

01177  
12  
23



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“FILTRACIÓN RÁPIDA DE UN EFLUENTE  
PRIMARIO AVANZADO”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL

PRESENTA

*I.C. HOMERO ENCARNACIÓN LANDA VERA*

Directora de tesis:

*Dra. Blanca Jiménez Cisneros*

México, 1996



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**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 esta 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.

*A mi madre:  
ya que siempre ha creído en mí.*

***A Estela y Gertrudis:  
gracias por toda la ayuda.***

**Este trabajo se realizó con el apoyo del Instituto de Ingeniería dentro  
del proyecto 4347 y 6345.**

***A la Dra. Blanca Jiménez Cisneros:  
quizás para ella es una tesis mas,  
para mí es la primera de maestría.***

## CONTENIDO

	página
<b>Lista de Tablas</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	ii
<b>Nomenclatura</b>	iii
<b>OBJETIVO</b>	iv
<b>RESUMEN</b>	vii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	viii
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	
<b>1.1 Filtración</b>	1
1.1.1 Filtración a profundidad	1
1.1.2 Modelos matemáticos	2
1.1.2.1 Balance de materia	2
1.1.2.2 Atascamiento de un filtro	4
1.1.2.3 Calidad del agua filtrada	4
1.1.2.4 Pérdida de carga	4
1.1.3 Mecanismos de la filtración	7
1.1.3.1 Cribado	8
1.1.3.2 Sedimentación	9
1.1.3.3 Intercepción	9
1.1.3.4 Impacto inercial	9
1.1.3.5 Fuerzas de Van der Waals	10
1.1.3.6 Interacción química	12
1.1.4 Lavado	13
1.1.4.1 Los mecanismos de adhesión y el lavado	14
1.1.5 Filtración de aguas residuales	15
1.1.5.1 Filtración de efluentes primarios	15
<b>1.2 Tratamiento primario avanzado</b>	15
1.2.1 Opciones del tratamiento primario avanzado	16
<b>2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	
<b>2.1 Descripción de los filtros piloto</b>	19
2.1.1 Ubicación	19
2.1.2 Operación de la planta piloto	22
2.1.3 Constituyentes de los filtros	23
2.1.4 Material de construcción	24
<b>2.2 Procedimiento experimental</b>	28

2.2.1 Acondicionamiento del agua	28
2.2.2 Funcionamiento de los filtros	30
2.2.3 Velocidades de filtración	30
2.2.4 Velocidades de lavado	30
<b>2.3 Parámetros de control</b>	32
2.3.1 Huevos de helmintos	32
<b>3. RESULTADOS</b>	
<b>3.1 Filtración</b>	34
3.1.1 Velocidades de filtración	34
<b>3.2 Parámetros de control</b>	38
3.2.1 Sólidos suspendidos totales	38
3.2.2 Determinación del tamaño de partícula para los sólidos filtrables	38
3.2.3 Turbiedad	44
3.2.4 Color	44
3.2.5 Carga orgánica como DQO	44
3.2.6 Remoción de nutrientes	50
3.2.6.1 Nitrógeno	50
3.2.6.2 Nitrógeno amoniacal (N- NH <sub>4</sub> )	50
3.2.6.3 Fósforo	50
3.2.7 Pérdida de carga	55
3.2.8 Características promedio del efluente	55
<b>3.3 Lavado de filtros</b>	55
3.3.1 Velocidades de retrolavado	55
3.3.2 Eficiencia de lavado	56
<b>3.4 Remoción de huevos de helmintos</b>	64
<b>4. CONCLUSIONES</b>	74
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	77
<b>ANEXO A. Características del medio filtrante</b>	82
<b>ANEXO B. Resultados: filtro 1 (Arena y antracita)</b>	89
<b>ANEXO C. Criterios de diseño empleados para la construcción de los filtros piloto</b>	93
<b>ANEXO D. Análisis estadístico de los resultados de HH.</b>	95
<b>ANEXO E. Resultados: filtro 2 y 3</b>	101
<b>ANEXO F. Resultados de la pérdida de carga</b>	124

## Lista de Tablas

		página.
Tabla 1	Mécanismos de remoción.	7
Tabla 2	Tipos de tratamiento primario.	17
Tabla 3	Condiciones de diseño actualmente recomendadas para el TPA.	17
Tabla 4	Parámetros de diseño de la planta piloto.	22
Tabla 5	Calendario operativo de la planta (1995)	22
Tabla 6	Características del medio filtrante.	23
Tabla 7	Características constructivas de los filtros.	25
Tabla 8	Condiciones de operación.	30
Tabla 9	Procedimiento de lavado.	32
Tabla 10	Parámetros empleados para el monitoreo de los filtros	33
Tabla 11	Comportamiento del filtro 2 (TE 0.8 mm y CU 1.6)	35
Tabla 12	Comportamiento del filtro 3 (TE 1.2 mm y CU 1.6)	36
Tabla 13	Remoción de nutrientes: filtro 2	51
Tabla 14	Remoción de nutrientes: filtro 3.	51
Tabla 15	Características del efluente filtrado.	56
Tabla 16	Procedimiento de lavado.	56
Tabla 17	Pérdida de carga inicial.	64
Tabla 18	Valores registrados de HH/L (DGCOH).	64
Tabla 19	Valores registrados de HH/L (IMTA).	64
Tabla 20	Concentración de HH/L en lodos.	65

## Lista de Figuras.

		Página.
Fig. 1	Clasificación de los filtros a profundidad.	3
Fig. 2	Comportamiento de un flujo en medio poroso sin atascar.	5
Fig. 3	Comportamiento de un flujo en medio poroso con atascamiento superficial	6
Fig: 4	Calidad del agua filtrada a lo largo del ciclo de filtración.	6
Fig. 5	Remoción por cribado.	8
Fig. 6	Eliminación por sedimentación de partículas.	10
Fig. 7	Eliminación de partículas por intercepción.	10
Fig. 8	Eliminación de partículas por impacto inercial.	11
Fig. 9	Eliminación de partículas por las fuerzas de Van der Waals.	12
Fig. 10	Eliminación de partículas por interacción química.	12
Fig. 11	Esquema para definir la duración de la corrida en términos de la pérdida de carga y la calidad del efluente.	13
Fig. 12	Configuración del tratamiento primario	18
Fig. 13	Diagrama de flujo de la planta piloto.	19
Fig. 14	Dimensionamiento de la planta piloto	20
Fig. 15	Planta piloto	21
Fig. 16	Sistema de distribución.	24
Fig. 17	Montaje del sistema de distribución.	25
Fig. 18	Sistema de lavado (planta).	26
Fig. 19	Sistema de lavado (corte).	26
Fig. 20	Salida de lavado.	27
Fig. 21	Base de la columna filtrante.	28
Fig. 22	Filtros piloto.	29
Fig. 23	Instalación hidráulica.	31
Fig. 24	Duración promedio de carrera ( $v = 7$ m/h).	34
Fig. 25	Nomograma: velocidad <i>versus</i> duración de carrera.	37
Fig. 26	Remoción de sólidos suspendidos	39
Fig. 27	Sólidos suspendidos atrapados: filtro 2	40
Fig. 28	Sólidos suspendidos atrapados: filtro 3	41
Fig. 29	Determinación del tamaño de partícula. filtro 2	42
Fig. 30	Determinación del tamaño de partícula. filtro 3	43
Fig. 31	Relación de tamaño de partícula y sólidos suspendidos	45
Fig. 32	Remoción de turbiedad.	46
Fig. 33	Remoción de color.	47
Fig. 34	Remoción de carga orgánica como DQO.	48
Fig. 35	Valores promedio de carga orgánica.	49
Fig. 36	Remoción de nutrientes.	52
Fig. 37	Nitrógeno amoniacal.	53
Fig. 38	Fósforo (P-PO <sub>4</sub> ).	54
Fig. 39	Pérdida de carga: filtro 2.	57

**FALTA PAGINA**

**No.**

**III**

## Nomenclatura.

a	Constante.
C	Parámetro experimental.
C	Concentración de un agua en cuanto a materia en suspensión.
C <sub>0</sub>	Concentración inicial del agua.
CU	Coefficiente de uniformidad.
d	Diámetro de las partículas a retener.
D	Diámetro del grano del medio filtrante.
E	Porcentaje de expansión del lecho.
F	Coefficiente de filtración.
F <sub>a</sub>	Fuerzas de Van der Waals.
F <sub>A</sub>	Fuerzas de adhesión.
F <sub>0</sub>	Coefficiente de filtración inicial.
F <sub>0</sub> <sup>#</sup>	Tasa de lavado correspondiente.
g	Aceleración debida a la gravedad.
G	Gradiente de velocidad.
G <sub>a</sub>	Número de Galileo.
I	Distancia de una sección cualquiera del filtro a la sección de entrada.
k	Coefficiente de proporcionalidad.
K'	Constante de atracción de Van der Waals.
L	Espesor del lecho.
Le	Expansión del lecho durante el lavado.
n	coeficiente de expansión.
p	Porosidad del lecho limpio.
pa	Cantidad de arena.
pm	Peso del matr�az aforado.
pf	Peso del matr�az + muestra.
$\Delta p$	Pérdida de carga.
$\Delta P_{máx}$	Pérdida de carga máxima.
P	Pérdida de carga a través de la placa de resistencia R <sub>m</sub> .
Pr	Probabilidad de remoción de una partícula.
PZ	Potencial Z de la partícula.
q	Masa de materia retenida por unidad de volumen del lecho.
Q	Caudal instantáneo.
r	Distancia entre partículas y grano.
r <sub>máx</sub>	Tasa de recuperación máxima.
R	Resistencia del medio.
R	Coefficiente de Darcy.
RT	Relación del tamaño partícula-medio.
R <sub>m</sub>	Resistencia de la membrana.
R <sub>c</sub>	Número de Reynolds.
S	Superficie de filtración considerada.
SS	Sólidos suspendidos.

**TE** Talla efectiva.  
**TE** Tamaño efectivo.  
**UTN** Unidades técnicas de nefelometría.  
**v** Velocidad de filtración calculada sobre una superficie perpendicular al flujo.  
**V<sub>c</sub>** Volumen del lecho expandido.  
**V<sub>m</sub>** Volumen de muestra.  
**V<sub>v</sub>** Volumen de espacios vacíos.  
**V<sub>s</sub>** Volumen seco.  
**W<sub>s</sub>** Volumen medido.

## **OBJETIVO.**

**El objetivo de esta investigación consistió en encontrar los parámetros básicos de diseño para un sistema de filtración de un efluente primario avanzado empleando como criterio de eficiencia, la remoción de huevos de Helmintos.**

## **METAS.**

- \* Comparar diversos tamaños efectivos (TE) de arena.
- \* Determinar la duración de carrera en función del TE y la tasa de filtración.
- \* Evaluar la eficiencia en cuanto a la remoción de los huevos de Helmintos.
- \* Analizar la remoción de nutrientes en el medio filtrante.
- \* Evaluar el consumo de agua para el lavado.

## **RESUMEN.**

En este estudio se demuestra la factibilidad de emplear a la filtración rápida como complemento de un tratamiento primario avanzado, para remover fundamentalmente, los huevos de Helmintos de las aguas residuales del Valle de México.

Partiendo de la efectividad que presentó el Tratamiento Primario Avanzado (TPA), como la opción más viable para tratar las aguas residuales del Valle de México (Jiménez *et al.*, 1995); se encontró que la filtración rápida con arena, es el complemento idóneo para que el TPA cumpla con los requerimientos de las NOM-032 y 033 que establece la calidad del agua para su reúso en riego.

Se construyeron y operaron tres filtros de 20 cm de diámetro y 3.0 m de altura, empacados con una cama de arena de 1.0 m de espesor y TE: 0.6, 0.8 y 1.2 mm, con un CU de 1.6 cada uno. En dichos filtros, se efectuaron más de 50 corridas empleando cuatro diferentes velocidades de operación: 7, 10, 12 y 15 m/h. Con lo anterior, se generó la información básica el diseño de la filtración de un Tratamiento Primario Avanzado.

