$

Sí el grupo de constantes es igual a 1 y los términos dentro de los paréntesis se igualan, notaremos que estas ecuaciones son esencialmente la misma. Esta ecuación es la misma que la propuesta por el National Research Council

$$\frac{S_a}{Q_v} = \frac{S_a Z A}{Q} = \frac{A_\delta}{V} \frac{Z A}{Q} = \frac{A_\delta}{Q} = \frac{w Z}{Q} \quad (2.6)$$

En un extenso estudio realizado en Inglaterra Bruce y Merkens encontraron que el valor de la constante de velocidad de remoción para aguas residuales  $K_T$  a 15°C varía de 0.025 a 0.060  $M/D$ , y el valor del coeficiente de temperatura  $\theta$  fue 1.08, así que

$$K_T = K_{15} (1.08^{T-15}) \quad (2.7)$$

Sí estos valores son correctos para una temperatura de 22°C,

se pueden comparar con los valores de la constante de velocidad de reacción encontrados analizando los datos de Eckenfelder, que es igual a 0.117 M/D. Los valores correctos varían de 0.0428 a 0.1028 M/D. Los valores típicos en la literatura de Sistemas de Tratamiento en U.S.A. varían de 0.06 a 0.12 M/D. De este análisis, aparece que un valor de 0.10 M/D es representativo para una temperatura de 20°C.

El valor de  $DBO_5$  del influente aplicado,  $S_i$ , puede ser determinado estableciendo un balance de materia en el filtro como sigue:

$$QS_o + \alpha QS_e = (1 + \alpha) (QS_i) \quad (2.8)$$

donde

$Q$  = gasto,  $m^3$ /día

$S_o$  =  $DBO$  del influente después del sedimentador primario,  
mg/l

$\alpha$  = razón de recirculación =  $Q_r/Q$

$S_e$  =  $DBO$  del efluente clarificado

$S_i$  =  $DBO$  del efluente aplicado al filtro

Resolviendo para  $S_i$  tenemos la siguiente expresión

$$S_i = \frac{S_o + \alpha S_e}{1 + \alpha} \quad (2.9)$$

Se ha demostrado para filtros rociadores que al aumentar el grado de recicló, la eficiencia en el tratamiento se reduce. Esta conclusión también ayuda a explicar, en parte, la observación de que al incrementar la carga aplicada, el rendimiento disminuye, debido a que la tasa de recirculación es usualmente incrementada cuando se aumenta la carga de la planta.

### 2.3.1.2 Características de empaques

El empaque ideal de un filtro es aquel material que tenga una gran área superficial por unidad de volumen, bajo costo, alta durabilidad y que no se obstruya fácilmente. Las características físicas de empaques comúnmente usados se detallan en la Tabla 2.2. El material más conveniente es generalmente la roca de río o grava graduada a un tamaño uniforme dentro del rango de 25 a 75 mm. El lecho de roca es particularmente satisfactorio. Otros materiales, como escoria, cenizas volcánicas, o carbón mineral, también son usados. Las piedras con diámetro menor a 25 mm no proveen suficiente espacio vacío entre ellas para permitir el flujo libre del agua residual y sólidos que se desprenden. Resultando un taponamiento del medio y estancamiento dentro del filtro. Piedras de gran diámetro evitan el problema de estancamiento pero tienen una relativamente pequeña área superficial por unidad de volumen; por lo tanto no pueden soportar una población biológica muy grande. La especificación de uniformidad de tamaño es un camino

para asegurar un espacio de poro adecuado.

Un tipo de medio sintético consiste de interconectar láminas de plástico, las cuales son acomodadas simulando un panel para producir una alta porosidad y resistencia al taponamiento del empaque. Las láminas al ser montadas, requieren muy poco espacio en comparación con el volumen final del medio en samblado. Las láminas son corrugadas, así cuando el medio es ensamblado, se forma una fuerte parrilla de poco peso. Por la forma de los módulos, estos se pueden configurar para el arreglo más conveniente de cada filtro. La alta capacidad hidráulica y la resistencia al taponamiento pueden ser mejorados al ser utilizados en un filtro de alta tasa.

TABLA 2 PROPIEDADES FISICAS DE MEDIOS PARA FILTROS ROCIA DORES

MEDIO	TAMAÑO NOMINAL, mm	PESO/UNIDAD DE VOLUMEN kg/m <sup>3</sup>	AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	% ESPACIOS HUECOS
Roca de río				
Pequeña	25-65	1250-1450	55-70	40-50
Grande	100-120	800-1000	40-50	50-60
Escoria de Alto Horno				
Pequeña	50-80	900-1200	55-70	40-50
Grande	75-125	800-1000	45-60	50-60
Plástico				
Convencional	600x600x1200	30-100	80-100	94-97
Gran superficie-espe- cífica	600x600x1200	30-100	100-200	94-97
Secoya	600x600x500	150-175	40-50	70-80

### 2.3.1.3 Ejemplo de diseño

Diseñar un filtro con empaque plástico para sustituir algunas fosas facultativas que son usadas para el tratamiento de desechos de una comunidad rural en la cual se localiza una fábrica de conserva de vegetales. Siguiendo la información y aplicando los datos. En la manera en que sea posible, los datos fueron derivados de resultados locales y pruebas de campo.

1. Promedio del flujo de agua residual doméstica durante todo el año =  $10,000 \text{ m}^3/\text{d}$ .
2. Flujo temporal más alto de la fábrica =  $5000 \text{ m}^3/\text{D}$
3. La temporada de la fábrica es de mayo a octubre
4. El promedio de  $\text{DBO}$  en todo el año =  $220 \text{ mg/l}$
5. La  $\text{DBO}$  combinada más alta de residuo doméstico y la fábrica  $550 \text{ mg/l}$
6. Datos de temperatura crítica
  - a) Para mayo y octubre =  $20^\circ\text{C}$
  - b) Para enero =  $0^\circ\text{C}$

7.  $DBO$  requerido en el efluente = 30 mg/l
8. Constante de velocidad de remoción de  $DBO$  obtenida en el estudio de plantas piloto realizados durante la primavera cuando la temperatura promedio fue de  $25^{\circ}C = 0.10$  m/D
9. Coeficiente de corrección de temperatura 1.08
10. Area específica del material de empaque del filtro =  $85 \text{ m}^2/\text{m}^3$
11. Altura máxima permisible a causa de restricciones locales = 10 m
12. Los valores de los coeficientes  $m$  y  $n$  de la ecuación 2.4 se encontró que son igual a 1.

#### SOLUCION

1. Determinar el volumen de empaque en el filtro requerido durante la temporada en que la fábrica opera. Usando la ec 2.4

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{(-K_2 S_a \frac{A}{Q})} \quad (2.4)$$

- a) Corrección del coeficiente de velocidad de reacción de DBO observado para las temperaturas del periodo de mayo a octubre

$$K_{20} = K_{25} \theta^{T-25}$$

$$\begin{aligned} K_{20} &= 0.10 \text{ m/D} * 1.08^{20-25} && (2.7) \\ &= 0.068 \text{ m/D} \end{aligned}$$

- b) Para evitar las limitaciones en la transferencia de oxígeno, asumir que la DBO influente será diluída con un flujo de recirculación a un valor de 350 mg/l. Determinar la tasa de reciclo requerida para este valor de influente

$$550 Q + 30 Q_r = 350 (Q + Q_r)$$

$$200 Q = 320 Q_r$$

$$\frac{Q_r}{Q} = \frac{200}{320} = 0.625$$

- c) Calcular el volumen de empaque requerido ZA usando la siguiente información

$$S_e = 30 \text{ g/m}^3$$

$$S_i = 350 \text{ g/m}^3$$

$$K = 0.068 \text{ m/D}$$

$$S_a = 85 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$Q = (1 + 0.63) (15,000 \text{ m}^3/\text{D}) = 24,450 \text{ m}^3/\text{D}$$

$$- \ln \frac{S_e}{S_i} = KZS_a \left( \frac{A}{Q} \right)$$

$$- \ln \frac{30}{350} = 0.068 \text{ m/D} * 85 \text{ m}^2/\text{m}^3 * \frac{ZA}{24,450 \text{ m}^3/\text{D}}$$

$$ZA = \frac{2.456 * 24,450 \text{ m}^3/\text{D}}{0.068 \text{ m/D} * 85 \text{ m}^2/\text{m}^3}$$

$$ZA = 10,393 \text{ m}^3$$

2. Determinar el volumen de empaque en el filtro durante el invierno para obtener el efluente requerido

a) Corregir el coeficiente de la tasa de reacción de DBO de acuerdo a la temperatura de enero

$$K_o = (0.10 \text{ m/D}) (1.08^{0-25})$$

$$= 0.0146$$

- b) Calcular el volumen de empaque requerido usando los siguiente datos

$$S_e = 30 \text{ mg/l}$$

$$S_i = 220 \text{ mg/l}$$

$$K = 0.015 \text{ m/D}$$

$$S_a = 85 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$Q = 10,000 \text{ m}^3/\text{D}$$

$$-\ln \frac{S_e}{S_i} = KZS_a \frac{A}{Q}$$

$$-\ln \frac{30}{220} = (0.015 \text{ m/D}) (85 \text{ m}^2/\text{m}^3) \frac{ZA}{10,000 \text{ m}^3/\text{D}}$$

$$ZA = \frac{1.99 * 10,000 \text{ m}^3/\text{D}}{0.015 \text{ m/D} * 85 \text{ m}^2/\text{m}^3} = 15\,627 \text{ m}^3$$

De esta manera las condiciones de control se dan en invierno.

3. Determinar el área y profundidad. Debido a que es posible un número infinito de combinaciones, un análisis de costos de mercado podría tener una buena interpretación. Para el propósito de este ejemplo, suponer que se desea que la torre funcione como un filtro de alta tasa, ya que la tasa estará en el grupo de  $40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ D}$ . Usando

este valor **área** y **profundidad**:

son:

- a) **Área de filtro** usando una capacidad de 40  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{D}$ .

de 40

$$A = \frac{Q}{Q_h} = \frac{24\,450 \text{ m}^3/\text{D}}{40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{D}}$$

$\text{m}^2$

- b) **Profundidad del filtro** a una

$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{D}$   $P$ :

$$P = \frac{V}{A} = \frac{15\,627 \text{ m}^3}{611.25 \text{ m}^2}$$

$$P = 25.56 \text{ m}$$

Obviamente este valor es inadecuado por las restricciones del punto 11.

las res-

- c) **Determinar el área superficial** de una torre con 10 m de profundidad

suponiendo

$$A = \frac{V}{P} = \frac{15\,627 \text{ m}^3}{10 \text{ m}}$$

$$= 1562.7 \text{ m}^2$$

Para esta área se tiene un diámetro

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 44.6 \text{ m}$$

Se desea tener filtros con diámetros menores a 40 m.

Cálculo del diámetro para dos torres

$$A = \frac{2 \pi D^2}{4} 1562.7 \text{ m}^2 = \frac{\pi D^2}{2}$$

$$D = 31.5 \text{ m}$$

Para tres torres

$$1562.7 \text{ m}^2 = \frac{3\pi D^2}{4}$$

$$D = 25.75 \text{ m}$$

La primer torre es inaceptable por las restricciones que existen en la comunidad.

Para las otras opciones se tiene que hacer una evaluación económica. Ya que los filtros tienen que estar en serie es necesario el bombeo de la primer etapa a la segunda y de esta a la tercera, de otra forma deben de existir desniveles para que el paso entre etapas sea por gravedad. Por lo tanto lo

mejor es instalar 2 torres.

a) Cálculo de las cargas hidráulicas

$$i) \text{ Condiciones en primavera} = \frac{24,450 \text{ m}^3 / \mathcal{D}}{1562.7 \text{ m}^2}$$

$$15.65 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \mathcal{D}$$

$$ii) \text{ Condiciones en invierno} = \frac{10,000 \text{ m}^3 / \mathcal{D}}{1562.7 \text{ m}^2}$$

$$6.4 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \mathcal{D}$$

Los valores de carga hidráulica determinados en el paso 3d son más bajos que los reportados en la Tabla 2.1 para un filtro de alta tasa. Las razones son (1) La alta carga orgánica durante la temporada en que opera la fábrica, (2) Las bajas temperaturas en invierno, y (3) El alto grado de tratamiento requerido.

Como un punto complementario a este ejemplo de diseño, podemos calcular la  $DBO$  en el efluente para el periodo en que opera la fábrica de conservas. Utilizando la siguiente información

$$S_i = 350 \text{ g/m}^3$$

$$K = 0.068 \text{ m/D}$$

$$S_a = 85 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$Q = 24,450 \text{ m}^3/\text{D}$$

$$ZA = 15\,627 \text{ m}^3$$

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{-KZS_a \left(\frac{A}{Q}\right)}$$

$$S_e = S_i * e^{-\frac{KZS_a A}{Q}}$$

$$S_e = 350 * e^{-\frac{0.068 \text{ m/d} * 15\,627 \text{ m}^3 * 85 \text{ m}^2/\text{m}^3}{24\,450 \text{ m}^3/\text{D}}}$$

$$S_e = 8.7 \text{ g/m}^3$$

Hay mayor remoción durante la primavera

### 2.3.2 Otros procesos

En otros procesos de tratamiento se incluyen las lagunas aeradas y las fosas de estabilización fotosintética y de aeración mecánica. En las lagunas de aeración, se usa un equipo mecánico para suministrar oxígeno a las bacterias y el proceso es esencialmente el mismo que el de lodos activados pero sin recirculación. En las fosas aerobias fotosintéticas, el oxígeno se suministra por aeración natural de la

superficie y por la fotosíntesis de las algas. A excepción de la población de algas, la comunidad biológica presente en las fosas de estabilización es similar a la del proceso de lodos activados. El oxígeno liberado por las algas a través del proceso de fotosíntesis es utilizado por las bacterias en la degradación de la materia orgánica. Los nutrientes y dióxido de carbono liberados en esta degradación son, en consecuencia, utilizados por las algas. Esta relación ciclo-simbiótica se muestra a continuación.

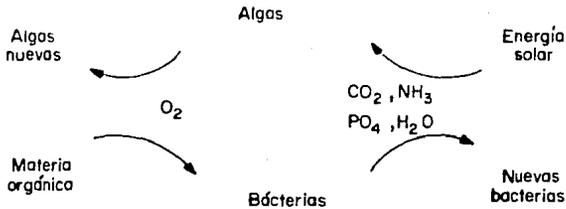


Fig 3 Representación esquemática de la relación simbiótica entre algas y bacterias

En la fosa también existe la presencia de rotíferos y protozoarios, y su función principal es la de "mejorar el efluente".

En las fosas de estabilización, mecánicamente aeradas, a causa de la presencia de las unidades de aeración, las algas no tienen tanta importancia, como en el caso anterior. Las unidades de aeración también sirven para mezclar el contenido de la fosa y prevenir la sedimentación de sólidos suspendidos. Si se deja que los sólidos sedimenten, se provoca la acumulación de una capa de lodo anaerobia y la fosa pasa a ser aerobia-anaerobia (Facultativa).

El grupo particular de las algas, el grupo animal o las especies de bacterias presentes en alguna sección de una fosa aerobia, dependerán de algunos factores como carga orgánica, grado de mezclado en la fosa, pH, nutrientes luz solar y temperatura. La temperatura tiene un efecto muy importante en la operación de fosas aeróbicas, particularmente en regiones que tienen inviernos fríos, y es posible que el hielo cubra la superficie de la fosa. La temperatura del agua bajo la capa de hielo es solamente un poco mayor a la de congelamiento y, dá como resultado que las actividades metabólicas y fotosintéticas se reduzcan considerablemente.

#### 2.3.2.1 Tratamiento anaerobio

Los sistemas de tratamiento anaerobio involucran la descomposición de materia orgánica y/o inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. La principal aplicación es en digestión de

lodos concentrados y en el tratamiento de algunos desechos industriales.

Los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica están generalmente divididos en dos grupos. El primer grupo hidróliza y fermenta los compuestos orgánicos complejos a ácidos carboxílicos simples, de los cuales los más comunes son acético y propiónico. Este grupo de microorganismos consiste de bacterias facultativas y anaerobias, comúnmente llamadas formadoras de ácidos.

El segundo grupo convierte los ácidos orgánicos formados por el primer grupo a gas metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de esta conversión son estrictamente anaerobias y se les llama las formadoras de metano. Tienen una tasa muy baja de crecimiento, y, por lo tanto, su metabolismo es generalmente considerado limitante en el tratamiento anaerobio de un desecho orgánico. En este segundo paso, la estabilización del desecho está acompañada de la conversión de ácidos orgánicos a metano y dióxido de carbono. El gas metano es altamente insoluble y su desprendimiento representa la estabilización del desecho.