En todos los parámetros analizados (carrera de filtración, remoción de huevos de Helmintos, sólidos suspendidos) el filtro de TE 1.2 mm presentó los mejores resultados de operación; encontrándose a la salida, 0.1 HH/L, valor que cumple ampliamente con la NOM-033 para riego agrícola (de 1 HH/L). En cuanto a sólidos suspendidos en el efluente filtrado fueron en promedio de 39 mg/L y la velocidad de filtración recomendable de 10 m/h; con una duración promedio de 33 h. Un nuevo sistema de retrolavado fue estudiado, el cual consistió en el empleo de un ciclo formado por tres etapas distintas de velocidad: alta (75-80 m/h), baja (45-55 m/h) y alta (75-80 m/h). Con este sistema se consiguió emplear sólo un 2.3% del total del agua filtrada y remover eficientemente los sólidos retenidos.

Con los resultados anteriormente señalados, se está en posibilidades de plantear criterios de diseño inexistente para el tratamiento de un efluente primario avanzado.

## INTRODUCCIÓN.

El Valle de México (1995) cuenta con 21 millones de habitantes ubicados en 1 320 km<sup>2</sup> y se produce en promedio 40 m<sup>3</sup>/s de agua residual. Desde el siglo pasado esta agua se comenzó a enviar al Valle del Mezquital, con el propósito de aliviar las inundaciones.

Las características que presentan las aguas que llegan al Valle del Mezquital, son las siguientes: DBO de 52 a 460 mg/L, Coliformes Fecales del orden de  $1.3 \times 10^5$  a  $2.8 \times 10^{13}$  NMP/100 mL, Nitrógeno Amoniacal de 2.9 a 23 mg/L, Nitratos de 0.3 a 12.4 mg/L y Nitritos de 0.1 a 1.8 mg/L (Jiménez *et al.*, 1995). Actualmente, es indudable que el uso de estas aguas residuales trae consigo una serie de alteraciones en la calidad de vida de la población. Por otro lado, en el Mezquital, los suelos son nutritivamente pobres, por lo que la aportación de la materia orgánica, el nitrógeno y el fósforo por medio del agua de desecho ha resultado benéfica para la producción agrícola. En efecto, el propio empleo de esta agua ha permitido desarrollar la actividad agrícola; pero, además, sus componentes han favorecido el aumento en la productividad del maíz al 150%, cebada del 100%, tomate del 94%, avena para forraje del 83% y alfalfa del 71%, entre otros. El empleo del agua residual en la zona aporta según cálculos, nutrientes del orden de 81 kg./ha-año de fósforo y 195 kg./ha-año como nitrógeno (CNA, 1993).

A simple vista, podría parecer conveniente el no tratar el agua; pero, de acuerdo con estudios efectuados por el Instituto Nacional de Salud Pública la incidencia de enfermedades (generadas principalmente por *Ascaris lumbricoides*, *Giardia lamblia* y *Entamoeba histolytica*) en la zona es 13 veces mayor para los niños que para las zonas donde se emplea agua tratada en riego (Cifuentes *et al.*, 1992). Puesto que se ha demostrado que la transmisión se realiza por el contenido microbiológico del agua residual, bastaría con controlar este parámetro para obtener el mismo beneficio eliminando sus consecuencias. De ahí el interés y la introducción en la NOM-CCA-033-ECOL/1993 de la restricción de 1 Huevo de Helminto viable/L que se relaciona con el tipo de enfermedades gastrointestinales típicas en nuestro país.

Por otra parte, la literatura señala que el tamaño de los Huevos de Helmintos oscila entre 20 y 80 µm y la densidad va desde 1.056 a 1.238, por lo que los procesos convencionales para su remoción son: sedimentación, coagulación y filtración; la desecación es el único proceso que los destruye, pero su aplicación práctica es limitada (Sotomayor *et al.*, 1995).

Ante esta situación, es necesario que las aguas que llegan al Distrito de Riego 03 sean sometidas a un proceso de tratamiento para disminuir el índice de mortandad y de morbilidad por las enfermedades gastrointestinales que se presenta; pero de igual manera es importante no perder, en su totalidad el aporte nutricional que dichas aguas generan en este sitio.

**El objetivo principal de una planta de tratamiento de agua residual es reducir los riesgos sanitarios y evitar la contaminación de las aguas. Cuando el efluente de agua residual regenerada procedente de una planta se utiliza para regar, es necesario tener en cuenta también los posibles riesgos que pueden existir para los trabajadores agrícolas, los animales y los consumidores en general. Aunque la utilización de agua residual para regar constituye una forma eficaz de tratamiento, similar al tratamiento de baja carga en el terreno, el agua residual bruta debe ser sometida a un cierto grado de tratamiento antes de poder utilizarla para riego agrícola.**

**La filtración es un proceso que proporciona un efluente de calidad constante, independientemente de las variaciones del influente (WPCF, 1972).**

**El objetivo principal de una planta de tratamiento de agua residual es reducir los riesgos sanitarios y evitar la contaminación de las aguas. Cuando el efluente de agua residual regenerada procedente de una planta se utiliza para regar, es necesario tener en cuenta también los posibles riesgos que pueden existir para los trabajadores agrícolas, los animales y los consumidores en general. Aunque la utilización de agua residual para regar constituye una forma eficaz de tratamiento, similar al tratamiento de baja carga en el terreno, el agua residual bruta debe ser sometida a un cierto grado de tratamiento antes de poder utilizarla para riego agrícola.**

**La filtración es un proceso que proporciona un efluente de calidad constante, independientemente de las variaciones del influente (WPCF, 1972).**

# Capitulo 1

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

### 1.1 Filtración.

La filtración del agua es un proceso físico-químico que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de un material poroso. La filtración consiste en hacer pasar una mezcla sólido-líquido a través de un medio poroso (filtro) que retiene los sólidos y deja pasar los líquidos (Arboleda, 1973).

El paso de un líquido a través de un medio poroso se describe con la ley de Darcy (Weber, 1972). Esta ley indica que la pérdida de carga  $\Delta p$  es proporcional a la velocidad de filtración  $v$  (relación del caudal instantáneo  $Q$  con la superficie en un plano perpendicular a la filtración) siendo el coeficiente de proporcionalidad  $k$  función de la viscosidad dinámica,  $\eta$ , y de la resistencia del medio  $R$ .

$$V = \frac{\Delta p}{\eta R} = K \Delta p \quad (1)$$

$R$  depende de las características de cada filtro y del agua por tratar.

Entre otros, la filtración (Metcalf & Eddy, 1991):

- Disminuye la carga de sólidos y material coloidal en el agua.
- Remueve partículas y materia coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, materia orgánica (medida como DBO y DQO), metales pesados, asbestos, bacterias y virus.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes.
- Asegura la operación continua de la planta y una calidad del efluente constante.

#### 1.1.1 Filtración a Profundidad.

Se distinguen tres tipos principales de filtración de acuerdo con la forma en que se retienen los sólidos: superficial, a través de un soporte grueso y en profundidad.

Para determinar la naturaleza de la filtración, se considera el criterio adimensional siguiente (Jiménez, 1995):

$$\varepsilon = \frac{18 \Delta P}{Rm d^2 (s-e)} \quad (2)$$

donde

$\Delta P$ : pérdida de carga a través de la placa de resistencia  $R_m$ .  
 $d$ : diámetro de las partículas a retener

Naturaleza de la filtración:

- $\epsilon < 100$  sobre membrana
- $\epsilon > 1000$  en profundidad
- $100 < \epsilon < 1000$  sobre membrana y en profundidad

La filtración a profundidad se emplea comúnmente para el tratamiento de agua, tanto para potabilizar como en depurar. La retención de sólidos se realiza en todo el cuerpo del filtro el cual se compone de material granular. Estos filtros permiten mayores duraciones de corrida. Durante la filtración a profundidad, el agua llena los poros del filtro y tanto la desestabilización de la partícula como su transporte y retención tienen lugar en la cama filtrante. Por ello, el empleo de coagulantes es de gran ayuda durante este proceso. Los filtros se clasifican de diversas formas como lo muestra la Fig. 1

#### 1.1.2 Modelos matemáticos

Prácticamente todos los modelos parten de la ecuación siguiente (Jiménez, 1995):

Ecuación de Iwasaki

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \quad (3)$$

donde

$C$ : concentración de sólidos suspendidos.  
 $L$ : profundidad del filtro medida desde el inicio.  
 $\lambda$ : coeficiente de filtración.

La cual expresa el cambio de concentración de sólidos a lo largo de un filtro en función de una concentración instantánea de sólidos,  $C$ .

##### 1.1.2.1 Balance de materia

Sea un elemento de capa filtrante de longitud  $dl$  y de sección  $S$ , siendo  $C$  la concentración a la entrada y  $C + dC$  la concentración a la salida; sea  $q$  la masa de materia retenida por unidad de volumen del lecho. El balance de materia se expresa por la ecuación siguiente:

Fuerza mótriz	Por gravedad. A presión.
Velocidad de filtración.	Lentos. Rápidos
Tipo de proceso	Convencional Directo.
Dirección de flujo.	Ascendentes. Descendentes. Biflujo. Horizontales.
Medio filtrante	Simples o únicos. Dual. Combinado o múltiple.
Situación en un sistema de tratamiento.	Primario. Secundario. Terciario

**Fig. 1 Clasificación de los filtros a profundidad (Fuente: Jiménez, 1995).**

$$SV \, dt \, C = SV \, dt \, (C + dC) + Sdl \, dq \tag{4}$$

que, equivale a

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{l}{V}\right) \left(\frac{dq}{dt}\right) \tag{5}$$

Utilizando las ecuaciones (3) y (5) se puede determinar el atascamiento de un filtro y la concentración de materias en suspensión del agua filtrada.

Este modelo, al igual que todos, requiere apoyo experimental por el hecho de que los coeficientes  $F$  y  $k$  son función del atascamiento.

### 1.1.2.2 Atascamiento de un filtro.

El coeficiente de filtración  $F$  varía entre un valor inicial  $F_0$  y  $0$ . Entre estos dos puntos, se supone una variación lineal siendo,  $q$  el atascamiento de la materia filtrante (masa de sedimento por volumen unitario del lecho  $S$ ).

Al integrar y combinar las fórmulas (3) y (5), se obtiene

$$\frac{q}{q_1} = \frac{(1 - e^{-At})}{1 + e^{-At}(e^{F_0 t} - 1)} \quad (6)$$

con

$$A = \frac{F_0 V C_0}{q_1} \quad (7)$$

### 1.1.2.3 Calidad del agua filtrada.

Si  $L$  es la altura de la capa filtrante, se tiene que

$$C_L = \frac{C_0}{1 + e^{-At}(e^{F_0 t} - 1)} \quad (8)$$

Cuando se desea que el agua filtrada tenga una concentración igual o inferior a un valor determinado  $C_{L,1}$ , se puede calcular el valor de  $t$  a partir de la ecuación anterior, siendo conocidos los restantes factores.

### 1.1.2.4 Pérdida de carga.

La variación de  $R$ , coeficiente de Darcy, es por hipótesis, de la forma:

$$R = \left[ \frac{1 + (a-1) \left( \frac{q}{q_1} \right)}{1 - \frac{q}{q_1}} \right] \quad (9)$$

Al integrar la ecuación de Darcy, se obtiene:

$$P = K_0 V \left[ 1 + \frac{a(e^{At} - 1)}{Fo} (1 - e^{-F_0 t}) \right] \quad (10)$$

que se descompone en dos términos

$K_0 V$  que corresponde a un flujo clásico en medio poroso y sin atascar y, el otro, que corresponde al atascamiento de la capa filtrante (Fig. 2 y 3).

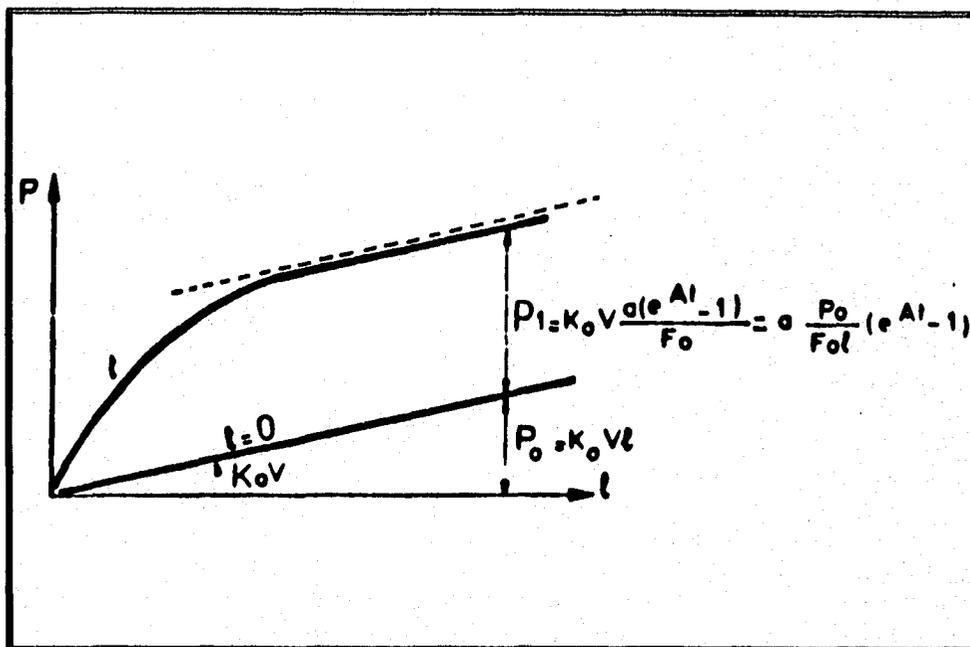
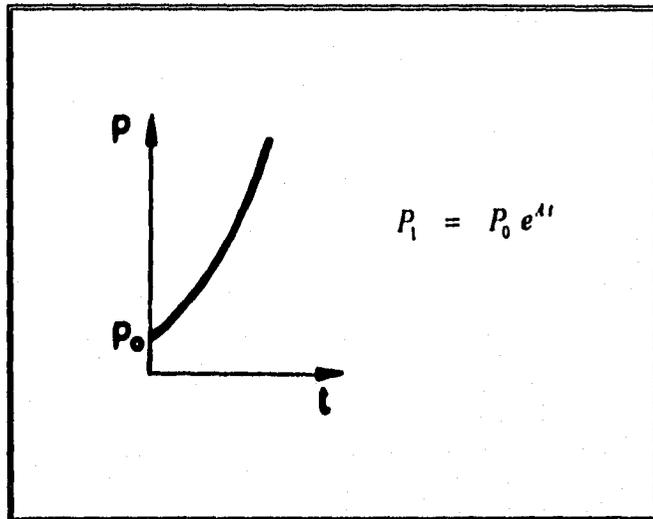


Fig. 2 Comportamiento de un flujo en medio poroso sin atascar.

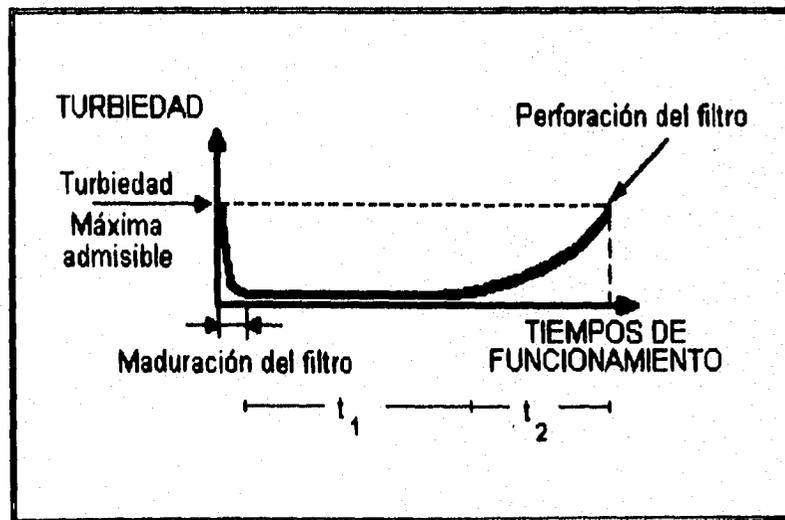
Utilizando la ecuación (10) pueden estudiarse las curvas de atascamiento y de pérdida de carga. Igualmente, puede calcularse el tiempo  $t$  necesario para alcanzar el valor máximo de  $\Delta p$  (pérdida de carga máxima o  $\Delta p$  máx.).

La Fig. 4 muestra la calidad del agua filtrada a lo largo del ciclo de filtración. La turbiedad comienza por decrecer (periodo denominado de "maduración" del filtro) y, seguidamente, permanece estable durante un cierto tiempo, antes de aumentar (periodo de "perforación" del filtro). El tiempo  $t_1$ , durante el cual se obtiene un agua de calidad

deseada, y el tiempo  $t_2$ , que corresponde al necesario para alcanzar la pérdida de carga máxima admisible por construcción, varían extraordinariamente.



**Fig. 3 Comportamiento de un flujo en medio poroso con atascamiento superficial.**



**Fig. 4 Calidad del agua filtrada a lo largo del ciclo de filtración**  
(Fuente: Metcalf & Eddy, 1991).

Los factores que influyen sobre  $t_1$  y  $t_2$  son:

- La calidad y la cantidad de materias en suspensión contenidas en el agua por tratar, que se caracterizan respectivamente por el coeficiente de cohesión  $K$  del fango y su volumen "V" depositado después de 24 horas de sedimentación.

- La granulometría del material filtrante, definida por su tamaño efectivo, TE en mm.
- La velocidad de filtración,  $v = Q/A$  en m/h
- La altura  $L$  de la capa filtrante, en m.
- Las variaciones de pérdidas de carga expresadas en m de columna de agua (mca).

Por definición, el filtro ideal será aquél para el cual el tiempo  $t_1$  sea igual al tiempo  $t_2$ . En realidad, se adopta un margen de seguridad en funcionamiento, con  $t_1 > t_2$ .

### 1.1.3 Mecanismos de la filtración.

De acuerdo con Arboleda (1973) y Tchobanoglous (1970) los mecanismos de remoción se clasifican en dos grupos: predominantemente físicos ó predominantemente químicos según el tipo de factores que involucren. En la Tabla 1 se presentan los principales mecanismos identificados en la literatura.

**Tabla 1. Mecanismos de remoción (Fuente: Jiménez, 1995).**

1. Cribado*
a) mecánico
b) por contacto aleatorio
2. Sedimentación*
3. Impacto inercial*
4. Intercepción*
5. Adsorción química
a) enlace
b) interacción química
6. Adsorción física
7. Adhesión*
8. Floculación
9. Crecimiento biológico

\*Usualmente identificados como mecanismos de remoción

Los cuatro primeros mecanismos son del tipo físico y están básicamente afectados por parámetros como tamaño del grano, porosidad, velocidad de filtración, densidad y tamaño de la partícula suspendida, temperatura del fluido y espesor del medio filtrante.

Los mecanismos restantes (5 al 9) se relacionan con las características químicas de la superficie tanto de la materia en suspensión como del medio filtrante. En este caso los factores importantes son: carga electrostática de la partícula, composición química y por último, presencia de coagulantes, cuando existe un pretratamiento.

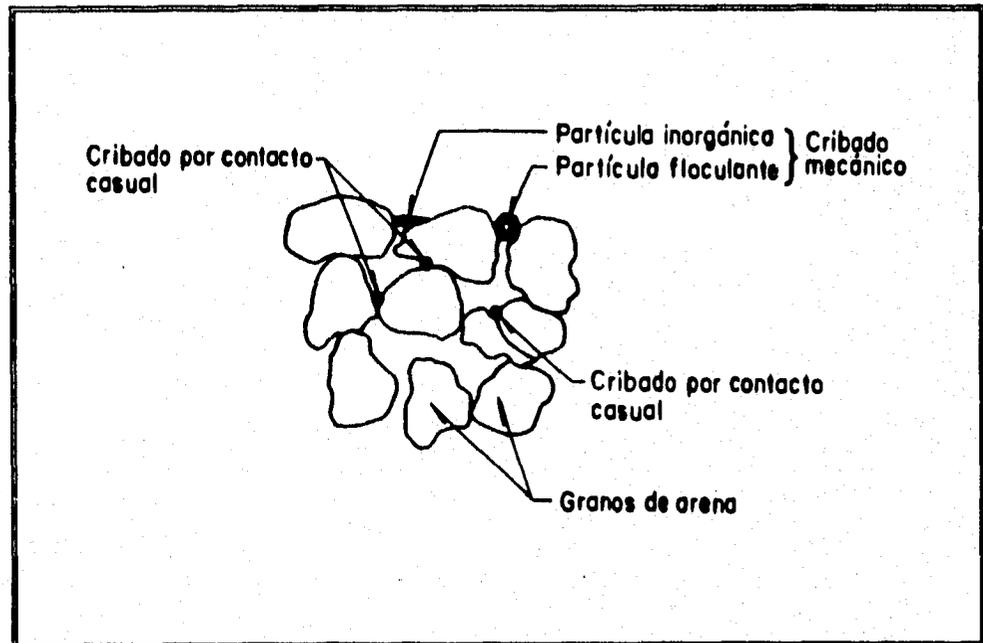
El predominio del tipo de mecanismos responsables de la remoción de una materia específica varía en cada sistema. Con excepción de la coagulación-floculación y el crecimiento biológico, que no se refieren estrictamente a mecanismos de remoción sino a

procesos que se pueden presentar en el filtro, los restantes se relacionan con las características químicas de la materia suspendida y de las partículas del medio filtrante.

La floculación favorece el incremento del diámetro de las partículas suspendidas, lo que permite la acción de uno o más mecanismos de remoción, mientras que, el crecimiento biológico reduce la porosidad del medio filtrante y oxida algunos compuestos orgánicos lo que provoca su remoción.

### 1.1.3.1 Cribado

Para este mecanismo existen dos formas de retención de partículas: mecánica y por contacto casual. Son cribadas mecánicamente las partículas más grandes en los poros del medio filtrante. Mientras que las más pequeñas son atrapadas dentro del medio por contacto casual (Fig. 5).



**Fig. 5. Remoción por cribado (Fuente: Arboleda, 1973).**

Basado en consideraciones geométricas, Hall (citado por Arboleda, 1973) considera que la probabilidad de remoción de una partícula por cribado ( $P_r$ ) es directamente proporcional a su diámetro ( $d$ ) e inversamente proporcional al diámetro del grano del medio filtrante ( $D$ ) elevado a la 3/2. Esto es:

$$P_r \cong \left( \frac{d}{D} \right)^{3/2} \quad (11)$$

donde

$d_p$  : diámetro de partículas

$D$  : diámetro de grano del medio.

#### 1.1.3.2 Sedimentación

Hazen en 1904 (citado por Arboleda, 1973), consideró que la remoción de las partículas en un filtro es un fenómeno debido a la sedimentación. De tal modo que si se sumara el área total de todos los granos que hay en  $1 \text{ m}^3$  de arena  $0.5 \text{ mm}$  de diámetro con  $40\%$  de espacios vacíos se tendría un área de  $7\,200 \text{ m}^2$  de los cuales sólo el  $5.6\%$  sería aprovechable, es decir,  $400 \text{ m}^2$  de superficie.

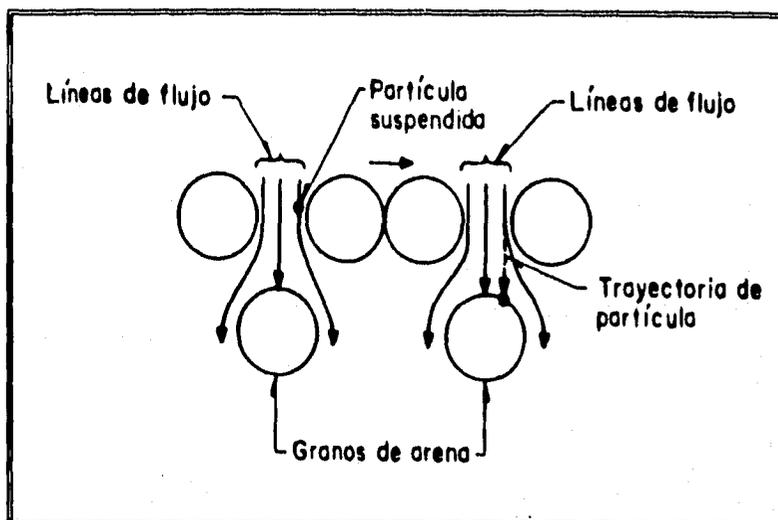
La sedimentación sólo puede producirse con material suspendido relativamente grande y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta en zonas del medio donde la carga hidráulica sea baja (Fig. 6).