Muchos otros grupos de bacterias anaerobias y facultativas utilizan varios de los iones inorgánicos.

El desulfovibrio es el que ocasiona la reducción del ión  $SO_4^{=}$  a  $S^{=}$ . Otro tipo de bacteria reduce nitratos  $NO_3^{-}$  a gas nitrógeno  $N_2$  (desnitrificación).

Para mantener un sistema de tratamiento que establezca eficientemente un desecho orgánico, los ácidos y el metano formados deberán estar en un estado de equilibrio dinámico. Para establecer y mantener dicho estado, el contenido del reactor deberá estar vacío de oxígeno disuelto y libre de inhibidores como metales pesados y sulfitos, y el ambiente acuoso deberá estar en un rango de pH de 6.6 a 7.6. Deberá existir suficiente alcalinidad para asegurar que el pH no baje de 6.2, debido a que la formación de metano se inhibe.

Cuando la digestión está funcionando satisfactoriamente, la alcalinidad debe estar en un rango de 1,000 a 5,000 mg/l. Debe haber disponibilidad de una cantidad suficiente de nutrientes, nitrógeno y fósforo para asegurar el crecimiento apropiado de la comunidad biológica. La temperatura es otro parámetro ambiental importante que se debe considerar. Los rangos óptimos de temperatura son el mesofílico (29°C - 37°C) y el termofílico (48-57 °C).

### 2.3.2.2 Tratamiento aerobio-anaerobio

Las fosas en las cuales se lleva a cabo la estabilización de un desecho por una combinación de bacterias aerobias, anaerobias y facultativas se conocen como fosas de estabilización aerobia-anaerobia. Como se muestra en la figura (4), estas fosas tienen, una capa superior aerobia y una inferior anaerobia. En la práctica, el oxígeno se mantiene en la capa superior por la presencia de algas o por el uso de aeradores de superficie. Cuando se utilizan aeradores de superficie, no hay presencia de algas. La comunidad biológica en la capa superior o aerobia es similar a la inferior o anaerobia, son bacterias facultativas y anaerobias. Las actividades metabólicas ya fueron discutidas.

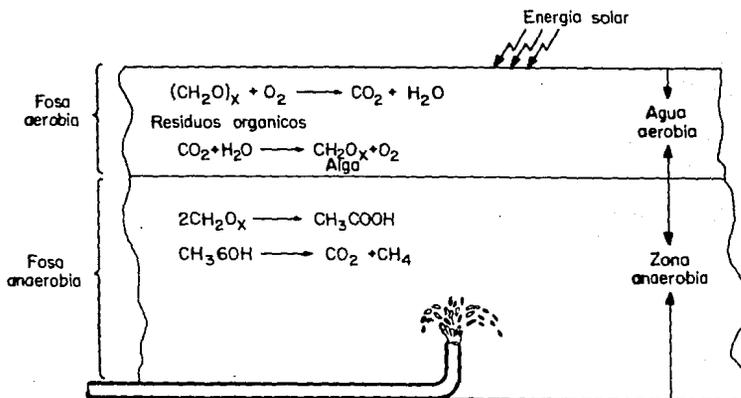


Fig 4 Representación esquemática de una fosa de estabilización facultativa

### 3. TIPO DE REACTORES Y ECUACIONES CARACTERISTICAS

#### 3.1 *Fundamentos*

Todos los procesos biológicos para el tratamiento de aguas re  
siduales tienen lugar en un volumen, definido por límites espe  
cíficos.

Los cambios en la composición y concentración de material que  
ocurren mientras el agua de desecho se encuentra retenida en  
el reactor, son factores de gran importancia en el tratamien-  
to.

Estos cambios son causados por el transporte hidráulico de ma  
teriales dentro y fuera de dicho reactor, así como las reac-  
ciones que ocurren dentro del mismo. Las velocidades de cam-  
bio también son importantes porque afectan directamente el ta

maño requerido de éste para un grado específico de tratamiento. Los modelos de velocidad de reacción pueden combinarse con las características hidráulicas del reactor en un sistema en particular.

Así, en el diseño de reactores biológicos es deseable el establecimiento de modelos matemáticos para predecir y describir el comportamiento de los diferentes tipos de reactores, los cuales se basan en balances de materia y energía.

Si se considera el esquema de la (fig 5) donde el gasto volumétrico a la entrada y salida del reactor son  $Q$  y  $Q_s$  respectivamente,  $S_0$  la concentración del sustrato limitante a la entrada y  $S$  la concentración a un tiempo  $t$ , y en donde la rapidez de reacción es  $k$ , se tiene que:

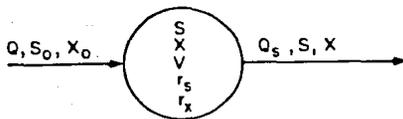


Fig 5 Balance de materia

donde:

$Q$  = gasto volumétrico de entrada

$S_0$  = concentración inicial de sustrato mg  $DQ0/l$

$X_0$  = concentración inicial de microorganismos mg SST/l

$V$  = elemento de volumen  $V$

$r_s$  = rapidez de reacción del sustrato

$r_x$  = rapidez de reacción de microorganismos

$x$  = concentración de microorganismos mg SST/l

$S$  = concentración de sustrato mg  $DQ0/l$

$Q_s$  = gasto volumétrico a la salida.

Balance: *Entrada + Generación = Salida + Acumulación*

Balance de materia generalizado:

*Sustrato que entró al elemento de volumen  $V$*  = *Sustrato que sale del elemento de volumen  $V$*  + *Sustrato que reacciona en el elemento de volumen  $V$*  + *Sustrato acumulado en el elemento de volumen  $V$*

Matemáticamente:

$$Q S_0 = Q_s S + V r_s + \frac{d}{dt} (SV) \quad (1)$$

$$Q S_0 = Q_s S + V r_s + V \frac{dS}{dt} + S \frac{dV}{dt} \quad (1a)$$

Despejando los términos del sustrato acumulado:

$$v \frac{dS}{dt} + S \frac{dV}{dt} = Q S_0 - Q_\delta S - V r_\delta \quad (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q - Q_\delta \quad (3)$$

$\frac{dS}{dt}$  : no es la rapidez de reacción; es la variación de la concentración en el volumen considerado.

Sustituyendo la ec (3) en (2)

$$v \frac{dS}{dt} + S (Q - Q_\delta) = Q S_0 - Q_\delta S - V r_\delta \quad (4)$$

$$v \frac{dS}{dt} = Q S_0 - Q_\delta S - V r_\delta - S (Q - Q_\delta) \quad (5)$$

$$v \frac{dS}{dt} = Q S_0 - Q_\delta S - V r_\delta - QS + Q_\delta S$$

$$v \frac{dS}{dt} = Q (S_0 - S) - Q_\delta (S - S) - V r_\delta$$

$$v \frac{dS}{dt} = Q (S_0 - S) - V r_\delta$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{v} (S_0 - S) - \frac{V}{v} r_\delta$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} (S_0 - S) - \mu_s \quad (6)$$

Si definimos el tiempo de retención hidráulico  $\theta_h$  como

$$\theta_h = \frac{V}{Q}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S_0 - S}{\theta_h} - \mu_s \quad (7)$$

Obtenemos la ec (7) que es la ecuación general del balance de materia para un reactor. (Sundstrom, 1969).

### 3.2 Tipos de reactores

Los tipos principales de reactores, empleados para el tratamiento biológico de aguas residuales son clasificados con respecto a sus características de flujo hidráulico en reactores: batch, tanque reactor agitado de flujo continuo, reactor tubular (flujo pistón).

#### 3.2.1 Batch

En los procesos batch, no hay flujo de sustrato o bacterias dentro o fuera del reactor, ya que es un sistema cerrado. Las concentraciones de dicho sustrato y bacterias varían con

el tiempo. Estos microorganismos que están contenidos en el reactor constituyen una mezcla completamente homogénea a una temperatura constante e interactúan durante un tiempo  $t$ .

(fig 6)

Al no haber gasto volumétrico  $Q$  de la ecuación general (7) del balance de materia obtenemos:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S_0 - S}{\frac{Q}{V}} - r_s \quad \frac{Q}{V} = \theta_h$$

por lo tanto:

$$\frac{dS}{dt} = - r_s$$

De la misma manera para el crecimiento de microorganismos

$$\frac{dx}{dt} = r_x$$

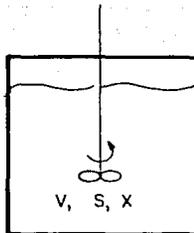


Fig 6 Esquema de un reactor batch

La masa de las bacterias así como el sustrato varían dentro del líquido de acuerdo a la (fig 7). (Metcalf, 1972)

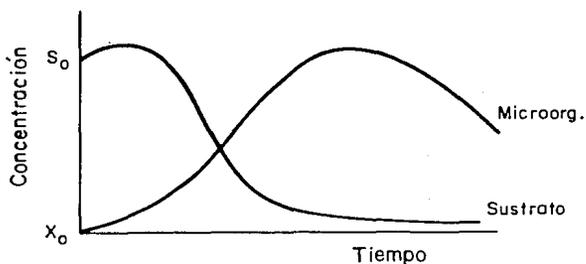


Fig 7 Conc. de sustrato y microorg vs tiempo, en un reactor Batch

La variación de la masa de microorganismos con respecto al tiempo tiene 3 fases de las cuales 2 corresponden al crecimiento neto de la masa activa y una al decrecimiento del mismo parámetro.

Los microorganismos que han llegado a adaptarse al medio, se multiplican rápidamente de acuerdo a una reacción de primer orden:

$$\frac{dX}{dt} = KX$$

donde:

X peso de células (seco)/volumen

K velocidad de crecimiento específico tiempo<sup>-1</sup>.

La integración de la ecuación anterior resulta una expresión logarítmica; dicho crecimiento es denominado fase logarítmica. El crecimiento logarítmico de la masa de microorganismos se inicia tan pronto como el inóculo se pone en contacto con el sustrato. En esta fase existe exceso de comida y el crecimiento solo depende de la habilidad de la población para reproducirse. Al final de esta etapa el crecimiento celular se halla a su máximo nivel, y es seguida inmediatamente por la disminución de la masa activa. Existiendo en el punto máximo de la curva una mayor remoción de materia orgánica.

El decrecimiento del crecimiento, se inicia cuando la materia orgánica que sirve de alimento se convierte en el factor limitante y termina, cuando casi toda la materia orgánica ha sido estabilizada.

La etapa siguiente es cuando la materia orgánica escasea, los microorganismos se ven en la necesidad de metabolizar su propio protoplasma, la cual se denomina fase endógena.

La mayoría de los tratamientos biológicos se realiza entre el decrecimiento del crecimiento y la fase endógena, etapa que en la cual se conoce el valor de la relación  $F/M$ , pudiéndose calcular la concentración de la corrida del efluente con base en la masa activa.

### 3.2.2 Reactor tipo tanque agitado con flujo continuo

Dicho reactor opera bajo condiciones estables, de tal manera que las propiedades a través del sistema no varían con el tiempo.

El reactor consiste en un tanque con volumen  $V$ , con agitación lo cual permite que los reactivos entren en contacto en un tiempo  $t$ . Los reactivos fluyen continuamente hacia el interior del reactor, saliendo de la misma manera que los productos.

Para un caso ideal, todas las partículas tienen el mismo tiempo de residencia y la concentración de reactantes en el efluente es la misma que en un punto dentro del volumen del reactor.

Debido a que existe un movimiento continuo de líquido dentro y fuera del reactor, el balance de materia considera tanto cambios que ocurren debido al resultado de las reacciones de

tro del mismo, como también aquellos resultantes de las características hidráulicas del sistema.

Considerando régimen permanente en la ecuación general de balance de materia:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S_0 - S}{\theta_h} - r_s = \phi$$

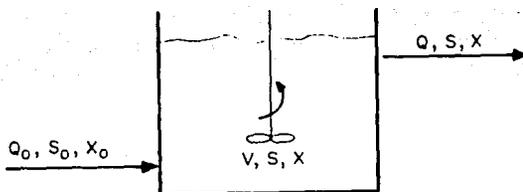


Fig 8 Balance en un reactor agitado de flujo continuo

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{total} = 0 = \frac{S_0 - S}{\theta_h} - r_s$$

$$\frac{S_0 - S}{\theta_h} = r_s$$

y para los microorganismos:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{total} = -\phi = \frac{X - X_0}{\theta_h} - r_x$$

$$\frac{X - X_0}{\theta_h} = r_x$$

### 3.2.3 Reactor de flujo tipo pistón

Es un reactor de forma cilíndrica en el cual el sustrato entra con una velocidad constante en alguna sección transversal dada. En el flujo pistón se asume que no hay mezclado longitudinal de los elementos de flujo. De tal manera que, todos los elementos del fluido tienen, el mismo tiempo de residencia en el reactor. Los balances de material son hechos en un elemento diferencial del fluido (fig 9).

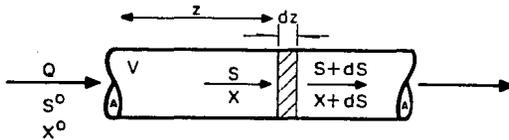


Fig 9 Balance en un reactor de flujo tipo pistón

En la ecuación general de balance de materia (7), aplicada a este reactor, es necesario conocer la variación de la concentración con el tiempo a lo largo del reactor, para esto se

toma un segmento dado a régimen permanente y se obtiene:

$$\text{(sustrato)} \quad Q d S - \mu_{\Delta} d V = \phi \quad (1)$$

$$\text{(microorganismos)} \quad Q d X - \mu_X d V = \phi \quad (2)$$

$$dV = A d Z$$

Al suponer las ecuaciones anteriores de primer orden, las expresiones cinéticas del consumo de sustrato y producción de microorganismos se tiene que:

$$Q d S + K S d V = \phi \quad (3)$$

$$Q d X - K' S d V = \phi \quad (4)$$

### 3.3 Consideraciones para la selección de un modelo

Los reactores biológicos involucran una variedad en régimen hidráulico y geometrías. Los reactores Batch o semibatch son usados para estudios de laboratorio y para digestión anaerobia.

Los reactores de flujo son comúnmente empleados para tratamiento aeróbico de desechos industriales y municipales.

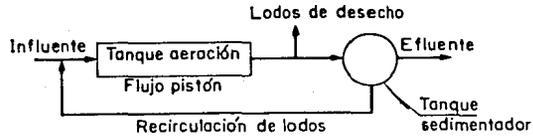
Para hacer un modelo de un proceso biológico se requiere información de la estequiometría y cinética de las reacciones, y del régimen hidráulico del sistema. La estequiometría de la reacción relaciona las cantidades de reactantes consumidos, el sustrato, las cantidades del producto formado, así como también los microorganismos.

El régimen hidráulico se refiere al patrón de flujo dentro y fuera del proceso, y el mezclado y distribución de fluidos y sólidos dentro del reactor.

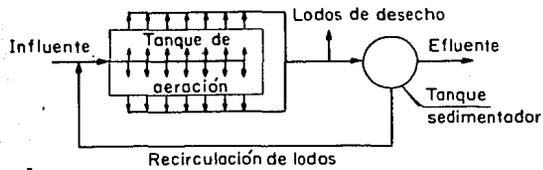
En flujo de reactores, los dos extremos en cuanto a mezclado, están representados por el reactor perfectamente mezclado y el reactor de flujo tipo pistón. Los grados intermedios de mezclado son descritos por reactor perfectamente mezclado en serie o por el reactor de flujo pistón con dispersión axial.

Modelos más complejos pueden emplearse pero su uso no se justifica debido a sus limitaciones en el conocimiento del sistema.

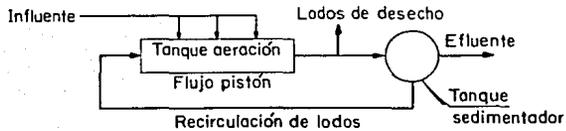
El modelo del reactor se obtiene de la combinación de las ecuaciones que describan el régimen hidráulico y la cinética de las reacciones.



(a)



(b)



(c)

Fig 10 Variaciones de lodos activados

a) Convencional

b) Aeración por etapas

c) Contacto estabilización

En la fig 10 se muestra la aplicación de los tres tipos de reactores descritos en el sistema de tratamiento de lodos activados.

### 3.3.1 Bases para los modelos

Las siguientes suposiciones y aproximaciones se usan en la derivación de modelos.

1. Las cinéticas químicas del sustrato y biomasa son descritos por el modelo de Monod, incluyendo respiración endógena.

El modelo de Monod es adecuado para muchos procesos con estados estables, pero existe un error, debido a los cambios rápidos que éstos tienen.