#### 1.1.3.3 Intercepción

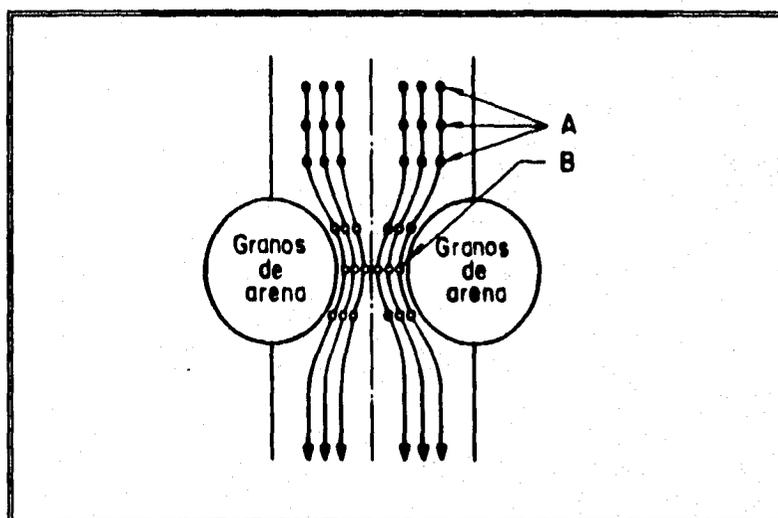
Camp y Stein (citado por Arboleda, 1973) llegaron a la conclusión de que la remoción del floculo dentro del medio es llevada a cabo por contacto de los floculos con la superficie de los granos o con floculos ya depositados. La Fig. 7 esquematiza esta idea. Si se supone que las partículas (A) viajan con las líneas de flujo lo cual es cierto a bajas velocidades resulta que al producirse el estrechamiento de dichas líneas en la contracción (B), éstas se ven forzadas a ponerse en contacto entre si y con el medio filtrante, quedando interceptadas.

#### 1.1.3.4 Impacto inercial

Cuando la velocidad del flujo es alta y la partícula es grande debe tenerse en cuenta los efectos de la inercia, los cuales hacen que la partícula siga una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo en los cambios de dirección. Esto implica que al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo las partículas continuara su trayectoria original impulsadas por la fuerza de inercia, chocan con el grano del medio filtrante y quedan adheridas a él. Las líneas de flujo mientras se deslizan alrededor del grano (Fig. 8) (Arboleda, 1973).



**Fig. 6 Eliminación por sedimentación de partículas (Fuente: Arboleda, 1973 ).**

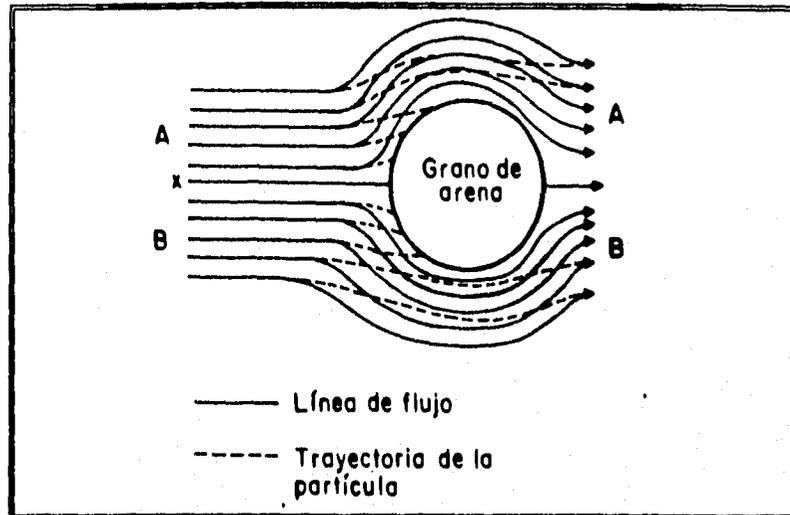


**Fig. 7 Eliminación de partículas por intercepción (Fuente: Arboleda, 1973).**

En el caso de la filtración de suspensiones líquidas, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento como para que el mecanismo de remoción por impacto inercial sea significativo.

#### 1.1.3.6 Fuerzas de Van der Waals

V. Mackrle y S. Mackrle (citados por Arboleda, 1973) sugirieron que las fuerzas de Van der Waals son las responsables de la adhesión de las partículas a los granos del medio filtrante. De tal forma que existe un volumen alrededor de cada grano "espacio de adhesión" en el cual las partículas suspendidas que entran dentro de él son removidas del



**Fig. 8 Eliminación de partículas por impacto inercial**  
(Fuente: Arboleda, 1973).

flujo al quedar adheridas en la superficie de los granos (Fig. 9). La acción es análoga a un sedimentador, en el cual, la fuerza de gravitación es reemplazada por las fuerzas de Van der Waals. Cuando actúan a muy corta distancia y el diámetro de partículas es mucho menor del diámetro de grano las fuerzas de Van der Waals se determinan mediante la fórmula:

$$F_a = \left( \frac{K \cdot dp}{12 r^2} \right) \quad (12)$$

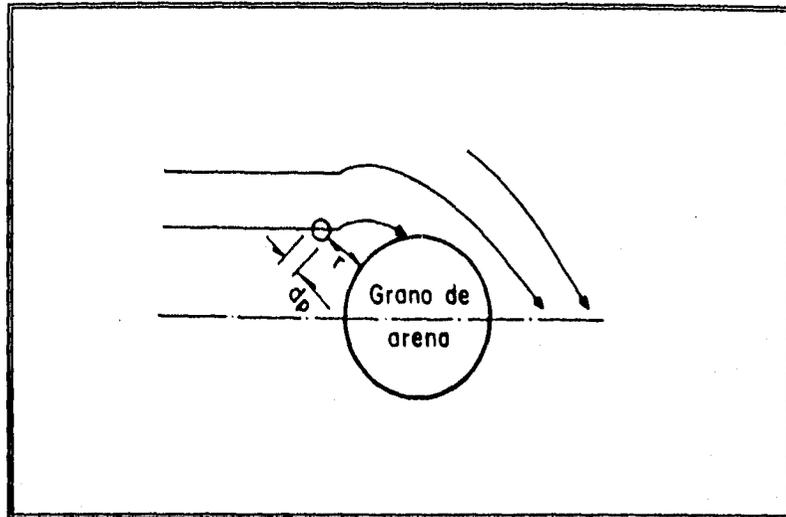
donde:

$K'$  : constante de atracción de Van der Waals

$dp$  : diámetro de la partícula

$r$  : distancia entre partícula y grano

El valor de la constante de Van der Waals se incrementa con la densidad de las partículas, de manera que el floculo más denso se adhiere con mayor fuerza al medio filtrante (Arboleda, 1973).

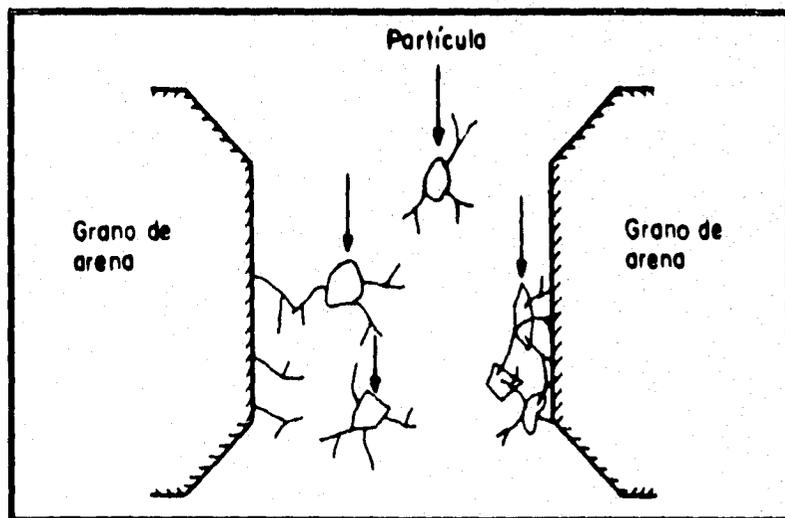


**Fig. 9 Eliminación de partículas por las fuerzas de Van der Waals**  
(Fuente: Arboleda, 1973).

#### 1.1.3.6 Interacción química

En este mecanismo se considera que las cadenas poliméricas adheridas a las partículas en suspensión se encuentran extendidas en el agua y pueden así adherirse a otras partículas ó a sitios vacantes de los granos del medio (Arboleda, 1973).

El uso de ayudantes de filtración inyectados en el influente es de gran utilidad para este caso ya que aumenta la adhesión de las partículas pequeñas al medio filtrante (Fig. 10).



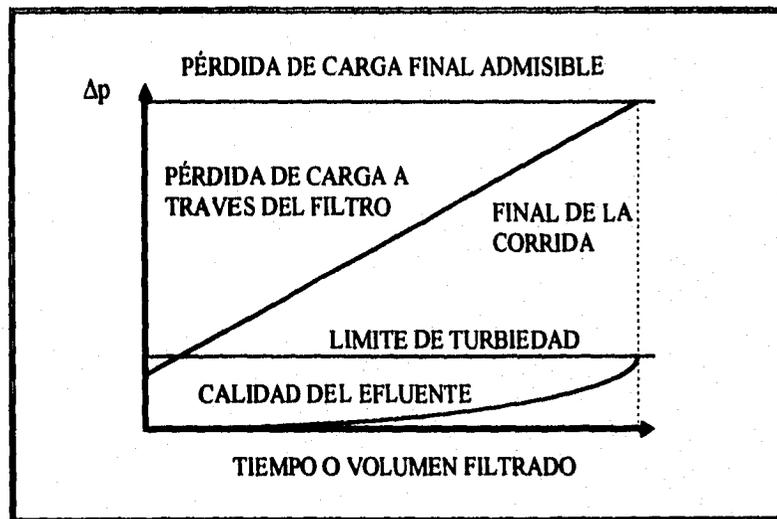
**Fig. 10 Eliminación de partículas por interacción química**  
(Fuente: Arboleda, 1973).

#### 1.1.4 Lavado.

Como proceso unitario, la filtración consta de dos etapas: una de ensuciamiento del medio y otra de limpieza. La primera determina básicamente la calidad del efluente y, la segunda, la cantidad de agua producida. En consecuencia, la eficiencia de un filtro es función de ambas.

El lavado debe hacerse cada vez que la carga en el tanque de alimentación sea igual a la presión estática sobre el lecho más la pérdida de carga en un filtro por gravedad, o bien, cuando se llegue al  $\Delta p$  de bombeo establecido. En ambos casos es también limitante la disminución en la calidad del filtrado (breakthrough).

De acuerdo con Gregory (1972) este término describe el cambio de posición de flocúlos en el lecho y ocurre a la tasa normal de filtración. Se debe a que la deposición de los sólidos en los poros superiores ha sido completada y comienzan a llenarse los inferiores. Lo ideal es que la  $\Delta p$  máxima permisible y la perforación del filtro se den al mismo tiempo (Fig. 11). Sin embargo, por cuestiones de seguridad los filtros se diseñan y operan de forma que la  $\Delta p$  máx se alcance antes de la perforación.



**Fig. 11** Esquema para definir la duración de la corrida en términos de la pérdida de carga y la calidad del efluente (Fuente: Melcalt & Eddy, 1991).

La limpieza de un filtro se puede efectuar de dos formas. La primera consiste en remover la capa superior del filtro en forma manual. Este método se emplea únicamente para filtros lentos donde las partículas no penetran al fondo del empaque. La segunda, consiste en aplicar agua en sentido ascendente. Por costumbre y tomando en cuenta la operación de los filtros con flujo descendente, se denomina como retrolavado aún cuando el término no sea muy adecuado. El lavado de un filtro debe remover los flocúlos superficiales y

también los encontrados a todo lo largo del lecho ya que en la filtración de alta tasa existe una mejor repartición de los sólidos (Gregory, 1972 y Cleasby y Arboleda, 1977).

El lavado consta de dos etapas (Arboleda y Cleasby, 1979 y Toregas, 1983) :

- a) Separación de los sólidos del medio filtrante, de otros flóculos o de ambos.
- b) Transporte de los sólidos hacia la canaleta de lavado.

Cuando se emplea sólo agua para el lavado, ésta debe realizar las dos funciones y, si se combina con aire, el agua se emplea únicamente como transporte.

Las velocidades de aire y agua empleadas, así como sus combinaciones y el tipo de sistema de distribución seleccionado, deben producir, además de un lavado apropiado, los requerimientos de reacomodo del lecho, ya sea que se segregue o mezcle durante la limpieza del lecho (Gregory 1972).

#### 1.1.4.1 Los mecanismos de adhesión y el lavado

Toregas (1983) desarrolló un trabajo en el cual relaciona los diferentes mecanismos de retención que intervienen en la filtración profunda con el comportamiento de un filtro durante el lavado. En primer lugar señala que estos mecanismos son reversibles ya que permiten la regeneración del medio filtrante.

Una vez efectuada la retención, las partículas están sujetas a dos tipos de fuerzas. La primera es de adhesión (*FA*) y es la resultante de las fuerzas de largo alcance como la gravitacional (adhesión entre la partícula y la fase estacionaria). La segunda, se debe a factores hidrodinámicos que corresponden al esfuerzo cortante hidrodinámico promedio (*FD*) y que actúa en la interfaz de las fases móvil y estacionaria. La magnitud de estas fuerzas depende de varios factores como son el tamaño y la densidad de la suspensión, carga eléctrica de las especies (valencias químicas), concentración de iones en la fase móvil, constante dieléctrica del líquido y propiedades químicas de la superficie del empaque y de la suspensión. En general, sólo una fracción de las partículas que entran en colisión con el empaque son retenidas y adheridas a éste, ya que el flujo principal tiende a separarlas del medio.

Toregas distingue tres mecanismos de retención: el cribado, la adhesión flóculo-medio y la adhesión flóculo-flóculo. Las partículas o flóculos atrapados en forma mecánica salen antes que las partículas adheridas por los otros mecanismos debido a que no intervienen las fuerzas de adhesión y, los sólidos adheridos a otros sólidos salen antes que los adheridos al empaque.

Los índices de recuperación para cada una de estas condiciones se pueden usar para calcular el porcentaje de contribución de los tres modelos de remoción (cribado, interacciones partícula-partícula e interacciones medio filtrante-partícula).

Experimentalmente, Toregas encontró que para medios con tamaño de 0.93 mm la contribución por cribado es de 4 al 14%, (5% en promedio) , para tamaños entre 0.64 y 0.35 mm, de 4 a 28% (12%, promedio) y para menores 35 a 72% (47% promedio), respectivamente. Esto es: a menor tamaño de medio, la remoción por cribado aumenta. Así, puesto que para el medio de 0.35 mm, el cribado es el principal mecanismo de remoción, su lavado es más fácil. La contribución de la remoción por interacción sólido-medio resultó prácticamente constante, para todas las condiciones estudiadas e igual a 35%. La remoción por la interacción floculo-floculo es importante en la medida que la remoción no se efectúe por cribado. De tal forma que puede llegar a tener un valor, hasta del 65% (cuando no hay cribado), o ser sólo de 20%. Sin embargo, para que la eficiencia de filtración sea buena, se debe favorecer la interacción floculo-floculo para promover la remoción en profundidad aún cuando el lavado se complique.

Además, Toregas concluyó que las partículas recuperadas con expansiones de 10% son las eliminadas por cribado. La diferencia observada entre el comportamiento de los índices de recuperación, valorados hasta el 10% de expansión entre un influente, con o sin coagulante, revelan que las partículas estabilizadas son más difíciles de remover que las no estabilizadas.

En el caso de partículas desestabilizadas con coagulante, la recuperación de los floculos unidos a otros y la de los floculos unidos al empaque ocurre prácticamente al mismo tiempo entre expansiones del 10 al 50%.

#### 1.1.5 Filtración de aguas residuales.

Para esta aplicación debe tenerse en cuenta que la confiabilidad del sistema y la calidad del efluente tratado es más baja que en los sistemas de agua potable y que existe mayor riesgo de formación de aglomerados con la grasa y los microorganismos que se retienen en el medio filtrante ("mud balls"). Esto comúnmente es originado por lavados incompletos que provocan en la práctica el incremento de la pérdida de carga, un decremento de la duración de la corrida y la baja relación filtrado-lavado (Siemak, 1984).

##### 1.1.5.1 Filtración de efluentes primarios.

El problema principal de la filtración de afluentes primarios sedimentados es la alta concentración de sólidos suspendidos (superiores a 200 mg/L) , causa principal del desarrollo de las pérdidas de carga; además la presencia de lama biológica y grasa formadora de aglomerados han favorecido este problema. Pero, el desarrollo de filtros de lechos pulsantes ha permitido que la filtración de afluentes primarios se comience a practicar.

#### 1.2 Tratamiento primario avanzado (TPA).

El tratamiento primario avanzado es utilizado en varias plantas de gran capacidad, particularmente en Estados Unidos como la de Point Loma, San Diego; o la Hyperion en

los Ángeles; así como en Montreal, Canadá; Marsella, Francia; y en plantas de Noruega y Suecia.

Los fundamentos teóricos del proceso primario avanzado tiene que ver con tres aspectos: a) la desestabilización de los sólidos suspendidos, b) la formación de flóculos y c) la eliminación de éstos de la suspensión. Los dos primeros aspectos están relacionados con la teoría de la coagulación-floculación y el tercero con el de la sedimentación.

Es un proceso en el cual se añaden reactivos químicos al agua para eliminar sólidos suspendidos y materia orgánica evaluada como DBO total. Este proceso es muy similar al proceso fisico-químico que tiene más de 100 años de aplicación. En 1930, este proceso se dejó de emplear en favor de los procesos biológicos debido al elevado costo ocasionado por el tratamiento de una gran cantidad de lodos. Actualmente, su aplicación ha retornado con dos fines: la eliminación del fósforo y la obtención de efluentes de calidad media a costos inferiores a los convencionales. El nuevo auge del proceso se debe también al reconocimiento de que el costo de tratamiento debe ser acorde con la eficiencia deseada y a que los avances en la síntesis de polímeros floculadores con altas eficiencias, se ha logrado a un menor costo.

La diferencia entre el proceso fisico-químico y el primario avanzado, es que en el primer caso se tienen remociones de SST y de DBO del orden del 90%, esto como consecuencia de añadir dosis altas de coagulantes. Este tratamiento se considera como un tratamiento secundario. En cambio, el TPA emplea dosis mucho menores a las de fisico-químico, y se apoya de polímeros aniónicos de alto peso molecular para el proceso de floculación; remueve la carga orgánica y DBO, así como los nutrientes en la proporción necesaria para que el agua tratada conserve sus propiedades nutricionales. Además, es útil para incrementar la capacidad de las plantas biológicas; en efecto, el empleo del TPA tiene la ventaja de disminuir el requerimiento de oxígeno y el tamaño del reactor biológico. Para mantener una eficiencia constante con gastos de alta variabilidad, el TPA no tiene comparación con los procesos biológicos: su flexibilidad es muy amplia; entre otras ventajas el tratamiento primario avanzado es capaz de eliminar metales pesados, con eficiencias del orden de 70%.

#### 1.2.1 Opciones del tratamiento primario avanzado.

Existen cuatro configuraciones comunes del tratamiento primario (Fig. 12), (Shao, 1993).

a) Tratamiento primario convencional: consiste básicamente en desarenación y sedimentación primaria. Su eficiencia es del rango del 65% en remoción de sólidos suspendidos y 30% en DBO, para aguas residuales domésticas.

b) Tratamiento primario avanzado: tiene una configuración igual a la anterior, pero se le añaden reactivos; generalmente emplean cloruro férrico con dosis de 10 a 40 mg/L, combinadas con pequeñas cantidades de polímero aniónico. Este proceso remueve entre 80 y 85% de los sólidos suspendidos y 50 a 55% de la DBO.

c). Tratamiento químico primario: en este caso se tiene una unidad de coagulación-floculación antes de la sedimentación. Se emplea ampliamente en Noruega y Suecia, donde el criterio de diseño para la etapa primaria se basa, además en la eliminación de fósforo, en los sólidos suspendidos y la DBO. En este caso, las dosis empleadas son altas (150 mg/L de cloruro férrico con 0.2 mg/L de polielectrolito aniónico), con eficiencias de más del 90% para los sólidos, 75% para la DBO y 95% para el fósforo.

d) Tratamiento químico de dos etapas: este proceso se desarrolló en 1980, y consiste en añadir reactivos en dos etapas. La primera es un tratamiento primario avanzado y la segunda es un proceso de floculación. las dosis y el volumen de los reactores son menores. En la Tabla 2 se muestran los tipos de tratamiento primario avanzado, así como sus respectivas eficiencias de remoción.

**Tabla 2. Tipos de tratamiento primario (Fuente: Shao, 1993).**

PROCESO	CONFIGURACIÓN	% DE SS	% DBO	% P
Primario convencional	DA + SP	65	30	11
Primario Avanzado	(AC)DA + (AP)SP	80-85	50-55	31
Floculación primario	(AC)DA + FL + (AP)SP	> 90	75	95
Floculación de dos etapas	DA + SP +(AC)F +(AP) + SeS	83	52	SD

DA: desarenación.

SP: sedimentación primaria.

AC: adición de coagulante.

AP: adición de polímero.

SeS: sedimentación secundaria.

SD: sin datos.

La Tabla 3 presenta una comparación en cuanto al funcionamiento de un tratamiento primario avanzado empleando cloruro férrico y sulfato de aluminio

**Tabla 3. Condiciones de diseño actualmente recomendadas para el TPA (Fuente: John , 1994 y Riaz-Chaudhay, 1991).**

PARÁMETRO	CLORURO FÉRRICO	SALES DE ALUMINIO
Sólidos en el sobrenadante.	Menor	Mayor.
Flóculos.	Más compacto.	Menos compacto.
Concentración de sólidos en el espesador.	5.5%.	3.4%
Olores en el espesado.	Nulo.	Presente.
Efectos sobre la digestión de lodos.	Mejora.	-
Corrosión.	Controlada por la precipitación del sulfuro.	-

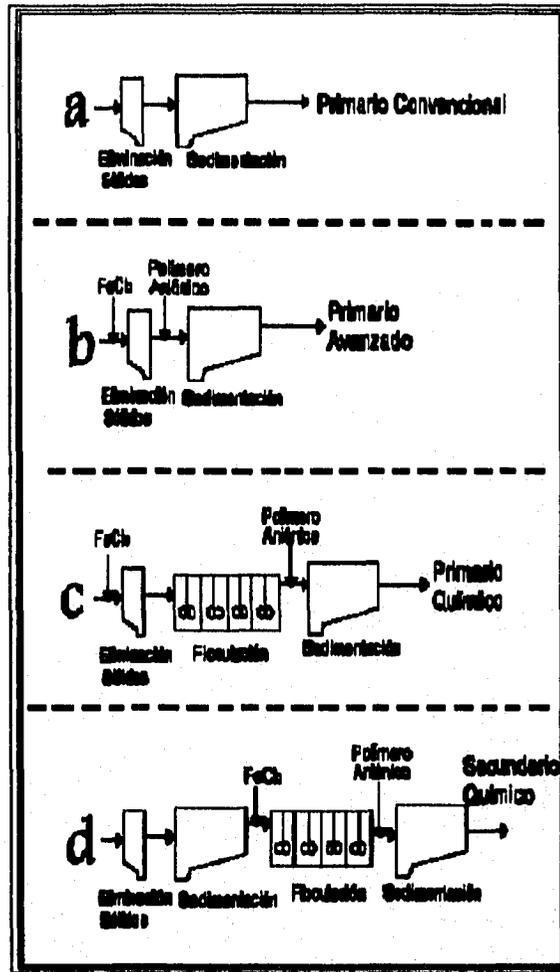


Fig. 12 Configuración del tratamiento primario (Fuente: Shao, 1993).