2. El sustrato es la sustancia con crecimiento limitado y todos los demás nutrientes presentes están en exceso.
3. Las constantes cinéticas son independientes de las concentraciones, o del grado de conversión.
4. El coeficiente de rendimiento (biomasa formada/sustrato consumido) es constante e independiente de la edad de los microorganismos. En la práctica el coeficiente de

rendimiento depende de la naturaleza del sustrato y las condiciones del proceso.

5. La concentración de sólidos biológicos activos es proporcional al parámetro fácilmente medible de la mezcla de licor de sólidos suspendidos volátiles.
6. Las velocidades de las reacciones biológicas son controladas ya sea por las cinéticas químicas o los efectos difusionales.
7. Los contenidos del reactor, se encuentran en estado isotérmico. Los procesos biológicos generan calor de reacción y las condiciones de alimentación pueden cambiar y hay posibilidad de variación en la temperatura.

En la mayoría de los tratamientos de aguas residuales los cambios en temperatura son pequeños.

8. Las propiedades físicas del fluido son constantes. Si se emplean valores promedios se introduce un error mínimo.
9. El transporte de oxígeno y sustrato a través del fluido es relativamente rápido para la velocidad de reacción así que los gradientes de concentración en el seno del líquido

do son despreciables.

10. Si un espesador es empleado para concentrar los sólidos biológicos para un reciclado, la reacción del sustrato en el espesador es despreciable. (Sundstrom, 1979).

### 3.3.2 Selección del modelo aplicado

Se han propuesto una gran variedad de modelos teóricos y empíricos para describir el funcionamiento de los filtros percoladores.

La mayoría de las relaciones que describen dicho funcionamiento son modificaciones de la teoría presentada por Velz, (1948), la cual considera que la tasa de remoción de DBO a profundidades específicas del medio empacado puede ser representada por una reacción de primer orden que sigue una cinética de Monod, en un reactor con flujo tapón. (Metcalf, 1972).

Eckenfelder ha ampliado la ecuación de Velz, proponiendo una fórmula que se aplica a cualquier medio de empaque en el filtro percolador, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y además:

- 1) Que la superficie específica permanezca constante
- 2) Que la capa biológica que cubre el medio sea uniforme
- 3) Que el agua residual sea distribuida uniformemente en el medio.

De esta manera relaciona remoción DBO, profundidad del filtro, carga hidráulica y características del medio en la siguiente expresión:

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp \left( - \frac{KZ}{Q_a^n} \right) \quad (\text{Sundstrom, 1979})$$

donde

$Q_a$  = carga hidráulica (gal/mín/ft<sup>2</sup>)

$Z$  = profundidad del filtro (ft)

$K$  y  $n$  = constantes específicas para el empaque

$S_e$  = concentración sustrato efluente

$S_i$  = concentración sustrato influente.

Físicamente el significado de  $n$  y  $K$  es el agrupamiento de los factores que intervienen en definir las propiedades del agua residual a tratar ( $K$ ) y el medio de empaque ( $n$ ), en un sólo término, expresando así la eficiencia en función de dichos valores, de la profundidad del lecho y de la carga hidráulica.

Es de suma importancia conocer  $n$  y  $K$  ya que es posible simular condiciones de operación teóricas para observar el comportamiento del equipo; permitiendo un estudio a nivel piloto para observar el efecto de la influencia de la profundidad en el sistema, así como encontrar una relación óptima gasto-profundidad, para la obtención de un porcentaje de remoción requerida (Orta L, 1987).

Como anteriormente se mencionó, existen muchos modelos propuestos para describir la eficiencia de remoción en términos de la Demanda bioquímica de oxígeno DBO y Demanda química de oxígeno DQO, sin embargo no se ha desarrollado un modelo satisfactorio; aunque los últimos modelos que han aparecido son de masiado sofisticados, los cuales requieren de soluciones muy complejas, volviéndose extremadamente difícil la interpretación de las causas y efectos.

#### 4. DESCRIPCION DE EQUIPO

El sistema filtro percolador de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria está constituido de las siguientes partes:

Sistema de alimentación

Cárcamo doble de bombeo

Filtro percolador

Sistema distribuidor

Caja partidora

Sedimentador secundario

##### 4.1 *Sistema de alimentación y agua tratada*

El agua residual se capta de los colectores de la zona anti-gua de C.U., la zona de Institutos y de la colonia Copilco

el Alto. Cada colector cuenta con un sistema de rejillas que retiene sólidos gruesos. Los tres colectores descargan en el cárcamo de captación, en el cual se mezclan las aguas. De aquí se envía por bombeo a un desarenador que tiene la función de eliminar los sólidos suspendidos sedimentables y descarga por un vertedor hacia la caja distribuidora que cuenta con medidores de flujo Parshall.

En la caja distribuidora se encuentran colocadas tres compuertas y otros tantos canales Parshall, para cada uno de los sistemas con que cuenta la Planta, que son: Lodos activados, Biocisco y Filtro Percolador.

Para conocer el gasto que se está alimentando al sistema se mide la altura del espejo de agua en la garganta del canal Parshall y aplicando la ecuación (1) se obtiene el gasto en litros por segundo. Con la compuerta se controla la cantidad de agua.

Ecuación (1):

$$Q = H^{1.55} * 0.5967 \quad \text{donde } H = \text{altura en pulgadas}$$

El agua residual se alimenta al sistema por gravedad a través de una tubería de 6 pulgadas de diámetro de acero al carbón

y descarga a una altura de 3.00 m del fondo del cárcamo de bombeo de influente.

#### 4.1.1 Cárcamo doble de bombeo

El cárcamo doble de bombeo está construido de concreto armado, las dimensiones de cada tanque son de 1.7 m \* 2.0 m con un tirante útil de bombeo de 3.90 m que definen una capacidad de almacenamiento teórica de 13.26 m<sup>3</sup>. Estos cárcamos se encuentran unidos formando un solo cuerpo, separados por una pared de 0.20 m de espesor.

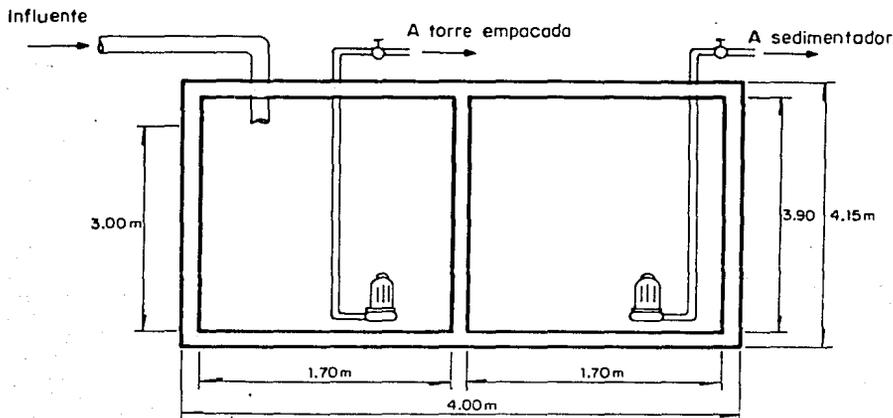


Fig 11 Cárcamo doble de bombeo. Corte

#### 4.1.2 Cárcamo de bombeo de influente

En este tanque se encuentran colocadas dos bombas sumergibles marca IMPEL de 5 HP, estos equipos operan en forma alterna.

El agua residual descarga por gravedad al cárcamo de agua cruda y de aquí se bombea al sistema distribuidor a través de un múltiple de descarga de 4 pulg de diámetro. Este cabezal tiene implementada una línea de retorno de igual diámetro y una válvula de compuerta, la cual se utiliza como control indirecto del gasto que se maneja hacia el distribuidor de agua residual.

La capacidad de almacenamiento real de este cárcamo es de  $5.61 \text{ m}^3$ , ya que el electronivel de arranque de los equipos de bombeo se encuentra colocado a 2.65 m del fondo del tanque. Lo cual ocasiona que al llegar el agua cruda a esa altura, automáticamente se accione el arranque del sistema de bombeo. Por otro lado, el electronivel de paro está colocado a 1 m del fondo, por lo tanto al disminuir el nivel de agua hasta 1 m del fondo se acciona este sistema. Además la caja partidora se encuentra a la misma altura que el electronivel de arranque por lo que el nivel de agua no debe exceder esta altura ya que de lo contrario se presentaría la mezcla de agua cruda con agua tratada. (En el punto 5.3 se explican las causas).

#### 4.1.3 Cárcamo de bombeo de efluente

Este cárcamo de bombeo de efluente tiene las mismas características que el de bombeo de influente, su capacidad de almacenaje es idéntica al otro, ya que sus electroniveles están colocados en forma similar.

Este cárcamo se utiliza como receptor de agua tratada del filtro.

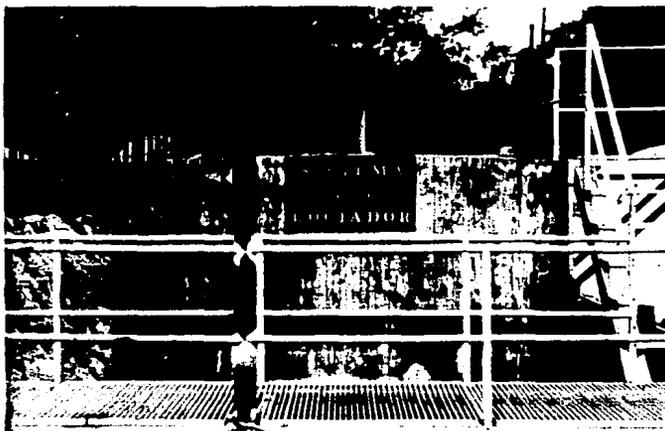
Dicho efluente es enviado al sedimentador secundario por medio de dos bombas sumergibles marca IMPEL de 2 HP, que tienen un diámetro de descarga de 3 pulg. que se unen a un cabe

zal de 4 pulg. y este a su vez desemboca a una línea de 8 pulg. de diámetro, que conduce el efluente al centro del sedimentador secundario.

## 4.2 Filtro percolador

### 4.2.1 Dimensiones y empaque

El filtro percolador o rociador consiste de un cilindro vertical de 3.44 m de diámetro con un espesor de pared de 0.20 m y una profundidad de 6.43 m. La biotorre está empacada con módulos de PVC de 0.60 \* 0.60 \* 1.20 m con una superficie específica de  $140 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , este medio ocupa una altura de 5.55 m. El empaque posee un diseño de hoja acanalada de interconexión que permite una mayor redistribución de aire y agua residual, además de ser un material resistente a las sustancias químicas encontradas en el agua cruda tratada. La parte activa de un filtro rociador se establece sobre el empaque, dicha parte activa consiste de "una película relativamente fina de microorganismos los cuales se desarrollan sobre la superficie del empaque del filtro". (Heukelekian, 1945). Es razonable suponer que la capacidad de tratamiento de un filtro está determinada por dos factores principales: a) La cantidad de película activa por unidad de volumen del filtro y b) El tiempo de contacto entre el agua a tratar y la película. El tiempo de contacto, está en fun-



ción de la profundidad del filtro y la carga hidráulica. La cantidad de película activa depende, entre otros factores, de la superficie libre disponible y el suministro de alimento y oxígeno. (Ramalho, 1983).

La biología y bioquímica de estos filtros ha sido estudiada por muchos investigadores, (Curds, 1975), quien establece que la película está constituida por varios grupos de microorganismos: bacterias, hongos, algas, protozoarios, nemátodos, "rotatorios". Chaetópodos, Crustáceos e insectos. Los más importantes de estos son las bacterias y especialmente la llamada zooglea.

Un examen microscópico hecho por el mismo investigador mostró que la mayoría de la película está constituida por incontables bacterias fijas en una matriz gelatinosa y clara.

Al respecto se encuentra el trabajo realizado por (Butterfield y Wattie, 1942) que reportaron 300 millones de bacterias por  $\text{cm}^3$  de película. Considerando la eficiencia de un filtro, la cantidad de película biológica acumulada por unidad de volumen es muy pequeña.

#### 4.2.2 Ventilación

Como se menciona en el punto anterior el suministro de oxígeno no es de vital importancia, ya que la cantidad de biopelícula generada está íntimamente relacionada con la cantidad de oxígeno-sustrato suministrada.

El filtro rociador tiene en la parte inferior dos ventanillas rectangulares de  $0.12 \times 0.4$  m cada una, las cuales proveen de oxígeno a los microorganismos por tiro natural. Este tiro se debe al gradiente de temperatura existente entre la parte interna del biofiltro y el medio ambiente. Cuando la temperatura es mayor en el filtro, el aire que está dentro es menos denso por lo tanto asciende y se da el tiro de abajo hacia arriba, cuando el medio ambiente es más caliente el aire dentro del filtro es más denso por lo que tiende a bajar y se da el tiro de arriba hacia abajo. Lo primero es

lo menos deseable desde el punto de vista de transferencia de masa, porque la presión parcial del Oxígeno y por consiguiente la tasa de transferencia de Oxígeno es menor en la región de mayor demanda del oxígeno.

El tiro, el cual es resultado de la diferencia de temperatura, se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$D_{aire} = 0.353 \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) Z$$

donde

$D_{aire}$  = tiro de aire medido en cm de agua

$T_F$  = temperatura fría, °K

$T_C$  = temperatura caliente, °K

$Z$  = altura del filtro, cm.

Una estimación más conservadora del promedio de la temperatura del aire se obtiene utilizando la temperatura media logarítmica,  $T_M$ :

$$T_M = \frac{T_2 - T_1}{\ln (T_2/T_1)}$$

donde

$T_1$  = temperatura caliente, °K

$T_2$  = temperatura fría, °K

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

El flujo volumétrico de aire se puede calcular aproximando el tiro a la suma de pérdidas de presión que se dan al pasar el aire a través del filtro y el sistema de descarga. (Met-calf, 1983).

El tiro natural es adecuado para filtros rociadores, a condición de que se tomen en cuenta las siguientes precauciones:

1. La descarga y canales de colección deben ser diseñados de tal manera que el flujo no exceda la mitad de estos para favorecer el paso de aire.
2. Los registros de ventilación del tipo de rejillas abiertas deben ser instalados en ambos extremos del canal de colección central.
3. Los filtros de grandes diámetros deben tener ramificaciones del canal de colección con registros de ventilación o tubos de venteo instalados en la periferia del filtro.
4. El área abierta de las ranuras en lo alto del ramal de descarga no deben ser menor que el 15% del área total del filtro.

5. Por cada  $23 \text{ m}^2$  de área de filtro se deben instalar registros de ventilación o venteos con una área bruta de  $0.093 \text{ m}^2$ .

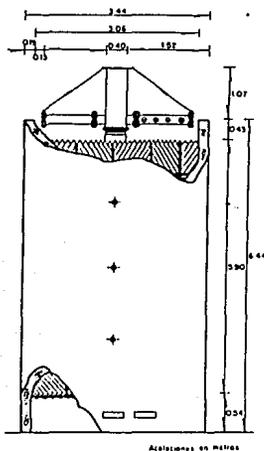


Fig 12. Torre empacada. Visto lateral

Con lo anterior podemos determinar la efectividad de las ventanillas para ventilación instaladas en el filtro.

El área transversal efectiva del filtro es de  $7.062 \text{ m}^2$ , asumiendo el punto 5 anterior se requiere un área de ventilación de  $0.02855 \text{ m}^2$ . Las dimensiones de las ventanillas son de  $0.12 * 0.4 \text{ m}$  cada una que dan una área total de  $0.096 \text{ m}^2$ . (Metcalf, 1983).

#### 4.2.3 Sistema de colección

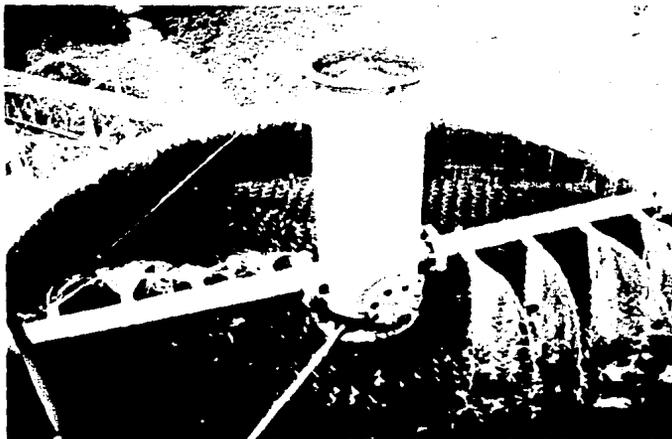
El sistema de colección de agua tratada se encuentra formando un sólo cuerpo con el piso del filtro rociador. El piso tiene una pendiente hacia el tubo de descarga que tiene un diámetro de 6 pulg. Además, para evitar la acumulación de sólidos entre el diámetro periférico y el piso, existe un chaflán de 0.05 m que ayuda a un mejor paso del efluente hacia el tubo de descarga.