## **Capitulo 2**

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

### 2.1 Descripción de filtros piloto.

#### 2.1.1 Ubicación.

Para la realización del presente trabajo se hizo uso de instalaciones de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de la "Central Termoeléctrica del Valle de México", localizada en el municipio de Ecatepec de Morelos; Edo. de México. La planta de tratamiento colecta parte de las aguas del Gran Canal a la altura del km. 20, para posteriormente someterlas a un tratamiento a base de lodos activados con una capacidad de 750 lps. El efluente generado por dicho sistema es utilizado para el enfriamiento de las calderas de la Central Termoeléctrica.

En este sitio se construyó por parte de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y del Instituto de Ingeniería (II-UNAM), una planta piloto (Tabla 4) de 70 lps para el desarrollo de un Tratamiento Primario Avanzado (TPA). El proceso de tratamiento está constituido por una cámara de aireación, sistema de mezcla rápida, tres cámaras de floculación y un sedimentador estático. Las Fig. 13, 14 y 15 muestran el diagrama de flujo, dimensionamiento y una imagen de la planta piloto. El efluente de este proceso fue conducido a tres filtros que operaron en paralelo y donde se desarrollaron las pruebas de tratabilidad.

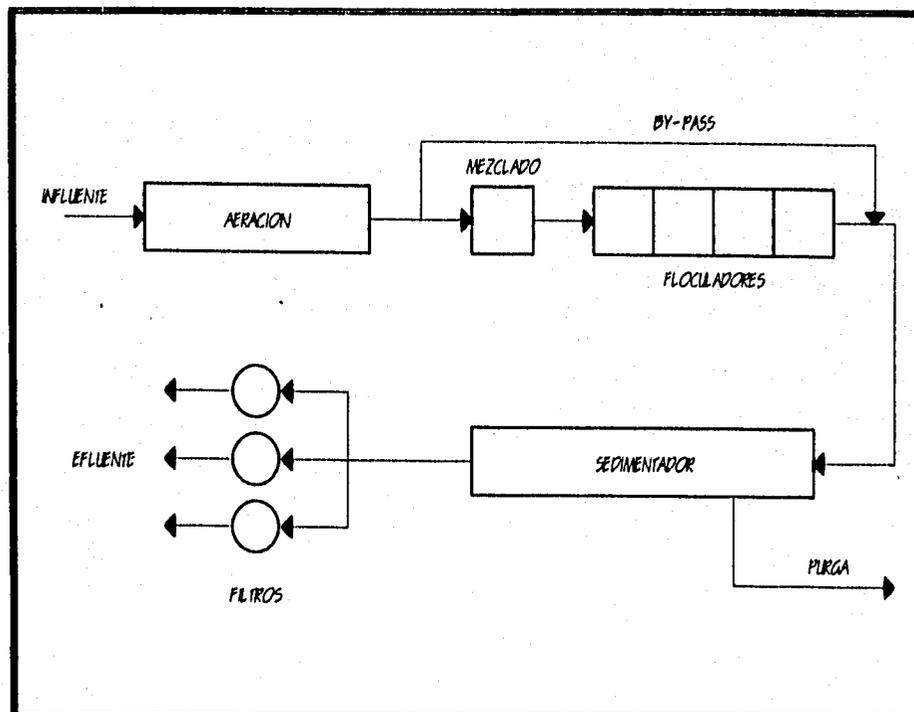
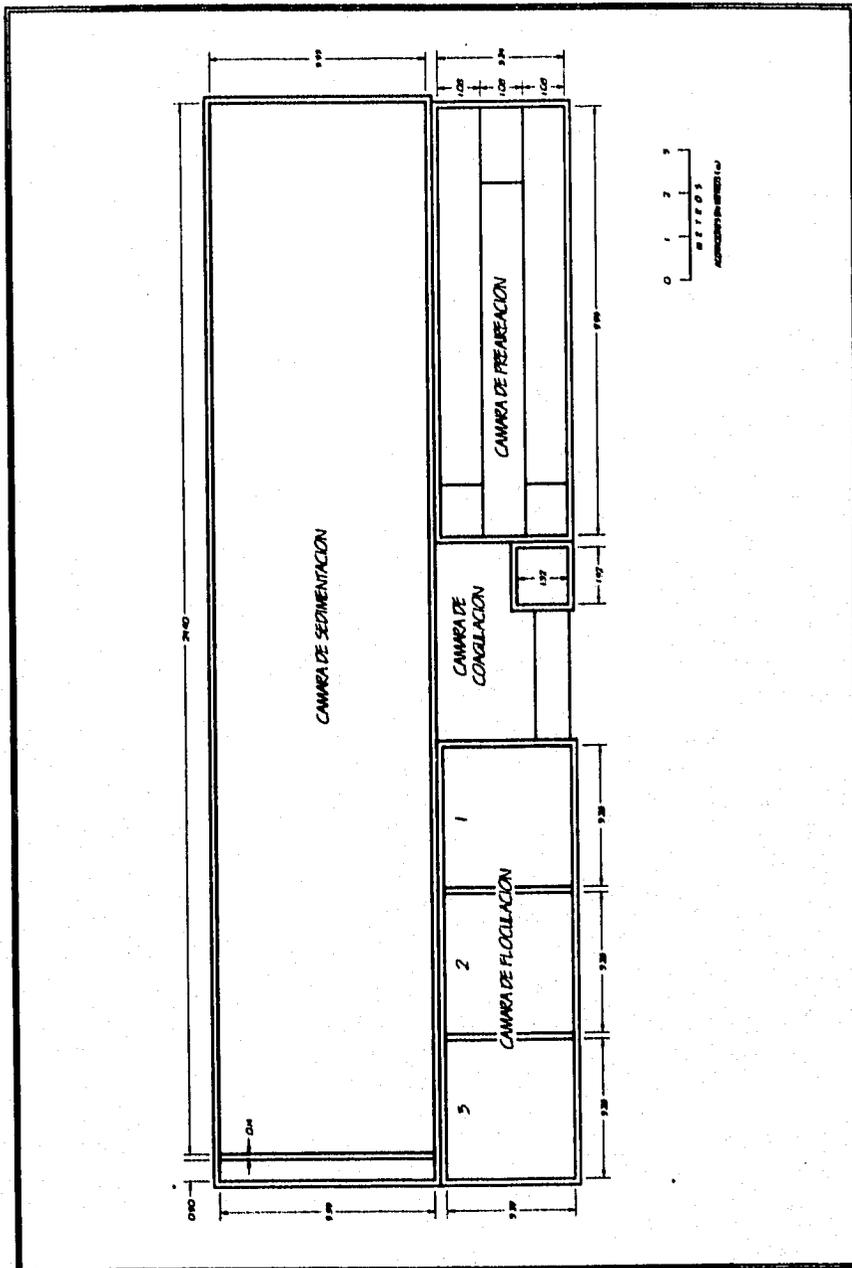
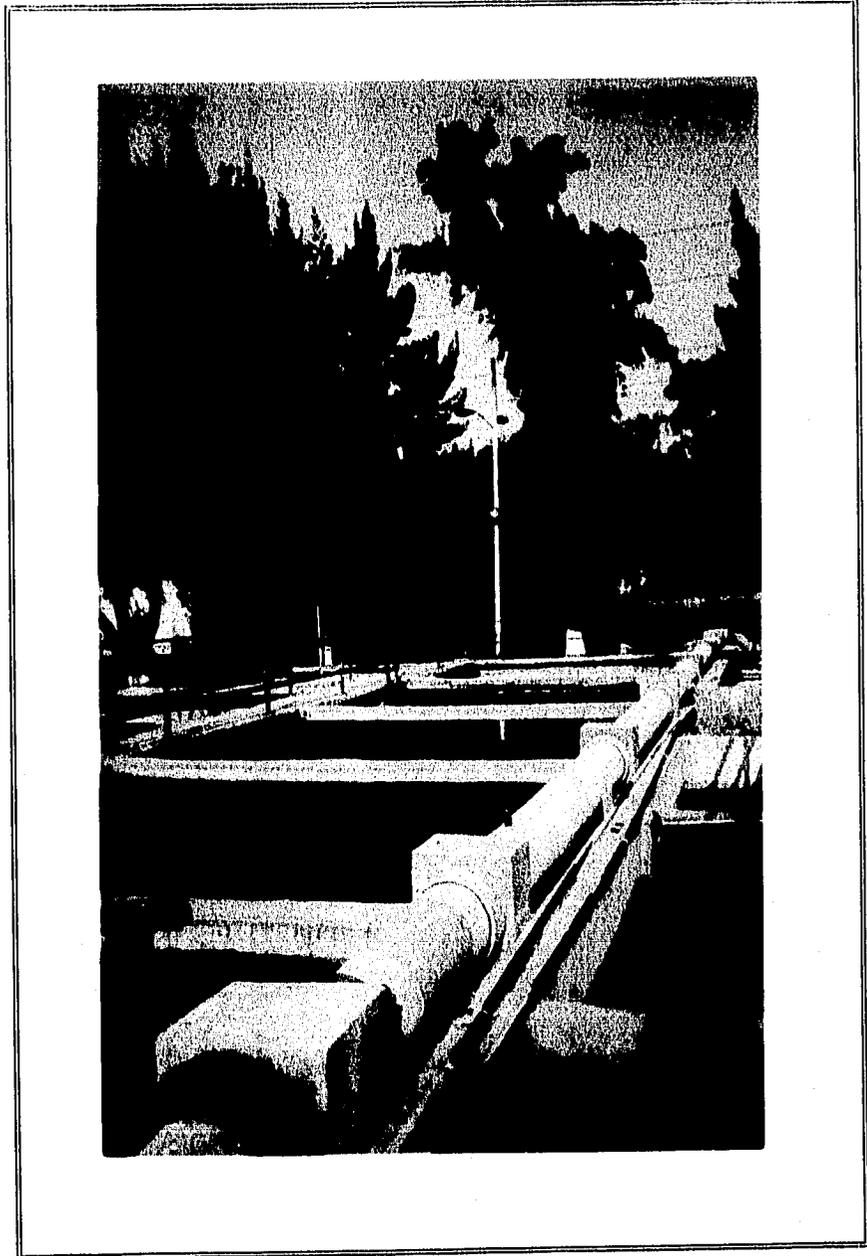


Fig. 13 Diagrama de flujo de la planta piloto.



**Fig. 14 Dimensionamiento de la planta piloto.**



**Fig. 15 Planta piloto.**

**Tabla 4. Parámetros de diseño de la planta piloto.**

UNIDAD	GRADIENTE	TIEMPO DE RETENCIÓN min.	VOLUMEN m <sup>3</sup>
TANQUE DE AIREACIÓN		17.1	66.94
TANQUE DE MEZCLADO		0.65	2.53
CÁMARA DE FLOCULACIÓN	1ª cámara	57 s <sup>-1</sup>	5.83
	2ª cámara	40 s <sup>-1</sup>	5.83
	3ª cámara	15.4 s <sup>-1</sup>	5.83
SEDIMENTADOR		96	374.65

### 2.1.2 Operación de la planta piloto.

Las variables de operación de la planta piloto fueron: concentración, tipo y punto de adición de coagulante y floculante, así como los gradientes de velocidad a lo largo de todo el sistema. La operación de la planta se realizó en dos etapas definidas por el lugar de aplicación del coagulante y floculante; en cada etapa se varió el tipo de coagulante (Cloruro Férrico, Hidróxido de Calcio, Cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio) y el floculante (Nalcomex 7179, 2144, Prosifloc A-252 y Vitro PQ-01). El tiempo de duración promedio del proceso es de 2.2 h.