#### 4.3 Sistema distribuidor

El sistema distribuidor cumple la función de repartir el agua residual uniformemente en la superficie del lecho. La redistribución en toda el área efectiva de contacto se da, gracias al diseño acanalado del empaque.

El sistema rociador está formado por un cilindro en posición vertical de 0.469 m de diámetro y 1.07 m de alto, construido de acero al carbón. Este cilindro alimenta en su parte inferior a cuatro tubos de acero al carbón de 4 pulg. de diámetro y 1.20 m de largo, colocados perpendicular y equidistantemente al tubo central, por un extremo unidos con bridas a éste y el otro con cable acerado que se tensa a la parte superior del cilindro central.

Cada tubo de 4 pulgs. cuenta con cuatro orificios de 0.038 m de diámetro en los cuales están colocadas igual número de boquillas, fabricadas en cobre, las cuales distribuyen el agua a tratar en forma de chiflón. Al pasar el agua residual por estas boquillas provoca una presión hidráulica la cual por propulsión genera el movimiento circular del sistema distribuidor del filtro percolador.



#### 4.4 Caja partidora

El agua tratada que proviene del sistema de colección del filtro percolador descarga por gravedad a una caja partidora. Esta caja tiene la finalidad de distribuir el caudal

tratado de acuerdo a las condiciones de operación que se requiera o desee. Existen tres opciones: a) Recircular la totalidad del efluente; b) Disponer todo el caudal tratado en el cárcamo de efluente para posteriormente ser bombeado al sedimentador secundario; y c) Recircular una parte del agua tratada al cárcamo de influente y la otra al de efluente. La primera opción solo se lleva a cabo cuando existen problemas operacionales. La segunda se caracterizó en el proyecto "Evaluación y optimación del sistema filtro percolador" y la tercera opción se estudió en este trabajo.

La caja partidora está construída en placa de acero al carbón de 1/4 de pulg. de espesor y consiste de tres compartimientos; uno de 0.70 \* 0.60 \* 0.080 m que recibe el efluente de la biotorre y que además actúa como un vertedor de tipo rectangular. Las dimensiones de los dos restantes son de 0.35 \* 0.35 \* 0.80 m, ambos descargan por gravedad a través de una línea de 6 pulg. de diámetro de acero al carbón, uno hacia el cárcamo de agua cruda, (recirculación) y el otro al de agua tratada.

La parte que divide al vertedor de los dos compartimientos de descarga es una compuerta manual, con la que se regula el flujo de recirculación al tanque de agua cruda.

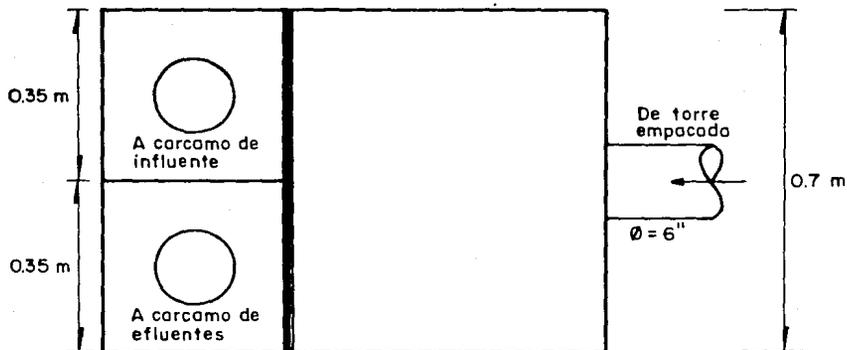


Fig 13. Caja partidora. Planta

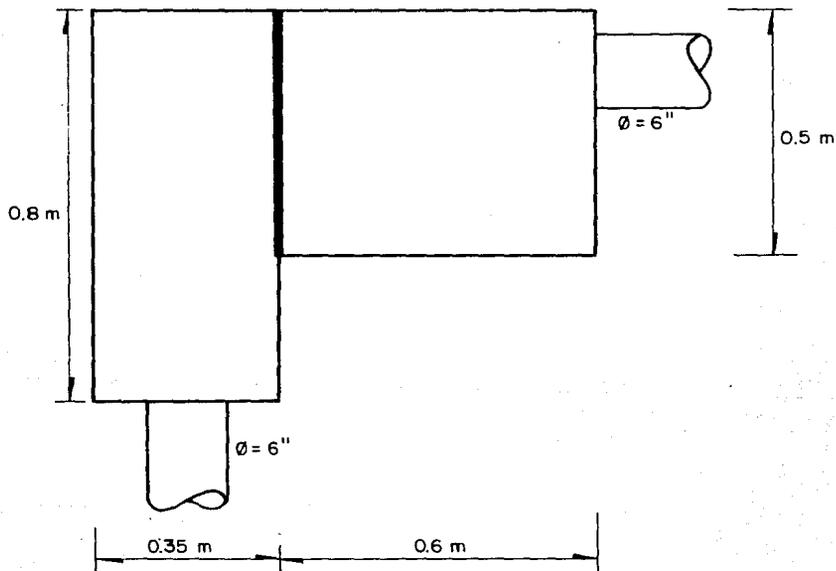
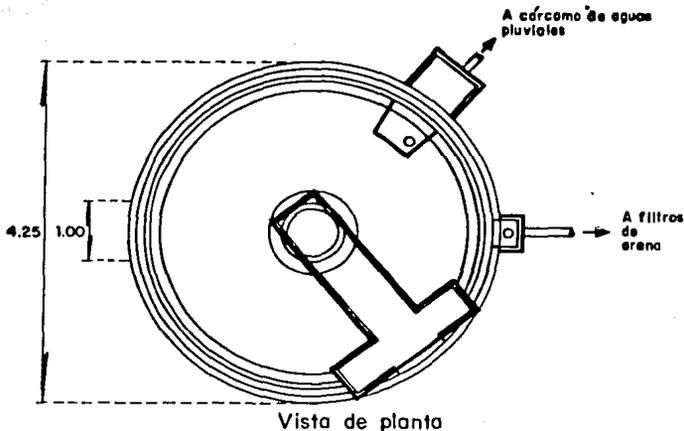


Fig 14. Caja partidora. Perfil



#### 4.5 Sedimentador secundario

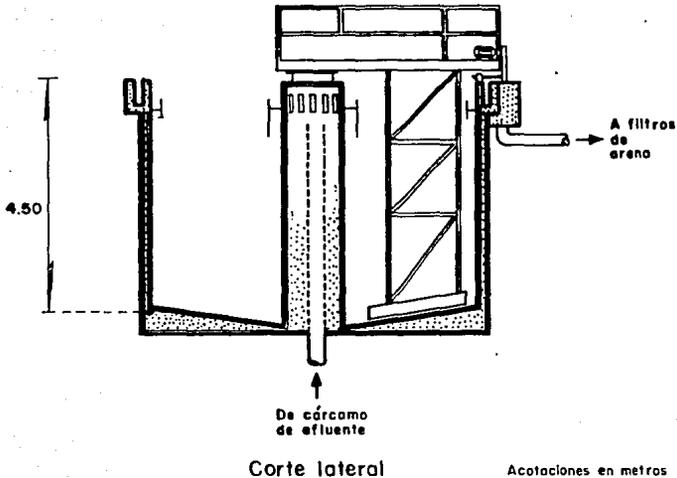
El sedimentador secundario esta después del filtro rociador y tiene la función de separar la biopelícula que se desprende por el autolavado del sistema y producir un efluente clarificado. La diferencia entre el sedimentador del proceso de lodos activados y éste es la recirculación de lodos, mientras para lodos activados es esencial para el biofiltro no tiene sentido ya que la parte activa de los microorganismos se encuentra fija al empaque del filtro.

El agua tratada que se bombea del cárcamo de efluente asciende por una columna central y descarga radialmente a través de unas ventanas que se localizan en la parte superior de la

columna.

El efluente ya clarificado descarga por gravedad a una línea de acero al carbón de 8 pulg. de diámetro que lo conduce al sistema de filtración, mientras que los lodos sedimentables son arrastrados y concentrados en una tolva que se localiza en el fondo del sedimentador. Estos lodos se desfogan periódicamente por medio de una tubería de acero al carbón, de 6 pulg. de diámetro controlándose la salida con una válvula de compuerta con las mismas características.

El sedimentador tiene un diámetro de 4.85 m, una profundidad de 4.05 m y una pendiente de 80 mm/m dirigida a la tolva de colección de lodos sedimentados. El material de construcción es de concreto armado. Tiene una mampara metálica alrededor de la columna central, se encuentra sumergida 0.90 m y cumple la función de eliminar la turbulencia generada por el agua de entrada y así facilitar la precipitación de los sólidos que acompañan al agua tratada. En la parte superior está instalado un vertedor perimetral de placa de acero que alimenta al canal de colección de efluente clarificado.



#### 4.5.1 Rastra

La rastra colocada en el sedimentador cumple con la función de conducir, con su brazo inferior, los sólidos sedimentados hacia la tolva de colección, mientras que con el brazo superior conduce los sólidos no sedimentables hacia una charola desnatadora.

El equipo y las partes que constituyen la rastra son:

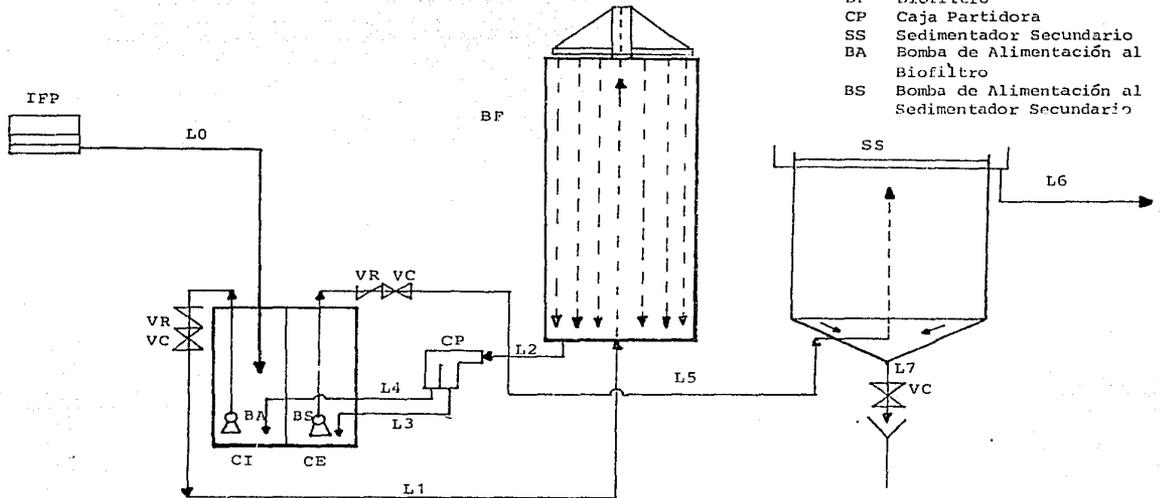
- Un puente metálico giratorio
- Transmisión de cadena y banda
- Motor de 3/4 HP horizontal

- Reductor de velocidad con flechas paralelas y cadena
- Pasillo de placa antiderrapante y barandal
- Flecha de acero al carbón
- Mampara circular para eliminar la turbulencia del flujo de entrada.

El puente mecánico es móvil y gira radialmente apoyado con dos ruedas sobre el muro perimetral del sedimentador, accionando las rastras por medio de sus brazos de acero.

La velocidad de rotación de la rastra es de 0.1077 RPM, por lo que la turbulencia no existe o mejor dicho es casi nula.

IFP Indicador de Flujo  
 Parshall  
 CI Cárcamo de Influyente  
 CE Cárcamo de Efluente  
 BF Biofiltro  
 CP Caja Partidora  
 SS Sedimentador Secundario  
 BA Bomba de Alimentación al  
 Biofiltro  
 BS Bomba de Alimentación al  
 Sedimentador Secundario



VR Válvula de Retención  
 VC Válvula de Compuerta  
 L0 Agua Cruda  
 L1 Alimentación a Biofiltro  
 L2 Agua Tratada a CP  
 L3 Agua Tratada  
 L4 Recirculación  
 L5 Alimentación a Sedimentador Sec.

L6 Efluente Clarificado a Filtros  
 L7 Lodos de Purga

UNIVERSIDAD NACIO-
NAL AUT. DE MEXICO
DIAGRAMA DE FLUJO
DEL BIOFILTRO

## 5. METODOLOGIA

En un sistema de tratamiento biológico secundario (Filtro Percola<sup>u</sup>ador), la recirculación constituye un parámetro importante ya que se le atribuyen las siguientes ventajas:

- 1) Dilución de efluentes concentrados
- 2) Amortiguación de las fluctuaciones diarias, de tal forma que se tenga una carga orgánica relativamente uniforme
- 3) Aumento global del tiempo de retención del agua
- 4) Importancia de los microorganismos desprendidos (Schroeder, 1982).

De acuerdo a lo anterior, se determinó importante evaluar en este estudio el efecto de los diferentes porcentajes de recirculación en las cargas hidráulicas, a fin de caracterizar y determinar bajo qué condiciones, el sistema presenta la máxi-

ma eficiencia.

Por otra parte en el estudio anterior se detectaron bajas eficiencias en el sedimentador, por este motivo a fin de identificar y proponer argumentos para su abatimiento, se llevo a cabo un monitoreo de sólidos suspendidos en sus formas total, fija y volátil en seis puntos de la trayectoria del recorrido del agua en el sistema (ver fig 17).

### *5.1 Adaptaciones al sistema*

Al inicio de la operación con recirculación existía una "zona muerta" en el empaque, ya que el chiflón del sistema distribuidor de influente no mojaba una área de empaque aproximadamente de 35 cm, en forma axial con respecto al centro de la bitorre. Para eliminar dicho problema se diseñaron 2 tipos de boquillas. Una en forma de "Y" y la otra con un corte en el chiflón de 45° para conseguir un rociado en el centro del sistema. Observándose posteriormente el crecimiento de biope lícula en esta zona.

Entre cada cambio de gasto, así como en el arranque, se consideró cierto tiempo de adaptación y estabilización de las características de la biopelícula a las nuevas condiciones. De tal manera que se interrumpía por espacio de 1 a 2 semanas.

## 5.2 Programa de muestreo

En un principio la recirculación se cambiaba por las noches, los fines de semana y periodos vacacionales en C.U. a 12.5%; este procedimiento se desechó debido a que los cambios en el sistema aumentaban y no se estabilizaba. Por consiguiente se decidió mantener la carga hidráulica constante durante todo el día.

Con las condiciones antes mencionadas se muestreó en 5 puntos del filtro en la dirección del flujo, a fin de obtener un perfil de la remoción del material orgánico. Las muestras se tomaron en forma manual entre las 10:30 y las 11:30 a.m. para tener, en lo posible, condiciones similares de temperatura y carga orgánica en la determinación de los parámetros físico-químicos durante todas las corridas.

Los puntos de monitoreo son: (ver fig 16)

- P1 Brazo distribuidor (influyente)
- P2 1.34 m de profundidad de empaque
- P3 2.68 m de profundidad de empaque
- P4 4.05 m de profundidad de empaque
- P5 Caja partidora (efluente).

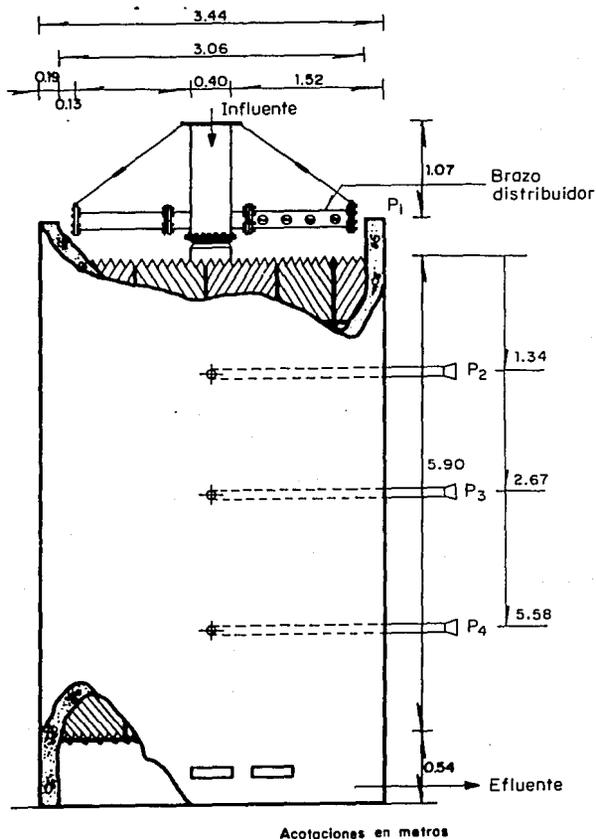
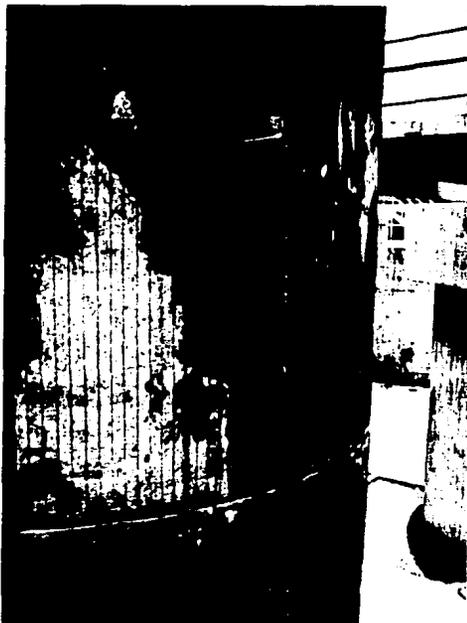


Fig 16. Puntos de muestreo en la bitorre para análisis de DBO y DQO



La eficiencia en términos del material biodegradable soluble se evaluó a partir de las concentraciones de sustrato total en el influente y el efluente.