La primera etapa estuvo caracterizada por el empleo de tres diferentes coagulantes (Tabla 5):

Cloruro Férrico  
Sulfato de Aluminio  
Hidróxido de Calcio

**Tabla 5. Calendario operativo de la planta (1995).**

PERIODO	COAGULANTE		FLOCULANTE		FILTRACIÓN
	Tipo	Dosis (mg/L)	Tipo	Dosis (mg/L)	
1º de Enero al 31 de Enero	FeCl <sub>3</sub>	50	Nalcomex 7179 Nalcomex 2144	0.25; 0.4; 0.8; 0.4; 0.8	
1º de Febrero al 14 de Marzo.	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50, 40	Prosifloc A-252	0.4	
15 de Marzo al 2 de Abril.	Ca(OH) <sub>2</sub>	200; 225; 250	Prosifloc A-252	0.1-0.4	
3 de Abril al 202 de Mayo.	FeCl <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	
	NaClO + FeCl <sub>3</sub>	7 + 50	Prosifloc A-252	0.5	
	FeSO <sub>4</sub> + Cl <sub>2</sub> + FeCl <sub>3</sub>	40 + 7 + 20	Prosifloc A-252	0.5	
	FeSO <sub>4</sub> + Cl <sub>2</sub> + FeCl <sub>3</sub>	50 + 7 + 20	Prosifloc A-252	0.5	
21 de Mayo al 26 de Junio.	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		Vitro A-01		
26 de Junio al 28 de Octubre.	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	40; 45; 50; 55	Prosifloc A-252 Vitro PQ-01	0.25; 0.4; 0.5; 0.6 0.3; 0.35; 0.4; 0.5	Arena sílicea 0.6, 0.8 y 1.2 mm.

El uso de coagulantes combinado con distintos polielectrólitos aniónicos de alto peso molecular en concentraciones que variaron entre 0.1 a 0.8 mg/L.

Durante la segunda etapa de operación de la planta piloto se utilizó únicamente sulfato de aluminio (diferentes dosis), ya que ofreció las mejores ventajas, en combinación con dos polielectrólitos (Vitro PQ-01 y Prosifloc A-252 variando las dosis). La característica fundamental de esta etapa fue la eliminación de las cámaras de mezclado y floculación y el empleo únicamente del sistema de preaireación para la aplicación del coagulante. Los puntos de adición del coagulante fueron varios y el floculante se dosificó en la entrada del tanque de sedimentación a través de un bay-pass. Posteriormente se hizo un cambio para añadir el polielectrólito en el tanque de mezcla rápida sin agitación mecánica.

### 2.1.3 Constituyentes de los filtros.

En general, cada estudio piloto debe ser conducido para un tipo de agua en particular. Los filtros piloto fueron diseñados para brindar la máxima flexibilidad de operación, por lo cual, se tomo como base al modelo físico presentado por Jiménez *et al.*, 1995, al igual que las recomendaciones de Adin *et al.*, 1979 para la construcción de cuando menos tres filtros piloto.

Las principales partes que componen los filtros son:

**Lecho filtrante.** Para cada uno de los tres filtros piloto se empleó arena sílicea proveniente de "Abastecimiento de Fundición y Sílice S.A. de C.V.," ubicada en el km. 22 de la Carretera México-Texcoco; Los Reyes de la Paz, al igual que de "Rancho Alegre S.A. de C.V.," Coatzacoalcos Veracruz. De la revisión bibliográfica se optó por el empleo de arena con TE de 0.6, 0.8 y 1.2 con un CU de 1.6 para los tres filtros. A la arena propuesta, se le aplicaron las siguientes técnicas analíticas: solubilidad en HCl y NaOH, pérdida por ignición, densidad real, densidad aparente y porosidad. En la Tabla 6 se presentan las características del medio filtrante, mientras que el ANEXO A presenta a detalle el cálculo de las determinaciones anteriores.

**Tabla 6. Características del medio filtrante.**

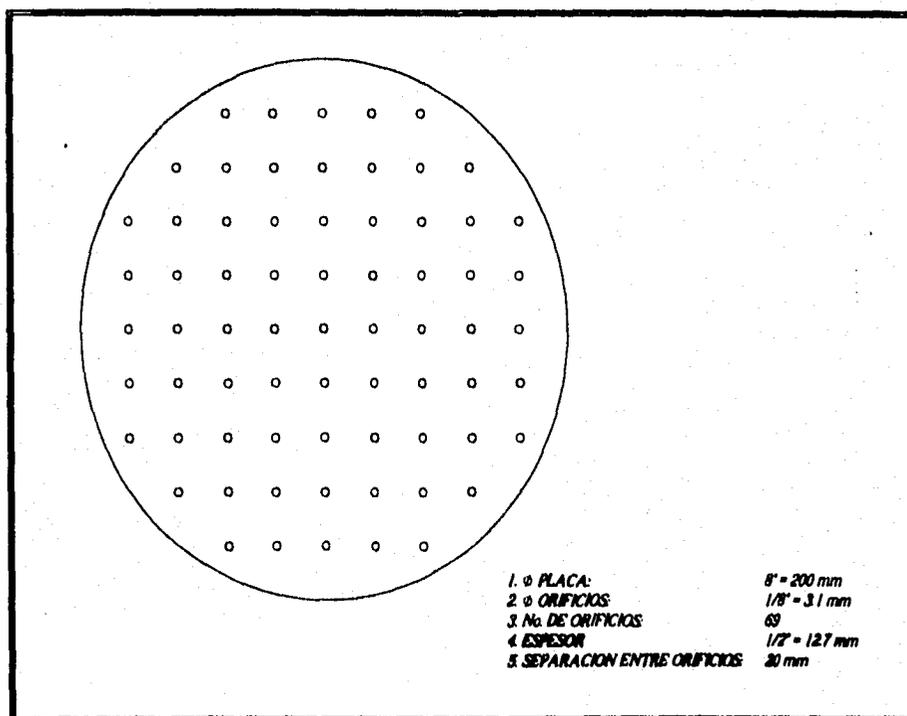
FILTRO	TE mm	CU	SOLUBILIDAD		PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	DENSIDAD REAL	DENSIDAD APARENTE	POROSIDAD
			HCl 30%	NaOH 10%				
1	0.6	1.6	0.5	0.8	0.2	2.572	1.63	0.37
2	0.8	1.6	0.5	0.7	0.3	2.573	1.63	0.36
3	1.2	1.6	0.5	0.7	0.3	2.572	1.63	0.36

**Lecho soporte.**- Sirve de base para que el medio no penetre en los drenes y los obstruya. Aquí se empleó grava colocada de menor a mayor tamaño, tomando como referencia el

punto de contacto en el medio filtrante. La cama de grava de 10 cm de espesor se preparó con 2 kg. de gravilla de  $\frac{1}{2} + \frac{1}{4}$  y 2.5 kg. de gravilla de  $\frac{1}{4} + \frac{1}{8}$ .

*Sistema de distribución o bajo dren.*- El objetivo del bajo dren es repartir uniformemente el flujo al medio filtrante durante la operación de lavado. Dicho sistema estuvo constituido por una placa de acrílico de 20 cm de diámetro y 12.7 mm de espesor; a la cual se le realizaron 69 perforaciones de  $\frac{1}{8}$ " diámetro con una separación de 20 mm tal y como lo muestran las Fig. 16 y 17.

*Sistema de lavado.*- En el detalle del brazo distribuidor de las Fig. 18 y 19 se presenta una "T" de fierro galvanizado de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro con 17 orificios de  $\frac{1}{8}$ " localizados a 0.02 m centro a centro, con la función de distribuir el agua de retrolavado. La canaleta de lavado estuvo constituida por una tubería de PVC de 2 " de diámetro y ubicada a 70 cm por arriba del material filtrante como la indica la Fig. 20.



**Fig. 16 Sistema de distribución.**

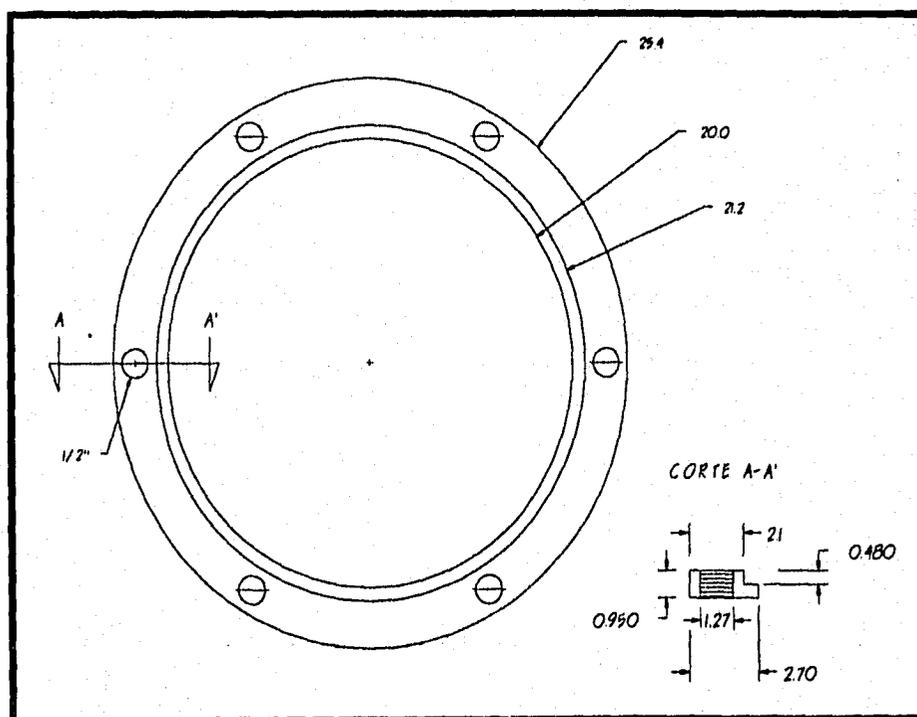
#### 2.1.4 Material de Construcción.

Cada uno de los filtros fueron construidos con una altura de 3.0 m, con material acrílico en combinación con PVC; esto con el fin de poder observar el comportamiento de la cama filtrante durante las etapas de filtración y retrolavado. Dichas columnas filtrantes estuvieron soportadas por una estructura metálica de 0.30 m en su base superior y 0.65 m en la parte inferior (Fig. 21). El diámetro de la columna fue de 0.20 m de acuerdo con las

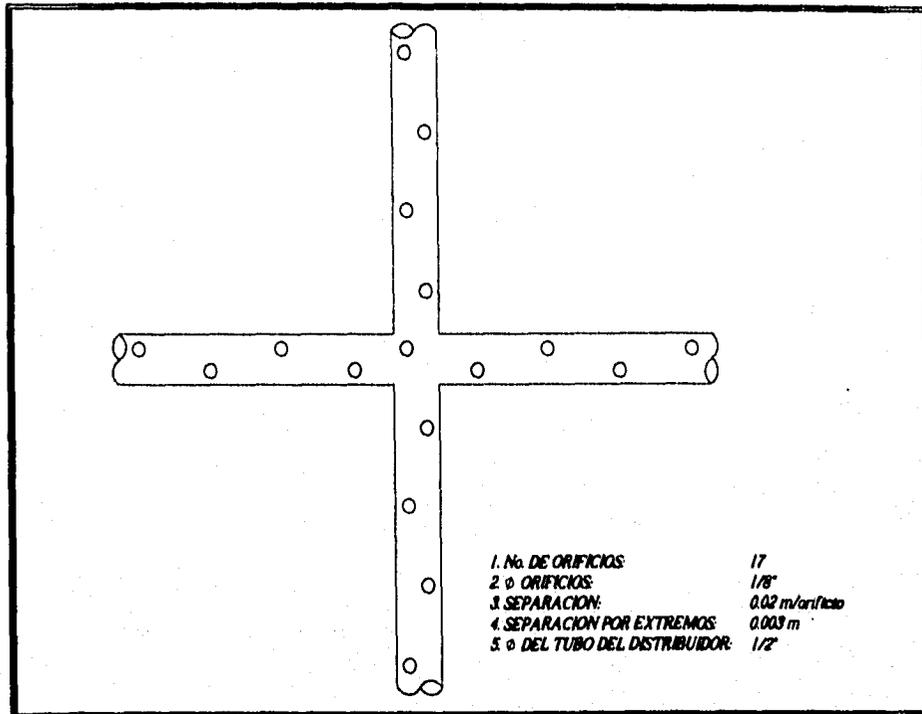
recomendaciones de Adin *et al.*, 1979 y de Metcalf and Eddy, 1977 para evitar el fenómeno de pared. Los filtros se habilitaron con una serie de 8 puertos de muestreo distribuidos a cada 15 cm a partir del fondo del filtro. En la Tabla 7 se resumen las características constructivas al igual que la Fig. 22 muestra su construcción.