Se realizó también un estudio del comportamiento de los sólidos suspendidos en seis puntos establecidos a lo largo del sistema estudiado, con el fin de conocer la eficiencia global de éste. Los sólidos suspendidos se realizaron en forma total, fijos y volátiles. (Fig 17).

En los puntos antes mencionados se realizaron las determinaciones fisicoquímicas y biológicas para explicar el comportamiento del equipo en cada etapa experimental, posteriormente se correlacionaron los resultados obtenidos para cada una de ellas.

La siguiente tabla muestra los gastos aplicados y el porcentaje de recirculación correspondiente, como las pruebas que se llevaron a cabo durante la experimentación en los cinco puntos de muestreo:

Gasto (lps)	Recirc. (%)	PARAMETROS MEDIDOS					
		DBO <sub>5t</sub>	DBO <sub>5S</sub>	DCO <sub>t</sub>	DCO <sub>S</sub>	pH	Temp.
5.73	25	x	x	x	x	x	x
6.93	37.5	x	x	x	x	x	x
9.10	37.5	x	x	x	x	x	x
8.27	25	x	x	x	x	x	x
10.37	25	x	x	x	x	x	x
13.5	25	x	x	x	x	x	x

El cuadro siguiente muestra los gastos fijados, el porcentaje de recirculación así como las pruebas que se llevaron a cabo.

Gasto (lps)	Recir. (%)	PARAMETROS MEDIDOS		
		SST	SSF	SSV
5.73	25	x	x	x
6.93	37.5	x	x	x
9.10	37.5	x	x	x
8.27	25	x	x	x
10.37	25	x	x	x
13.5	25	x	x	x

### 5.3 Control Operacional

Para llevar a cabo el monitoreo se procuró tener el sistema a un regimen hidráulico permanente, lo cual se logró manteniendo constante el gasto de alimentación al cárcamo de influente mediante mediciones en el Parshall, además de mantener el nivel abajo del tubo conector de los dos tanques (influyente y efluente) con el propósito de evitar la mezcla de aguas tratadas y sin tratar en la caja partidora y para controlar la recirculación. Un nivel muy alto en el cárcamo ocasiona una recirculación nula y existe además mezcla de agua cruda con agua tratada obteniéndose baja eficiencia en el sedimentador secundario. Al igual, si el nivel alto es en el cárcamo de efluente existe 100% de recirculación y se mezclan agua tratada y cruda, diluyéndose esta última, de tal forma que disminuye la eficiencia en el filtro percolador.

El tiempo teórico en el cual se logra la estabilidad hidráulica se obtiene:

$$\frac{A * h}{Q_p} = t$$

donde:

A = área cárcamo de influente (m<sup>2</sup>)

h = altura establecida del nivel de agua en el cárcamo de influente (m)

Q<sub>p</sub> = gasto que se maneja en el Parshall (m<sup>3</sup>/s)

t = tiempo en que se alcanza la estabilidad hidráulica (seg)

Lo anterior es con el objetivo de que haya un mezclado homogéneo del agua residual con el agua de recirculación ya tratada.

## 6. DISCUSION DE RESULTADOS

### 6.1 Eficiencias de remoción obtenidas con respecto al gasto recirculación y tiempo de operación

#### 6.1.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El comportamiento gráfico de los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos realizados, denotan por una parte que en los 4 primeros gastos señalados en la tabla siguiente, se tiene una menor dispersión de datos, acorde con la figura 18 que señala el comportamiento estadístico de los mismos y estableciendo los límites de confianza en  $\bar{x} \pm \sigma$ .

TABLA 3. CONDICIONES DE OPERACION DE ACUERDO AL EXPERIMENTO

Experimento	$G$ (l/s)	$\bar{G}$ (l/s)	R%	T
1	4.63	5.78	25	40-56
2	5.04	6.93	37.5	61-71
3	6.62	9.10	37.5	72-93
4	6.62	8.27	25	94-112
5	8.30	10.87	25	141-164
6	10.81	13.50	25	190-201

donde:

$G$  = gasto medio

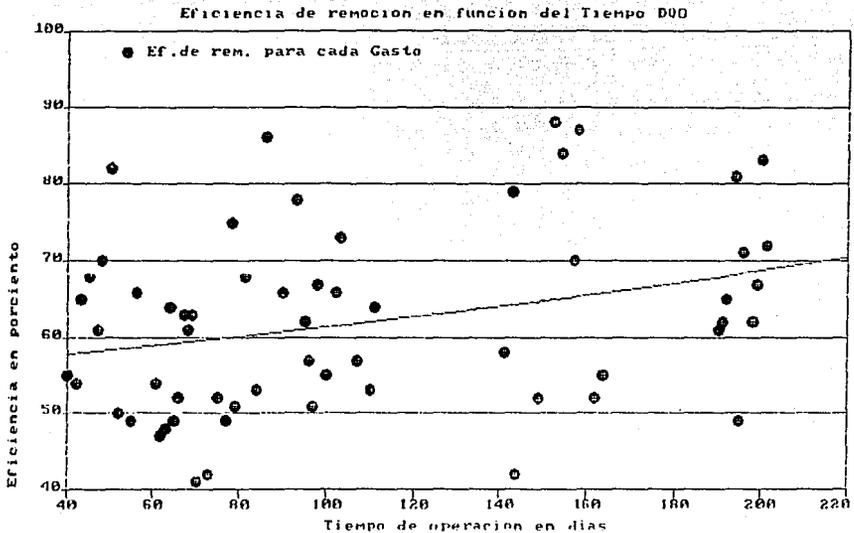
$\bar{G}$  = gasto medio con recirculación

R = recirculación en porciento

T = tiempo de operación en días

$\bar{x} \pm \sigma$  = media  $\pm$  desviación estándar

Este comportamiento también es congruente con la fig 20 que muestra el porciento (%) de eficiencia vs. tiempo de operación en días, y en el cual se observa una menor dispersión de datos en los cuatro primeros gastos aplicados. De tal manera que se obtiene la eficiencia máxima del 69 porciento en el periodo correspondiente al término del cuarto experimento.



Para la obtención de la curva anterior se realizó una regresión polinomial de segundo orden, con el objeto de interpretar el comportamiento de los datos obtenidos.

Recordando los aspectos estadísticos puntualizamos que:

- Si no existe una clara indicación de la forma funcional de  $y$  sobre  $x$ , se supone entonces que la relación fundamental al menos se "comporta bien". De tal manera que admita un desarrollo el cual constituya una aproximación

bastante buena. Por lo cual se ajustan los datos, a un polinomio, es decir, a una ecuación predictora:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_p x^p$$

y donde el grado se determina por observación de los datos o por métodos matemáticos.

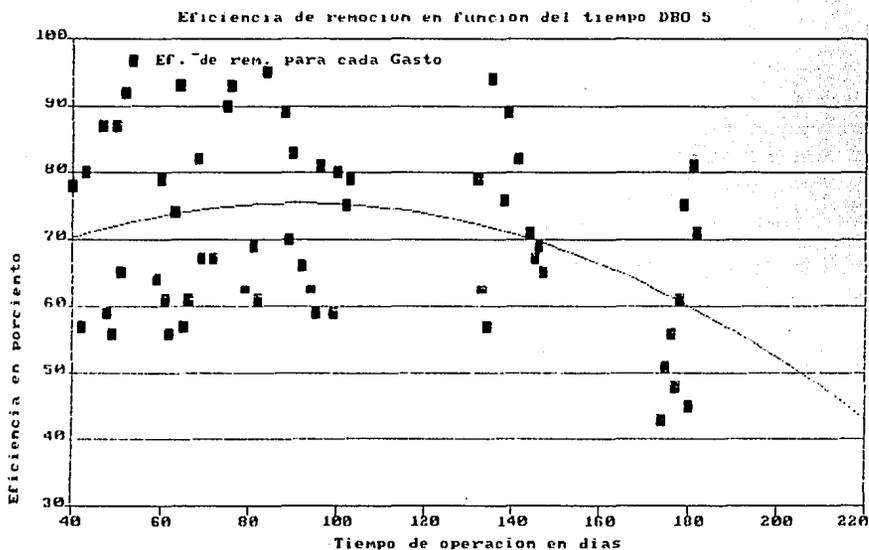
En la práctica puede ser difícil determinar el grado del polinomio que se ajusta a un conjunto de parejas de datos, sin embargo se parte del objetivo de encontrar un polinomio de grado mínimo que adecuadamente los describa.

#### 6.1.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

En la Demanda Bioquímica de Oxígeno el comportamiento gráfico de los resultados obtenidos presentan en los cuatro primeros gastos una menor dispersión, de acuerdo con la figura 19, la cual señala el seguimiento estadístico de los mismos, estableciendo límites de confianza en  $\bar{x} \pm \sigma$ .

Dicho comportamiento es afín, con la fig 21 que grafica el porcentaje (%) de eficiencia vs. tiempo de operación en días para  $DBO_5$ , observándose en ésta la disminución en la dispersión de los datos en los cuatro primeros gastos aplicados. Obteniéndose así una eficiencia máxima del 80% en el periodo

correspondiente al término del cuarto experimento.



La curva anterior se obtuvo mediante una regresión polinomial de segundo orden de acuerdo a los fundamentos estadísticos planteados en el inciso anterior.

TABLA 4.. EFICIENCIAS DE REMOCION EN EL PERFIL DE LA BIO TORRE

Gasto l/s	Punto muestreo	Eficiencia de remoción, %	
		DBO <sub>5</sub>	DO <sub>0</sub>
$\bar{G} = 5.78$ R = 25 %	1 Influyente		
	2	48	36
	3	62	49
	4	68	50
	5 Efluente	72	61
$\bar{G} = 6.93$ R = 37.5 %	1 Influyente		
	2	48	37
	3	56	40
	4	65	53
	5 Efluente	70	53
$\bar{G} = 9.10$ R = 37.5 %	1 Influyente		
	2	52	41
	3	63	50
	4	70	57
	5 Efluente	73	58
$\bar{G} = 8.27$ R = 25 %	1 Influyente		
	2	53	48
	3	63	56
	4	68	60
	5 Efluente	70	61
$\bar{G} = 10.37$ R = 25 %	1 Influyente		
	2	47	40
	3	59	52
	4	62	56
	5 Efluente	70	62
$\bar{G} = 13.50$ R = 25 %	1 Influyente		
	2	46	34
	3	56	52
	4	54	57
	5 Efluente	61	67

$\bar{G}$  = gasto medio con recirculación

R = recirculación en porcentaje

$$\% \text{ de eficiencia de R} = \frac{\bar{x}_i p_j - \bar{x}_a p_{j+1}}{\bar{x}_i p_j}$$

donde:

$p_i$  = punto de muestreo;  $j$  de 1 al 5; 1 = influente; 5 = efluente

$\bar{x}_i$  = media del influente

$\bar{x}_e$  = media del efluente

### 6.2 Eficiencias obtenidas en el perfil de la biotorre

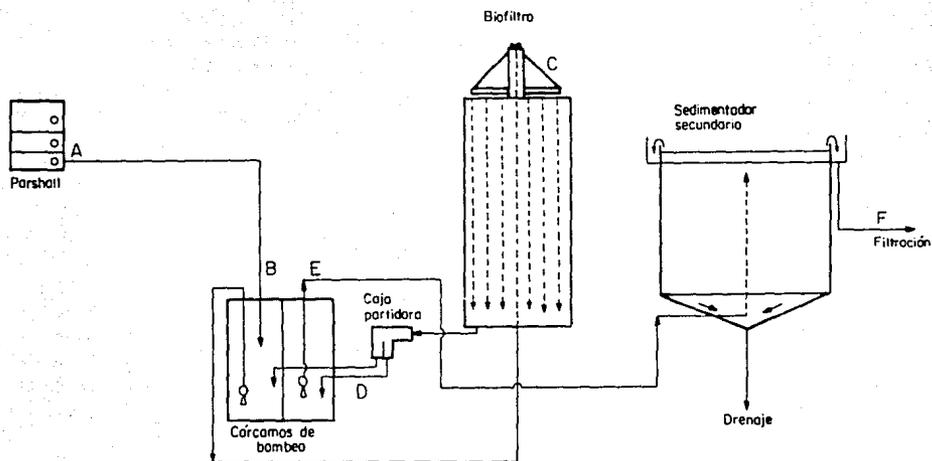
El comportamiento de la eficiencia con respecto a la profundidad se muestra en la tabla 4, de esta se puede apreciar que se estableció una correspondencia congruente conforme a la profundidad obteniéndose la mayor remoción en el nivel 1. Este análisis tiene como finalidad establecer los datos bases para la determinación de las constantes "n" y "k" del siguiente apartado.

### 6.3 Estudio de la distribución de sólidos suspendidos en seis puntos medulares del sistema en estudio

Uno de los problemas de gran importancia que se detectó (ref ) fue una baja eficiencia del sedimentador secundario; durante algunos periodos de operación, lo cual repercute en la eficiencia global del sistema.

Por este motivo, en este estudio se consideró imprescindible determinar el seguimiento de dichos sólidos suspendidos, en sus formas total, fijos y volátiles, durante un periodo amplio de monitoreo a fin de determinar su comportamiento.

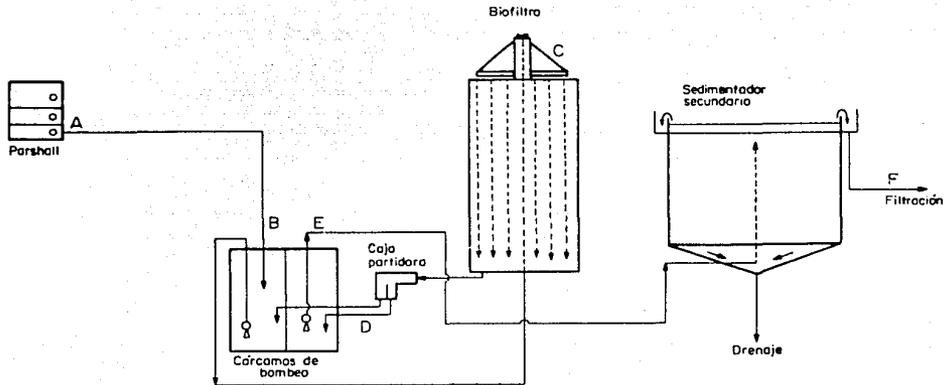
A continuación se muestran los resultados obtenidos así como la discusión de los medios de los sólidos suspendidos volátiles.



- A Influyente Parshall
- B Entrada cárcamo de influente
- C Brazo distribuidor
- D Caja partidora
- E Cárcamo de efluente
- F Sedimentador (salida)

- SST Sólidos suspendidos totales
- SSF Sólidos suspendidos fijos
- SSV Sólidos suspendidos volátiles

Fig 17. Puntos de muestreo de sólidos suspendidos en sus formas



- A Influyente Parshall  
 B Entrada cárcamo de influente  
 C Brazo distribuidor  
 D Caja partidora  
 E Cárcamo de efluente  
 F Sedimentador (salida)

- SST Sólidos suspendidos totales  
 SSF Sólidos suspendidos fijos  
 SSV Sólidos suspendidos volátiles

Fig 17. Puntos de muestreo de sólidos suspendidos en sus formas

CUADRO 1. MEDIA DE LOS EXPERIMENTOS

PUNTO	SST		SSF		SSV		OBSERVACIONES
	x	$\sigma$	x	$\sigma$	x	$\chi$	
A	87.57	18.91	19.83	8.61	69.25	15.31	Las condiciones de entrada no tuvieron gran variación en el Parshall
B	75.70	18.62	19.36	7.76	59.87	12.70	Se observó en general una disminución de sólidos en este punto lo que corresponde a depósito de estos en el tramo recorrido
C	80.22	19.75	20.11	15.87	63.45	13.55	Hay un aumento de sólidos, que indica acumulación en el cárcamo de bombeo de influente.
D	56.59	16.78	15.29	8.25	45.68	12.61	La disminución en este punto obedeció a la eficiencia de remoción de la biopelícula.
E	65.04	18.30	15.87	6.80	50.78	15.07	Existe un aumento de sólidos considerable con respecto al punto D, lo cual se debe al efecto acumulativo en el cárcamo de efluentes.
F	37.01	12.05	11.12	5.83	26.68	7.63	En general la disminución de SSV se debe a remoción hecha por la biomasa y al sedimentador.

De este cuadro se obtiene un aumento del 15% de sólidos suspendidos totales en el punto E (cárcamo de efluente) con respecto al punto D (caja partidora, salida de biotorre).

CUADRO 2. MEDIA OBTENIDA PARA LAS CONDICIONES DEL EXPERIMENTO 1.

En este cuadro se observa un aumento del 22% de sólidos suspendidos totales en el punto E (cárcamo de efluentes) con respecto al punto D (caja partidora, salida de biotorre).

GASTO = 5.01 l/s  $\bar{C}$  filtro = 6.93 l/s Recirculación = 37.5 %

PUNTO	SST		SSF		SSV		OBSERVACIONES
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	
A	70.75	13.22	15.62	10.66	55.12	9.99	Condiciones de entrada (Parshall)
B	63.25	13.89	19.6	8.87	47.75	8.17	Efecto de depósito en la tubería
C	61.25	19.65	22.25	16.00	48.9	11.15	El aumento se debe al gasto, un posible arrastre de biopelícula en la tubería antes de llegar al brazo distribuidor.
D	50.25	12.76	17.2	13.90	38.86	5.98	Existe una disminución de sólidos en la <u>caja partidora</u> lo cual quiere decir que parte de éstos se <u>re</u> tuvieron en la biotorre.
E	61.5	17.56	18	12.49	45	10.90	Si entre el punto D y E existe un aumento significativa que existe un asentamiento debido a acumulación en el cárcamo.
F	32	15.00	19.33	14.47	24.3	6.97	Disminución de SSV debida al tratamiento biológico y sedimentación.

CUADRO 3. MEDIA OBTENIDA PARA LAS CONDICIONES DEL EXPERIMENTO 2

GASTO = 6.62 l/s		$\bar{G}$ filtro = 9.10 l/s				Recirculación = 37.5%		OBSERVACIONES
PUNTO	SST		SSF		SSV			
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$		
A	87.65	17.45	20.4	8.25	69.45	12.66	Condiciones de entrada son mayores que el gasto anterior.	
B	74.81	14.11	19.05	7.46	56.2	11.38	La disminución se debe a un depósito en la tubería que conduce el influente al cárcamo del flujo de entrada.	
C	76.90	15.45	20	6.24	57.90	11.73	Como puede apreciarse existe un ligero aumento que puede deberse al arrastre de biopelícula a lo largo de la tubería.	
D	61.33	21.05	17.6	12.18	45.90	14.44	Hay un descenso de sólidos en este punto que corresponde a la caja partidora, lo cual se debe a que una porción de sólidos fue retenido en el filtro.	
E	61.65	17.76	15.14	7.26	50.54	13.83	Existe un aumento no muy marcado, sin embargo puede decirse que hay una posible sedimentación de sólidos, en el cárcamo de efluentes.	
F	37.3	6.77	9.41	3.52	28.54	7.28	Finalmente se observa una disminución de SSV, gracias al efecto de remoción que realiza la biomasa y la sedimentación.	

CUADRO 4. MEDIA OBTENIDA PARA LAS CONDICIONES DEL EXPERIMENTO 3

En este cuadro se presenta un aumento del 12% de sólidos suspendidos totales en el punto E (cárcamo de efluente) con respecto al punto D (caja partidora, salida de biotorre)

PUNTO	GASTO = 6.6 l/s		$\bar{G}$ filtro = 8.27 l/s			SSV	OBSERVACIONES
	$\bar{x}$	SST	$\bar{x}$	SSF	$\bar{x}$		
A	100.42	18.40	26.30	10.55	83	15.33	Condiciones de entrada en el Parshall. Son mayores que en el gasto anterior.
B	87.11	22.05	19.62	6.07	68.66	18.91	El mismo comportamiento de los cuadros anteriores.
C	95.66	22.69	23.3	7.11	78.10	15.65	Hay un mayor aumento en este punto con respecto al gasto anterior. Lo cual supone un mayor arrastre de biopelícula.
D	61.22	15.40	11.5	4.81	52.11	13.31	Existe una marcada disminución, con respecto al punto anterior, así que, hubo una mayor retención de sólidos en el filtro.
E	68.50	16.91	15.2	4.87	56.50	16.55	Este ligero aumento indica que en la tubería del retorno del cárcamo de efluente hay sólidos sedimentados.
F	39.60	10.14	6.66	3.94	33.10	8.43	Se observa una disminución de SSV, lo cual muestra que la biomasa realiza una buena remoción y esta se refleja en la sedimentación.

CUADRO 5. MEDIA OBTENIDA PARA LAS CONDICIONES DEL EXPERIMENTO 4

De los resultados se obtiene un aumento del 20% de sólidos suspendidos totales en el punto E (cárcamo de efluente) con respecto al punto D (caja partidora, salida de biotorre).

GASTO = 8.30 l/s

Gasto filtro = 10.37 l/s

Recirculación = 25 %

PUNTO	SST		SSF		SSV		OBSERVACIONES
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	
A	94.26	23.05	18.82	3.93	74.35	19.49	Las condiciones de entrada en el Parshall son ligeramente menores que en el gasto anterior.
B	78.35	15.90	17.15	6.19	63.54	12.05	Una disminución hace suponer que existen sólidos sedimentados en la tubería que llega al cárcamo de influente.
C	84	16.62	21.37	3.91	67.64	12.57	Existe un aumento con respecto al punto B, así que, si que existiendo un arrastre de biopelícula.
D	60	18.77	15.66	5.37	50.80	12.84	Se observa una marcada reducción en comparación con el punto C, lo cual sugiere que en el filtro están retenidos los sólidos.
E	72.10	21.01	16.53	5.77	58.10	16.31	Un aumento supone que en la tubería del retorno del cárcamo de efluente existe una sedimentación de lodos.
F	35.40	11.71	11.85	4.58	27.56	8.92	Hay una disminución de SSV, menor que en el gasto anterior, por tal efecto, la biomasa está realizando una mayor remoción.

CUADRO 6. MEDIA OBTENIDA PARA LAS CONDICIONES DEL EXPERIMENTO 5

En este cuadro se observa un aumento del 24% de sólidos suspendidos totales en el punto E (cárcamo de efluente) con respecto al punto D (caja partidora, salida de biorreactor).

PUNTO	GASTO = 10.31 l/s		$\bar{\sigma}$ filtro = 13.50 l/s		Recirculación		OBSERVACIONES
	SST		SSF		SSV		
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	
A	86.80	16.30	18	9.67	66.08	14.31	Las condiciones de entrada son menores respecto a los 2 gastos anteriores.
B	82.22	15.34	21.4	10.20	63.20	13.07	Hay una ligera disminución, lo cual sugiere que pocos sólidos se están sedimentando en la tubería.
E	61.6	18.28	14.50	3.63	43.80	17.75	Existe un ligero aumento entre el punto D y E así que en el cárcamo de efluente hubo pocos sólidos sedimentados.
F	40.75	16.65	8.36	2.66	20	6.56	Una disminución de SSV indica que existe una remoción por efecto de la biomasa y el sedimentador.

Del análisis del comportamiento de sólidos presentado en los cuadros anteriores se concluye que la mayor eficiencia de la biotorre en términos de sólidos suspendidos volátiles corresponde a un  $\bar{G} = 6.93$  l/s y Recirculación = 37.5 %, el cual es congruente con los resultados de la DQO y la DBO. Por otra parte es importante hacer notar el efecto acumulativo de sólidos que se presenta en el cárcamo de bombeo de efluente el cual aumenta en un 20% la cantidad de sólidos totales, disminuyendo la eficiencia del sedimentador, ya que los sólidos corresponden a microflóculos, difíciles de sedimentar.

#### 6.4 Obtención de las constantes "n" y "k"

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para obtener las constantes "n" y "k" usando el método desarrollado por Eckenfelder; el cual supone una reacción de primer orden, en un reactor de tipo flujo pistón.

Se consideraron los perfiles de remoción para la  $DBO_5$  soluble con sus respectivas cargas hidráulicas y con una recirculación de 25%.

PROFUNDIDAD D (m)	EFICIENCIA				CARGA HIDRAULICA
	$\frac{DBO_e}{DBO_L} \times 100$				
	$L_1 = 69.25$	$L_2 = 99.02$	$L_3 = 124.15$	$L_4 = 161.55$	
1.3	71.87	81.25	68.42	90.47	
2.67	37.5	62.5	47.37	83.3	
4.08	34.37	5.0	42.1	66.7	
5.58	26	31.25	31.6	61.9	

PASO 1. En papel semilogarítmico se grafica el % de remoción de DBO vs profundidad para cada valor de carga hidráulica. Que representa la siguiente ecuación:

$$\ln \frac{S_e}{S_o} = - \left( \frac{k}{L^n} \right) D$$

O bien en coordenadas cartesianas graficamos  $\ln \% \text{ rem DBO}$  vs D y la pendiente es

$$\frac{k}{L^n}$$

#### RESULTADOS

L	$\frac{k}{L^n}$
$L_1$	- 0.219
$L_2$	- 0.217
$L_3$	- 0.170
$L_4$	- 0.095

PASO 2. Con el valor absoluto de la pendiente calculada para cada carga la graficamos contra la misma carga para describir la siguiente ecuación y obtener  $n$

$$\text{Pendiente} = \frac{k}{L^n}$$

$$\ln \text{Pendiente} = \ln k - n \ln L$$

DATOS

$L$	$\frac{k}{L^n}$
69.25	- 0.219
99.02	- 0.217
124.15	- 0.170
161.55	- 0.095

RESULTADO

$$n = 0.03$$

PASO 3.

1. Determinar los valores de  $L^n$  para cada corrida experimental utilizando el valor de  $n$  calculado en el paso 2.

Corrida No.

Ca

 $L^n$ 

1

2

3

4

1.164

2. Calcular los v  
 mental a cada

para cada corrida experi-

## PROFUNDIDAD

(m)	69.0	124.15	161.55
1.3	1.1	1.125	0.116
2.67	2.3	2.311	2.293
4.08	2.5	0.532	3.505
5.58	4.9	4.831	4.793

PASO 4. Se grafica  
 acuerdo co

de  $\frac{DBO_c}{DBO}$  x 100 vs  $D/L^n$  de  
 siguiente:

$$\left(\frac{D}{L^n}\right)$$

y la pen  
 cidad de

ta es la constante de velo  
 remoción de  $DBO_5$ .

## DATOS

$\frac{D}{L^n}$	$\frac{S_e}{S_0} \times 100$
1.145	71.87
1.133	81.25
1.125	68.42
1.116	90.47
2.352	37.5
2.327	62.5
2.311	47.37
2.293	83.3
2.594	34.37
3.557	50
3.532	42.1
3.505	66.7
4.916	26
4.864	31.25
4.831	31.6
4.793	61.9

## RESULTADO

$$k = 0.199$$

## 7. CONCLUSIONES

Con anterioridad se llevó a cabo un estudio en donde el sistema fue operado sin recirculación presentándose rompimiento de flóculo a la salida de la biotorre en el cárcamo de bombeo de efluentes, lo cual repercutió en la eficiencia del sedimentador.

Por tal motivo se realizó una segunda etapa de estudio en donde el sistema fue operado con recirculación así como un estudio del comportamiento de los sólidos para observar su repercusión en las eficiencias. Las conclusiones se presentan a continuación:

- Dentro de la clasificación de los sistemas de tratamiento biológico, el filtro percolador se encuentra entre los de mediana eficiencia de remoción de DBO. Esto se

debe principalmente al bajo tiempo de retención hidráulico, que da como resultado una mínima interacción entre la biopelícula. En el sistema en estudio la biopelícula no alcanza un espesor considerable por las bajas cargas orgánicas en el influente.

- Se obtuvo una eficiencia máxima del 69 por ciento con respecto a la Demanda Química de Oxígeno ( $DQO$ ) en el periodo que corresponde al término del cuarto experimento ( $\bar{G} = 8.27$  l/s y recirculación = 25%).

La eficiencia máxima obtenida con respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) fue del 80% en el periodo correspondiente al término del cuarto experimento ( $\bar{G} = 8.27$  l/s y recirculación = 25%).

- En el comportamiento de la eficiencia con respecto a la profundidad se aprecia una correspondencia congruente conforme a la profundidad, obteniéndose así, la mayor remoción en el nivel 1. ( $G = 5.78$  l/s y recirculación = 25%).
- Debido a que se detectó una baja eficiencia en el sedimentador secundario lo cual repercutió en la eficiencia global del sistema, se hizo el seguimiento de los sólidos suspendidos. Concluyéndose de dicho análisis que,

la mayor eficiencia de la biotorre en función de sólidos suspendidos volátiles corresponde a un  $\bar{G} = 6.93$  l/s y recirculación = 37.5%, lo cual es congruente con los resultados obtenidos para la  $DQO$  y la  $DBO_5$ .

- Los sólidos suspendidos a gastos menores a 9.8 l/s tienden a acumularse en las líneas de alimentación, lo cual es de esperarse ya que no se alcanza la velocidad mínima requerida por Metcalf y Eddy de 1.21 l/s. También se encontró acumulación en el cárcamo de efluente, esto se atribuye al tiempo que permanece el agua tratada en éste cárcamo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Atkinson, B. and Abdel Rahman Ali, M.E., "The effectiveness of Biomass Hold up and packing surface in Trickling Filters". (Water Research). Vol. 12, pp 147-156, 1978.
- Atkinson, B. Busch. A.W., and Daw Kens, G.S. "Recirculation, reaction kinetics and effluent. Quality in a Trickling filter Flow Model". (Journal of Water Pollution Control Federation) (JWPCF). Vol. 35, pp 1307-1317, 1963.
- Atkinson, B. "A and David Daond, I.S. "Diffusion Effects with Microbial Films". Transaction, Institution of Chemical Engineers). Vol. 48, pp 245-254, 1970.
- Dye, E.O. "A comparison of activated sludge and

- trickling filter plants at Tucson". (JWPCF). Vol. 35, pp 1414-1418, 1963.
- Eckenfelder, W.W. Jr. "Trickling Filter Design and Performance". Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE. Vol. 87, SA6, pp-87, 1961.
  - Fairall, J.M., "Statistical Analysis of Trickling Filter Data". (Sewage and Ind. Wastes). Vol. 24, pp 1358, 1952.
  - Fairall J.M., "Statistical Quality Control in Waste Treatment". (Sewage and Ind. Wastes). Vol. 25, pp 1282, 1953.
  - Fairall, J.M. "Correlation of trickling filter data". (Sewage and Ind. Wastes). Vol. 28, pp 1069-1074, 1956.
  - Galler, W.S., and H.B. Gotaas "Optimization Analysis for Biological Filter Design". (Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE). Vol. 92, No. SA1, 1966. (JSED. ASCE).
  - Harris, N.P. and Hansford, G.S.A., "Study of Substrate Removal in a Microbial Film Reactor". (Water Research). Vol. 10, pp 935-943, 1976.

- Hawkes H.A. and Shephard M.R.N. "The effect of dosing frequency on the seasonal fluctuation and vertical distribution of solids and grazing fauna in sewage Percolating Filters". (Water Research). Vol. 6, pp 721-730, 1972.
  
- Heukelekian H. "The relationship between accumulation, biochemical and biological characteristics of film, and purification capacity of a biofilter and a standard filter". (Sewage Wks. J.) Vol. 17, pp 23-38, 1945.
  
- Honda, Y. and Matsumoto, J. "The effect of temperature on the growth of microbial film in a model Trickling Filter". (Water Research). Vol. 17, pp 375-382, 1983.
  
- Houland, W.E., "Effect of temperature on Sewage Treatment Processes". (Sewage and Ind. Wastes). Vol. 23, pp 161-169, 1953.
  
- Howell, J.A. and Atkinson, B., "Sloughing of Microbial film in Trickling Filters". (Water Research). Vol. 10, pp 307-315, 1976.
  
- Levenspiel, O. "Chemical Reaction Engineering". 2nd Edith., John Wiley and Sons. 1972.

- Metcalf and Eddy. "Wastewater engineering: Treatment disposal and reuse". Ed. Mc Graw-Hill, New York, EUA, 1972.
- Metcalf and Eddy. "Wastewater engineering: Collection and pumping of wastewater". Ed. Mc Graw Hill, New York, EUA, 1981.
- Ramalho, R.S. "Introduction to wastewater treatment processes". Academic Press. EUA, 1979.
- Schulze, K.L. "Experimental vertical screen trickling filter". (Sewage and Ind. Wastes). Vol. 29, 458-467, 1957.
- Smith, J.M. "Chemical Engineering Kinetics". 2a. Ed. Mc Graw Hill Book. Tokyo, Jap. 1970.
- Solbé J.F. de L.G. Ripley P.G. et al. "The effects of the temperature on the performance of experimental percolating filters with and without mixed-macro-invertebrate populations". (Water Research). Vol. 8, pp 557-573, 1974.
- Sorrels, J.H., and Zeller, P.J.A. "Effect of Recirculation on Trickling Filter Performance". (Sewage and

- Ind. Wastes). Vol. 27, pp 415, 1955.
- Sorrels, J.H. and Zeller P.A. "Heavy loadings on trickling filters". JWPCF. Vol. 35, pp 1184-1194. 1963.
  - Sorrels, J.H. et. al. "Supernatant on trickling filters". JWPCF. Vol. 35, pp 1419-1430. 1963.
  - Sundstrom, D.W. and Klei, H.E. "Wastewater Treatment". Prentice Hall, New Jersey. 1979.
  - Topiwala, H.H. et. al.. "Effect of wall growth in steady State Continuous Cultures". (Biotechnology and Bioengineering). Vol. 13, pp 795-813. 1971.
  - Velz, C.J., "A Basic Law for the performance of Biological Filter". (Sewage Wks. J.). Vol. 20, pp 607-617, 1948.

TABLA 5.1. CONCENTRACION Y EFICIENCIA OBTENIDA PARA LA DEMANDA DE OXIGENO TOTAL Y SOLUBLE.

DQO (mg/L)	TOTAL					SOLUBLE			n
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	
Condiciones de operación									%
Gasto prom. = 5.78 l/s	252	194	182	194	167		170	12	55
Recirc. = 25%	230	195	148	117	144		148	9	63
Carga org. = 2.74 kgDQO/m <sup>3</sup> día	196	180	145	100	122	145	114		54
	113	144	90	187	86	105	94		65
	179	144	214	218	124	152	113		52
--	380	171	167	813	179	293	114		68
pH = 7.5	116	206	172	131	71	101	172		55
	269	204	127	96	104	250	165		61
Periodo muestreo:240787-040987	274	178	148	115	112	237	174		70
P <sub>1</sub> = Brazo dist. (Influyente)	288	229	181	118	41	277	225		82
P <sub>2</sub> = 1.34 m de prof. de empaque	242	180	130	123	141	204	137		51
P <sub>3</sub> = 2.68 m de prof. de empaque	279	189	171	141	145	260	126		50
P <sub>4</sub> = 4.05 m de prof. de empaque	290	221	165	129	129	261	199		51
P <sub>5</sub> = Caja partidora (Efluente)	238	150	136	92	92	201	176		61
n = eficiencia	183	110	84	73	84	117	81		66
MEDIAS $\bar{X}$	234	118	148	144	117	197	150		61
Gasto prom. = 6.93 l/s	209	134	119	130	134	146	104		54
Recirc. = 37.5%	289	281	265	257	198	233	179		47
Carga org. = 3.48 kgDQO/m <sup>3</sup> día	197	146	138	134	142	150	115		48
	286	251	259	259	131	247	212		64
	181	135	123	108	119	104	104		49
	230	153	149	157	168	184	130		52
pH = 8.0	227	181	158	88	115	158	173		63
	227	150	254	115	115	92	112		61
	408	938	334	277	223	354	281		63
Periodo muestreo:090987-051087	230	165	162	158	150	181	135		41
	243	190	175	182	194	152	167		34
MEDIAS $\bar{X}$	248	193	194	169	153	182	156		55
Gasto prom. = 9.10 l/s	216	155	133	129	163	136	110		58
Recirc. = 37.5%	179	153	209	138	138	104	108		42
Carga org. = 4.54 kgDQO/m <sup>3</sup> día	257	228	160	157	164	175	164		62
	205	163	152	136	129	140	129		52
--	133	133	121	113	136	144	133		32
pH = 8.0	377	279	276	189	230	268	211		49
	238	211	181	174	203	132	166		75
	292	249	229	265	213	177	185		51
Periodo muestreo:061087-111187	230	219	176	203	180	176	160		49
	335	224	160	156	183	240	179		68
	270	216	200	154	320	170	147		51
	269	142	185	142	165	137	127		61
	289	197	184	181	189	158	170		53
	174	131	124	120	108	135	96		60

TABLA 5.2. CONCENTRACION Y EFICIENCIA OBTENIDA PARA LA DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO TOTAL Y SOLUBLE. (CONTINUACION).

DQO (mg/l)	PUNTOS DE MUESTREO										n	
	TOTAL					SOLUBLE						
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>		%
Condiciones de operación												
	199	138	111	99	130	111	46	73	69	27	86	
	233	233	141	145	195	111	114	92	92	92	60	
	287	230	180	230	176	214	172	142	134	126	56	
	194	186	152	144	170	137	110	102	98	95	51	
	247	186	156	122	156	152	144	110	87	83	66	
	249	200	215	200	234	151	151	136	132	125	50	
	205	167	194	179	144	110	106	64	72	76	63	
	327	323	255	150	195	255	244	173	68	71	78	
MEDIAS $\bar{x}$	246	198	177	178	160	161	146	122	104	102	57	
Gasto prom. = 8.27 l/s	230	173	150	142	123	138	100	96	80	88	62	
Recirc. = 25%	219	169	131	127	127	123	123	96	85	85	62	
Carga org. = 4.28 kgDQO/m <sup>3</sup> día	235	172	145	141	196	114	125	106	86	102	57	
	273	226	195	199	219	137	152	152	133	133	51	
	306	298	165	149	204	180	161	125	102	102	67	
	256	224	193	169	157	181	142	126	110	106	58	
pH = 8.0	246	219	158	161	165	161	138	114	117	111	55	
	262	196	223	223	173	154	117	111	108	108	39	
Periodo muestreo:121187-141287	215	173	188	165	114	100	107	81	58	58	73	
	266	243	232	217	179	156	152	148	114	110	57	
	269	197	193	178	163	155	148	129	117	114	58	
	265	205	197	170	170	155	144	114	114	110	59	
	264	253	389	234	181	136	132	124	106	118	57	
	250	196	185	127	161	161	138	111	111	107	57	
	196	146	123	119	127	115	131	92	85	80	59	
	246	142	165	177	181	135	119	119	104	115	53	
	273	227	146	277	127	146	135	104	81	96	64	
	234	199	222	145	168	161	134	130	96	103	56	
MEDIAS $\bar{x}$	255	205	190	188	163	143	133	112	103	100	60	
Gasto prom. = 10.3 l/s	277	224	220	193	178	185	154	151	151	116	58	
Recirc. = 25%	231	192	158	154	154	131	127	115	92	150	35	
Carga org. = 4.69 kgDQO/m <sup>3</sup> día	513	410	241	192	199	264	245	161	115	107	79	
	240	218	192	147	147	162	173	143	139	139	42	
	275	172	170	240	210	134	130	115	107	103	63	
pH = 8.0	126	123	92	73	65	176	111	88	65	69	45	
	224	129	114	99	91	129	201	91	84	84	62	
Periodo muestreo:120188-250288	247	162	147	143	139	181	143	139	131	81	67	
	200	193	178	155	231	110	121	114	98	95	52	
	243	193	178	162	166	170	174	158	143	38	84	
	143	102	71	68	94	75	71	64	68	56	61	
	222	165	154	150	117	147	143	113	128	26	88	
	195	149	168	130	145	145	126	126	103	122	37	
	145	88	65	50	42	80	72	46	42	23	84	
	246	69	169	142	192	131	150	119	108	192	22	

TABLA 5.3. CONCENTRACION Y EFICIENCIA OBTENIDA PARA LA DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO TOTAL Y SOLUBLE. (CONTINUACION).

DQO (mg/l)	PUNIOS DE MUESTREO										n	
	TOTAL					SOLUBLE						
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>		%
Condiciones de operación												
	216	193	135	120	235	123	205	96	89	85	61	
	253	172	169	142	134	165	157	130	119	77	70	
	277	258	196	165	146	158	200	173	138	35	87	
	215	149	126	96	172	123	119	100	92	88	60	
	244	244	169	158	124	169	124	105	90	94	63	
	290	168	160	168	195	225	131	115	123	108	63	
	189	204	170	140	120	132	124	102	98	90	52	
	182	149	74	104	104	126	93	74	67	67	63	
	238	178	163	174	152	171	119	115	115	107	55	
MEDIAS $\bar{X}$	235	179	153	148	140	151	142	114	104	90	63	
Gasto prom. = 13.5 l/s	233	213	118	103	103	160	144	107	95	92	61	
Recirc. = 25%	208	143	117	98	98	147	113	94	90	79	62	
	257	212	186	151	129	186	136	110	98	90	65	
Carga org. = 6.68 kgDQO/m <sup>3</sup> día	306	279	257	177	128	226	189	158	140	102	67	
	234	260	109	106	53	162	150	94	72	45	81	
	185	142	265	138	116	149	113	94	98	94	49	
pH = 8.0	242	208	196	135	181	227	188	154	111	69	71	
	192	177	150	123	123	165	127	100	92	100	48	
Periodo muestreo: 220388-210488	186	214	167	131	111	155	167	92	87	71	62	
	286	313	286	286	127	218	234	234	198	95	67	
	330	218	156	121	82	245	214	81	74	54	83	
	265	179	163	113	97	148	144	101	89	74	72	
MEDIAS $\bar{X}$	244	213	181	140	112	182	160	118	104	80	67	

TABLA 6.1. CONCENTRACION Y EFICIENCIA OBTENIDA PARA LA DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO TOTAL Y SOLUBLE.

DBO <sub>5</sub> mg/l	PUNTOS DE MUESTREO										η
	TOTAL					SOLUBLE					
Condiciones de operación	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	%
Gasto prom. = 5.78 l/s											
Recirc. = 25%	102	72	39	81	34	99	39	27	26	22	78
Carga org. = 2.74 kgDQO/m <sup>3</sup> día	123	42	57	57	78		87	48	50	77	38
	210	48	132	129	87	183	78	84	90	90	57
	132	114	84	66	42	54	87	99	66	27	80
pH = 7.5	114	87	39	-	12	98	37	12	7	-	93
	90	66	21	57	33	66	60	22	55	21	77
	78	30	12	-	-	78	48	15	6	2	98
Periodo muestreo:240787-040987	120	102	66	36	36	123	84	57	36	15	87
	126	78	90	60	96	102	69	42	54	52	59
P <sub>1</sub> = Brazo dist. (Influyente)	48	33	39	27	90	76	40	30	24	21	56
P <sub>2</sub> = 1.34 m de prof. de empaque	108	45	24	12	12	82	45	-	16	13	87
P <sub>3</sub> = 2.68 m de prof. de empaque	120	78	42	24	30	108	63	51	-	42	65
P <sub>4</sub> = 4.05 m de prof. de empaque	90	30	39	15	18	51	31	27	13	7	92
P <sub>5</sub> = Caja partidora (Efluente)	96	69	36	33	39	55	40	27	21	18	81
η = Eficiencia											
MEDIAS $\bar{X}$	112	64	51	50	47	90	58	42	36	31	72
Gasto prom. = 6.93 l/s	90	60	63	60	75	72	58	36	36	54	40
Recirc. = 37.5%	132	111	108	105	33	117	82	69	48	58	64
Carga org. = 3.48 kgDQO/m <sup>3</sup> día	78	48	48	42	45	63	51	30	16	16	79
	186	159	156	174	39	156	127	129	138	72	61
	102	84	72	66	78	54	57	48	48	45	56
pH = 8.0	102	78	66	36	24	78	75	81	39	27	74
	348	138	342	132	90	111	120	72	39	24	93
Periodo muestreo:090987-051087	126	96	90	102	90	81	57	57	54	54	57
	108	78	78	-	36	57	57	60	54	42	61
MEDIAS $\bar{X}$	141	95	114	90	57	88	76	65	52	44	65
Gasto prom. = 9.10 l/s	96	24	18	12	30	111	21	9	6	3	97
Recirc. = 37.5%	66	54	36	30	18	51	45	18	12	12	82
Carga org. = 4.54 kgDQO/m <sup>3</sup> día	54	36	30	30	30	24	24	21	18	21	67
	96	66	36	30	36	54	42	30	18	18	81
	96	72	54	48	60	54	45	33	39	36	62
pH = 8.0	72	66	24	42	6	42	33	24	21	24	67
	150	108	108	54	102	123	96	81	45	54	64
Periodo muestreo:061087-111187	114	132	90	90	84	99	42	27	33	33	71
	126	90	90	132	6	66	63	48	18	12	90
	126	108	78	84	12	84	75	57	54	9	93
	198	156	90	78	78	129	87	51	75	42	80
	108	90	78	84	72	54	51	45	42	45	58
	90	60	54	48	54	45	39	30	33	33	63
	102	108	84	90	102	63	51	63	66	63	38
	78	66	60	42	48	57	36	24	21	24	69
	84	66	48	36	54	48	36	30	21	33	61

TABLA 6.2. CONCENTRACION Y EFICIENCIA OBTENIDA PARA LA DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO TOTAL Y SOLUBLE. (CONTINUACION).

DBO <sub>5</sub> (mg/l)	PUNTOS DE MUESTREO										n
	TOTAL					SOLUBLE					
Condiciones de operación	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	%
	90	60	36	36	30	72	57	24	21	24	73
	54	30	24	18	30	24	9	3	6	3	95
	84	60	60	48	54	48	36	27	27	18	78
	114	78	54	54	48	57	45	36	33	33	71
	120	90	126	78	96	54	42	51	63	48	60
	168	78	90	54	54	63	120	108	18	18	84
MEDIAS $\bar{X}$	104	74	62	55	50	64	50	38	31	27	74
Gasto prom. = 8.27 l/s	90	66	60	48	90	48	45	30	27	27	70
Recirc. = 25%	72	48	36	6	30	30	39	12	54	12	83
Carga org. = 4.28 kgDQO/m <sup>3</sup> día	102	78	72	66	72	48	51	45	30	33	70
	96	66	60	78	60	51	96	54	30	33	66
	120	150	60	48	-	78	66	39	-	33	73
pH = 8.0	114	84	102	102	72	78	63	51	63	42	63
	96	78	60	48	30	57	45	36	30	39	59
Periodo muestreo:121187-141287	66	12	60	60	36	39	33	18	3	12	81
	174	108	120	132	96	72	63	57	57	60	66
	144	108	102	138	84	78	66	57	39	39	73
	102	72	66	54	60	60	93	54	42	42	59
	120	54	48	30	36	66	39	33	24	24	80
	102	54	108	72	66	57	48	45	30	33	68
	84	66	36	36	54	72	27	21	24	21	75
	72	24	36	30	12	39	21	15	12	15	79
MEDIAS $\bar{X}$	104	71	68	63	57	58	49	38	33	31	71
Gasto prom. = 10.37 l/s	42	18	6	6	-	30	-	15	-	9	79
Recirc. = 25%	138	78	84	90	78	87	66	66	57	51	63
Carga org. = 4.68 kgDQO/m <sup>3</sup> día	42	60	36	-	54	36	33	27	18	18	57
	102	84	72	54	-	-	75	63	51	6	94
pH = 8.0	108	138	72	54	66	42	27	21	48	36	67
	100	90	96	108	96	60	57	63	57	60	44
Periodo muestreo:120188-250288	114	78	54	48	36	42	42	36	27	27	76
	114	42	54	12	-	42	36	30	15	12	89
	72	72	42	42	72	66	102	72	30	21	71
	102	30	40	18	30	36	15	3	24	18	82
	114	138	174	78	84	87	114	93	69	42	71
	138	102	42	66	66	78	57	36	33	36	74
	102	78	48	60	72	72	48	27	33	30	71
	126	90	108	156	84	111	69	51	54	42	67
	126	60	96	72	48	63	45	33	42	34	69
	102	78	54	48	60	87	63	45	39	36	65
	144	90	102	84	66	84	45	51	42	42	41
MEDIAS $\bar{X}$	106	78	69	62	65	64	56	43	40	31	75
Gasto prom. = 13.5 l/s	42	30	18	90	18	48	48	24	33	24	43
Recirc. = 25%	78	42	48	24	36	69	39	42	24	39	51
Carga org. = 6.68 kgDQO/m <sup>3</sup> día	186	114	-	90	120	135	102	-	69	81	56
	120	102	-	114	108	93	69	57	57	63	48
pH = 8.0	162	114	144	96	126	144	93	81	96	63	61
	168	198	-	150	60	-	-	93	111	42	75
Periodo muestreo:220388-210488	66	12	60	60	36	39	33	18	3	12	81
	114	78	54	54	48	57	45	36	33	33	71
MEDIAS $\bar{X}$	109	81	60	76	64	76	58	48	50	42	61

TABLA 7 . PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS

Gasto l/s	Recirc. %	Carga Org. 3 kgDQO/m <sup>3</sup> día	Punto de muestreo	DBO <sub>5T</sub> (mg/l)	DBO <sub>5S</sub> (mg/l)	DQO <sub>T</sub> (mg/l)	DQO <sub>S</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> n%	DQO n%	pH	Sedimentador η %
5.78	.25	2.74	Influyente	112	90	234	197	72	61	7.5	59
			2	64	58	118	150			7.5	
			3	51	42	148	119			7.5	
			4	50	36	144	116			7.5	
			Efluente	47	31	117	91			7.4	
6.93	37.5	3.48	Influyente	141	88	248	182	69	53	8.0	57
			2	95	76	193	156			8.1	
			3	114	65	194	147			8.1	
			4	90	52	169	117			8.0	
			Efluente	57	44	153	116			8.0	
9.10	37.5	4.54	Influyente	104	64	246	161	74	58	8.3	72
			2	74	50	198	146			8.2	
			3	62	38	177	122			8.3	
			4	55	31	178	104			8.1	
			Efluente	50	27	160	102			8.0	
8.27	25	4.28	Influyente	104	58	255	143	70	61	7.9	73
			2	71	49	205	133			7.85	
			3	68	38	190	112			7.7	
			4	63	33	188	103			7.5	
			Efluente	57	31	163	100			7.5	
10.37	25	4.69	Influyente	106	64	235	151	71	62	8.3	79
			2	78	56	179	142			8.0	
			3	69	43	153	114			7.95	
			4	62	40	148	104			7.90	
			Efluente	65	31	140	90			7.8	
13.5	25	6.68	Influyente	109	78	244	182	61	67	7.9	79
			2	81	58	213	160			7.8	
			3	60	48	181	118			7.6	
			4	78	50	140	104			7.4	
			Efluente	64	42	112	80			7.4	

TABLA 8. RESULTADOS DE SOLIDOS EN LA TRAYECTORIA DEL AGUA RESIDUAL DEL SISTEMA BIOFILTRO CON CONDICIONES DE GASTO DE 6.93 l/s Y RECIRCULACION DE 37%.

Punto	MUESTREO 1			MUESTREO 2			MUESTREO 3			MUESTREO 4		
Muest.	SST	SSF	SSV									
A	86	28	58	76	16	60	78	14	64	48	8	40
B	58	10	48	64	14	50	52	8	44	38	6	32
C	52	14	38	58	14	44	50	4	46	46	4	42
D	40	12	28	40	6	34	46	10	36	46	10	36
E	52	10	42	62	14	48	56	10	46	52	10	42
F	34	10	24	16	4	12	36	6	30	30	4	36

Punto	MUESTREO 5			MUESTREO 6			MUESTREO 7			MUESTREO 8			MEDIAS		
Muest.	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV									
A	78	34	44	78	8	70	54	2	52	68	15	53	71	16	55
B	74	30	44	80	28	52	64	8	52	76	16	60	63	20	48
C	104	50	54	76	2	74	48	0	48	56	11	45	61	21	49
D	80	42	38	48	0	0	52	4	48	50	12	38	50	17	39
E	82	44	38	94	24	70	42	6	36	52	14	38	62	18	45
F	54	36	18	6	0	0	42	12	30	38	8	30	32	14	24

TABLA 9. RESULTADOS DE SÓLIDOS EN LA TRAYECTORIA DEL AGUA RESIDUAL DEL SISTEMA BIOFILTRO A CONDICIONES DE GASTO DE 9.10 l/s Y RECIRCULACION DE 37%.

Punto	MUESTREO 9			MUESTREO 10			MUESTREO 11			MUESTREO 12			MUESTREO 13		
Muest.	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
A	78	14	64	74	20	54	80	6	79	70	16	54	70	20	50
B	80	16	64	80	16	64	24	0	24	70	14	56	62	16	46
C	54	4	50	62	14	48	46	2	44	56	12	44	58	20	38
D	52	2	50	28	4	24	34	4	30	42	8	34	42	10	32
E	86	8	78	48	12	36	50	0	50	38	6	32	48	12	36
F	36	8	28	36	10	26	32	0	32	34	8	26	30	6	24

Punto	MUESTREO 14			MUESTREO 15			MUESTREO 16			MUESTREO 17			MUESTREO 18		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	72	12	60	70	20	50	80	16	64	92	22	70	74	20	54
B	58	14	44	72	14	58	76	18	56	76	18	58	66	18	48
C	62	20	42	66	10	56	72	8	64	86	24	62	80	26	54
D	42	6	36	36	8	24	76	16	60	72	12	60	74	14	60
E	46	12	34	54	16	38	72	12	60	76	16	60	62	10	52
F	28	4	24	34	4	30	44	6	38	48	10	38	32	6	36

Punto	MUESTREO 19			MUESTREO 20			MUESTREO 21			MUESTREO 22			MUESTREO 23		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	104	26	78	116	24	92	86	12	74	96	18	78	96	22	74
B	76	14	62	110	32	78	72	20	52	58	8	50	58	16	42
C	82	22	60	102	20	82	88	22	66	62	8	54	60	16	44
D	68	12	56	70	20	50	52	16	36	48	8	40	46	12	34
E	58	12	46	70	10	60	46	8	38	46	6	40	38	2	36
F	42	10	32	54	12	42	34	16	18	38	8	30	30	10	20

Punto	MUESTREO 24			MUESTREO 25			MUESTREO 26			MUESTREO 27			MUESTREO 28		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	88	20	68	104	20	84	82	18	64	106	18	88	134	52	82
B	86	14	72	80	16	64	72	18	54	72	16	56	104	42	62
C	82	10	72	88	22	66	76	20	56	78	18	60	110	38	72
D	80	22	58	54	6	48	64	12	52	42	10	32	124	58	66
E	80	14	66	58	8	50	58	10	48	60	8	52	98	38	60
F	28	4	24	18	0	18	44	8	36	40	6	34	36	18	18

Punto	MUESTREO 29			MUESTREO 30		
Muest.	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
A	74	8	66	104	18	86
B	72	8	64	92	30	62
C	86	16	70	90	20	70
D	90	14	76	70	18	52
E	98	18	80	80	20	60
F	46	6	40	36	12	24

MEDIAS		
SST	SSF	SSV
88	20	69
75	19	56
77	20	58
61	18	46
62	15	31
37	9	29

TABLA 10. RESULTADOS DE SOLIDOS EN LA TRAYECTORIA DEL AGUA RESIDUAL DEL SISTEMA BIOFILTRO CON CONDICIONES DE GASTO DE 8.27 l/s Y RE-CIRCULACION DE 25%.

Punto	MUESTREO 31			MUESTREO 32			MUESTREO 33			MUESTREO 34			MUESTREO 35		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	100	12	88	92	12	80	80	16	64	86	24	90	108	20	88
B	92	14	78	74	8	66	76	10	66	86	24	72	106	22	84
C	88	18	70	82	10	72	90	20	70	82	12	96	90	14	76
D	50	8	42	34	8	26	64	2	62	66	16	40	60	8	52
E	52	6	46	24	0	24	158	22	136	66	0	42	64	10	54
F	16	2	14	12	6	6	46	4	42	30	4	32	18	2	16

Punto	MUESTREO 36			MUESTREO 37			MUESTREO 38			MUESTREO 39			MUESTREO 40		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	114	24	90	148	32	116	96	20	76	98	28	70	88	20	68
B	104	28	68	100	22	78	146	26	120	86	24	62	82	26	56
C	98	20	78	110	24	86	170	40	130	90	24	66	84	12	72
D	56	12	44	84	16	68	82	20	62	74	16	58	60	12	48
E	66	12	54	90	18	72	80	14	66	74	12	62	58	24	34
F	34	10	24	44	10	34	32	6	26	64	16	48	40	8	32

Punto	MUESTREO 41			MUESTREO 42			MUESTREO 43			MUESTREO 44			MUESTREO 45		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	96	18	78	116	20	96	86	10	76	106	26	80	76	12	64
B	34	12	22	76	2	74	88	12	76	74	16	58	70	18	52
C	84	20	64	86	4	82	90	12	78	70	4	66	72	6	66
D	84	10	74	64	8	56	84	6	78	50	6	44	54	20	34
E	50	18	32	72	8	64	116	18	98	72	18	54	72	6	66
F	26	6	20	42	6	36	52	8	44	38	8	30	42	4	38

Punto	MUESTREO 46			MUESTREO 47			MEDIAS $\bar{x}$		
Muest.	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
A	164	58	106	130	28	102	100	26	83
B	102	24	78	88	24	64	87	20	69
C	112	22	90	106	32	74	96	23	73
D	44	6	38	48	12	36	61	11	52
E	60	4	56	52	14	38	68	15	56
F	28	4	24	20	2	18	40	7	33

· TABLA 11. RESULTADOS DE SOLIDOS EN LA TRAYECTORIA DEL AGUA RESIDUAL DEL SISTEMA BIOFILTRO CON CONDICIONES DE GASTO DE 10.37 Y RECIRCULACION DE 25%.

Punto	MUESTREO 48			MUESTREO 49			MUESTREO 50			MUESTREO 51			MUESTREO 52		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	90	22	68	104	24	80	268	90	178	116	22	94	164	44	120
B	76	20	56	90	14	76	156	42	114	86	10	76	94	36	58
C	88	20	68	100	20	80	198	62	136	106	22	34	116	32	84
D	66	18	48	46	4	42	86	16	70	58	14	44	96	28	44
E	64	16	48	58	14	44	94	16	78	48	8	40	112	26	40
F	46	10	36	18	0	18	34	6	28	30	8	22	60	18	22

Punto	MUESTREO 53			MUESTREO 54			MUESTREO 55			MUESTREO 56			MUESTREO 57		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	88	14	74	56	14	42	84	14	70	92	18	74	88	12	76
B	70	16	54	78	14	64	72	14	58	70	4	66	82	18	64
C	74	22	52	80	12	68	88	18	70	72	10	62	76	12	64
D	32	12	20	70	14	56	34	2	32	58	4	54	48	8	40
E	36	12	24	40	6	34	48	8	40	64	10	54	70	24	46
F	20	8	12	22	0	22	18	0	18	30	0	30	23	4	20

Punto	MUESTREO 58			MUESTREO 59			MUESTREO 60			MUESTREO 61			MUESTREO 62		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	64	14	50	128	20	108	84	18	66	100	18	32	94	18	76
B	62	8	54	94	22	72	76	14	62	72	18	54	88	8	80
C	54	14	40	96	12	84	80	18	62	100	24	76	84	20	64
D	40	16	24	52	4	48	70	12	58	48	18	36	62	6	56
E	46	22	24	34	10	64	72	14	58	100	22	78	58	6	52
F	34	18	16	10	0	10	54	8	46	30	8	22	20	0	20

Punto	MUESTREO 63			MUESTREO 64			MUESTREO 65			MUESTREO 66			MUESTREO 67		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	84	24	60	100	20	80	124	18	106	90	20	70	84	22	62
B	92	28	64	108	18	90	64	12	52	84	6	78	92	30	62
C	90	24	66	90	20	70	94	8	86	80	24	56	66	22	44
D	96	26	70	86	16	70	50	18	32	78	16	62	54	20	34
E	84	22	62	116	22	94	60	20	40	--	--	--	82	20	62
F										30	16	14	42	12	30

Punto	MUESTREO 68			MUESTREO 69			MUESTREO 70			MUESTREO 71			MEDIA X		
Muest.	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV									
A	96	26	70	80	16	64	96	16	80	62	24	38	94	19	74
B	82	26	56	54	20	34	84	16	68	32	6	26	78	17	64
C	100	24	76	68	8	60	88	16	72	44	16	28	84	21	68
D	62	12	50	34	8	26	56	10	46	12	4	8	60	16	51
E	82	18	64	46	6	40	64	10	54	14	6	8	72	17	58
F	30	6	24	36	8	28	46	4	42	8	4	4	35	12	27

TABLA 12. ESTUDIO DE SOLIDOS EN LA TRAYECTORIA DEL AGUA RESIDUAL DEL SISTEMA BIOFILTRO CON CONDICIONES DE GASTO DE 13.5 l/s Y RECIRCULACION DE 25%.

Punto	MUESTREO 72			MUESTREO 73			MUESTREO 74			MUESTREO 75		
Muest.	SST	SSF	SSV									
A	126	54	72	102	30	72	96	4	92	52	14	38
B	138	66	72	96	30	66	80	10	70	46	14	32
C	128	58	70	110	4	106	94	8	86	58	8	50
D	70	54	16	62	58	4	66	4	62	22	16	16
E	74	48	26	22	14	8	66	10	56	32	14	18
F	64	48	16	50	36	14	42	8	34	6	4	2

Punto	MUESTREO 76			MUESTREO 77			MUESTREO 78			MUESTREO 79		
Muest.	SST	SSF	SSV									
A	106	32	74	58	16	42	76	22	34	56	16	40
B	46	24	22	64	26	38	84	12	72	72	18	54
C	90	34	56	62	14	48	70	8	62	60	12	48
D	34	22	12	40	12	28	68	22	46	42	12	30
E	38	20	18	40	14	26	50	12	38	76	20	56
F	14	10	4	24	10	14	34	8	26	28	8	20

Punto	MUESTREO 80			MUESTREO 81			MUESTREO 82			MUESTREO 83			MUESTREO 84		
Muest.	SST	SSF	SSV												
A	102	14	44	78	14	44	74	8	66	100	8	92	76	6	70
B	106	10	50	60	10	50	96	40	56	44	8	36	82	4	78
C	80	8	32	40	8	32	106	16	90	40	20	20	94	6	88
D	54	12	16	28	12	16	68	2	66	34	10	24	32	6	26
E	70	8	26	34	8	26	80	16	64	84	14	70	38	14	24
F	30	8	22	30	8	22	48	8	40	20	4	16	22	12	10

Punto	MEDIAS $\bar{x}$		
Muest.	SST	SSF	SSV
A	87	18	66
B	82	21	63
C	82	14	63
D	50	14	41
E	62	14	44
F	41	8	20

P A R A M E T R O	$\bar{C} = 5.78$ 1/s R = 25%	$\bar{C} = 6.93$ 1/s R = 37.5%	$\bar{C} = 9.10$ 1/s R = 37.5%	$\bar{C} = 8.27$ 1/s R = 25%	$\bar{C} = 10.37$ 1/s R = 25%	$\bar{C} = 13.5$ 1/s R = 25%	OBSERVACIONES
Volumen de empaque (m <sup>3</sup> )	42.64	42.64	42.64	42.64	42.64	42.64	
Area especifica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	140	140	140	140	140	140	Bio-Dek B-19060 (Munters, Co)
Area superficial de empaque (m <sup>2</sup> )	5970	5970	5970	5970	5970	5970	
Area del filtro (área transversal de empaque) (m <sup>2</sup> )	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22	
Altura empacada (m)	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58	
Carga hidráulica · m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d	69.26	82.93	108.93	99.02	124.15	161.55	
Carga orgánica KgDQO/m <sup>3</sup> ·d	2.74	3.48	4.54	4.28	4.69	6.68	
DBO <sub>5</sub> total influente (mg/l)	111	141	104	104	106	109	
DBO <sub>5</sub> total efluente (mg/l)	47	57	50	57	65	64	
DBO <sub>5</sub> soluble influente (mg/l)	90	88	65	58	64	78	
DBO <sub>5</sub> soluble efluente (mg/l)	31	44	28	31	31	42	
DQO total influente (mg/l)	234	248	246	255	235	244	
DQO total efluente (mg/l)	117	154	160	163	140	112	
DQO soluble influente (mg/l)	197	182	161	143	151	182	
DQO soluble efluente (mg/l)	91	116	103	100	90	80	
pH influente	7.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	No hubo variac. significativas
Muestreo	diario	diario	diario	diario	diario	diario	
Tiempo de operación	240787-040987	090987-051087	061087-111187	121187-141287	120188-250288	220388-210488	