**Tabla 7. Características constructivas de los filtros piloto**

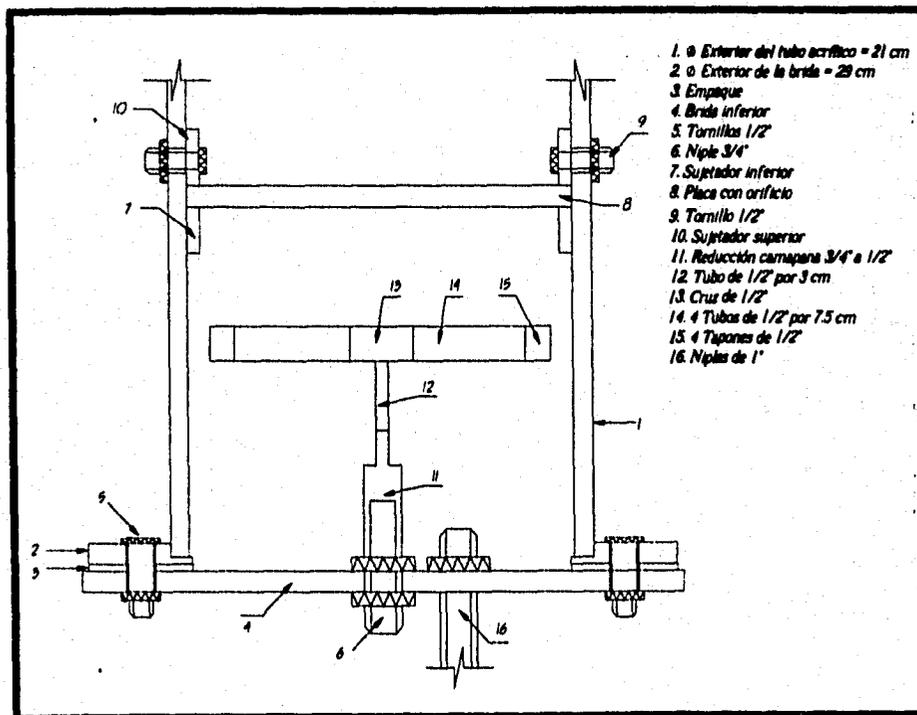
No. de Unidades	3
Diámetro de cada unidad, m.	0.20
Área de la columna, m <sup>2</sup>	0.03141
Espesor del lecho, m.	1.00
Espesor del falso fondo, m.	0.15
Espesor de la gravilla, m.	0.10
Número de puertos	8
Diámetro de cada puerto, m.	0.01
Separación entre puertos, m	0.15
Material de construcción.	Acrílico y PVC.
Tipo de soporte	Metálico



**Fig. 17 Montaje del sistema de distribución.**



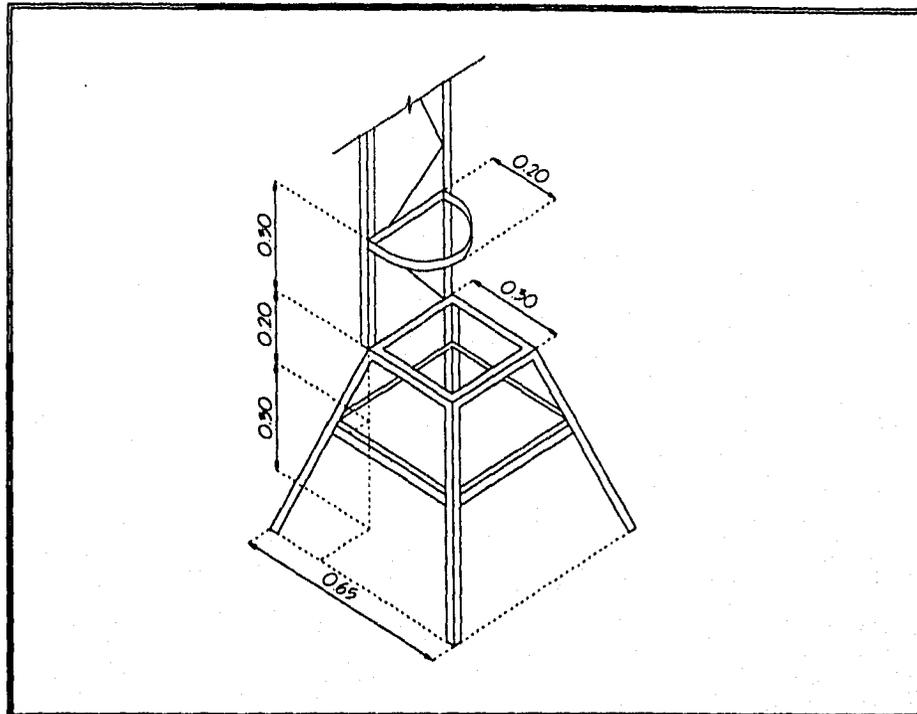
**Fig. 18 Sistema de lavado (planta).**



**Fig. 19 Sistema de lavado (corte).**



**Fig. 20 Salida de lavado.**



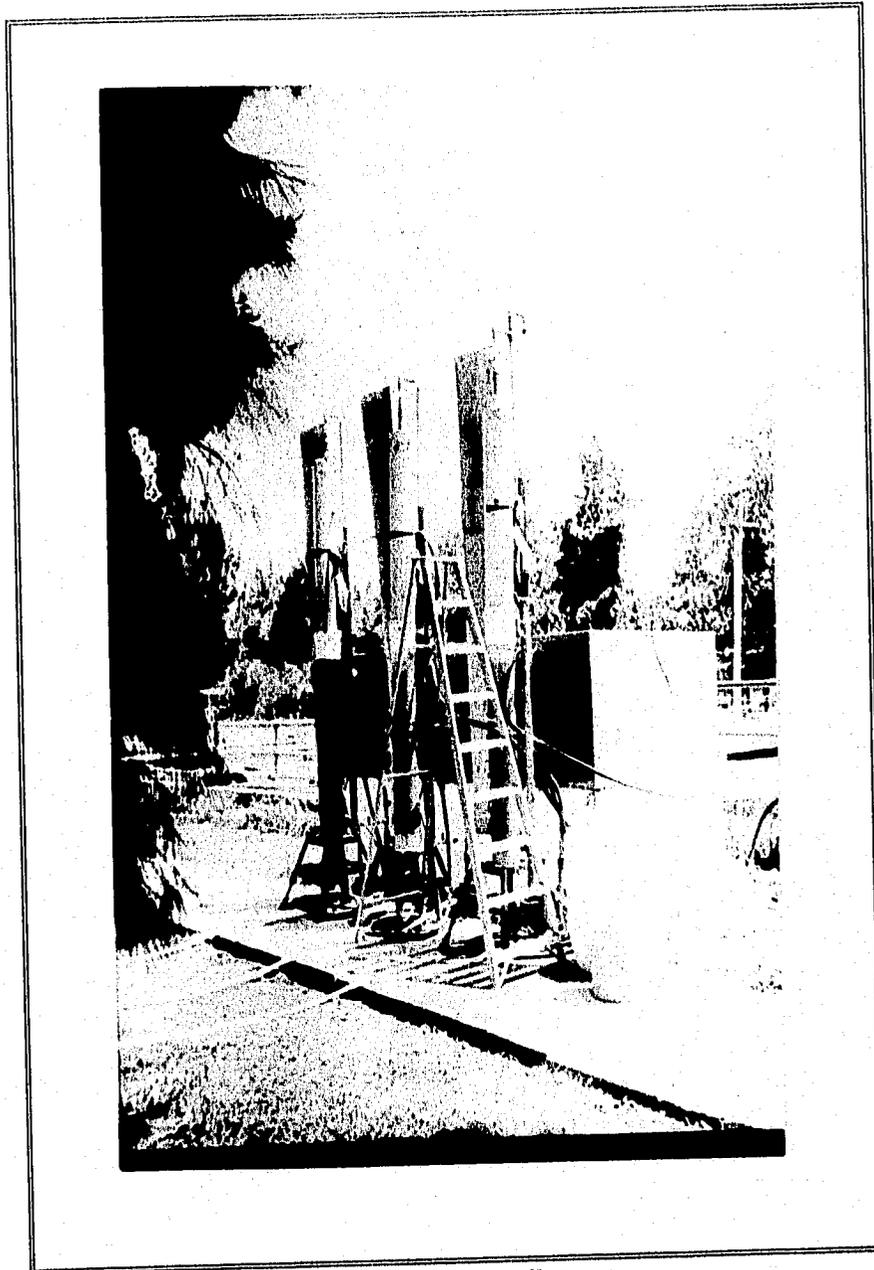
**Fig. 21 Base de la columna filtrante.**

## **2.2 Procedimiento experimental.**

### **2.2.1 Acondicionamiento del Agua.**

El Acondicionamiento del agua se llevó a cabo por medio de un Tratamiento Primario Avanzado. El empleo de la filtración se llevo a cabo como un complemento a la segunda etapa de operación de la planta piloto como se mencionó anteriormente, la cual estuvo caracterizada por el uso de Sulfato de Aluminio en combinación con dos polielectrólitos (Vitro PQ-01 y Prosifloc A-52).

Las condiciones promedio a las que fue operada la planta piloto fueron de 50 mg/l de sulfato de aluminio, mientras que para los polielectrólitos las dosis variaron entre el rango de 0.3 y 0.4 mg/l. Cabe mencionar que los mejores resultados en cuanto a remoción de SST se obtuvieron cuando el coagulante se aplicaba en el tanque de mezcla rápida y el floculante en la primera cámara de preaireación.



**Fig. 22 Filtros piloto**

### 2.2.2. Funcionamiento de los filtros.

Filtración. El funcionamiento de los filtros piloto fue por gravedad, el gasto se bombeó desde el sedimentador hasta la parte superior del filtro, cada filtro fue alimentado mediante una bomba tipo centrífuga de 1 Hp a través de una línea de conducción de aproximadamente 3.5 m de longitud y 1" de diámetro, con el fin de obtener un gasto y una concentración de sólidos suspendidos constantes. Las bombas se conectaron a los filtros por medio de una tubería de 1" de diámetro como puede observarse en la Fig. 23. En el extremo de dicha tubería se encontraba un sistema distribuidor compuesto por una regadera de 4" de diámetro con perforaciones de 1/8" en su sección transversal. El gasto de filtración se controló mediante una válvula de compuerta (1" de diámetro) localizada a la salida de la bomba. En este sitio se realizaba el aforo del caudal, para posteriormente corroborarse con el aforo en la línea de conducción del efluente para tener la certeza de que los filtros operaban con el gasto deseado.

Una vez que el agua pasaba a través del sistema de filtración, ésta era devuelta al sistema de tratamiento de lodos activados. Únicamente se almacenaba una muestra de aproximadamente 200 L para que DGCOH e IMTA realizaran sus determinaciones correspondientes.

### 2.2.3 Velocidad de filtración.

Metcalf and Eddy, 1991 reportan valores para tasas de filtración que van desde 4.8 m/h hasta 19.2 m/h. Durante el desarrollo de esta investigación se emplearon cuatro diferentes tasas de filtración: 7, 10, 12 y 15 m/h en cada uno de los filtros, con el fin de obtener parámetros comparativos referentes a calidad, pérdida de carga y duración de corrida. En la Tabla 8 se presentan las tasas de filtración y el gasto de operación correspondiente para una sección transversal de  $0.0314159 \text{ m}^2$  en cada filtro.

**Tabla 8. Condiciones de operación.**

FILTRO No.	VELOCIDAD m/h				GASTO DE OPERACIÓN lps.				Ap m
	7	10	12	15	3.66	5.24	6.28	7.85	
1	7	10	12	15	3.66	5.24	6.28	7.85	1.70
2	7	10	12	15	3.66	5.24	6.28	7.85	1.70
3	7	10	12	15	3.66	5.24	6.28	7.85	1.70

### 2.2.4 Velocidades de lavado.

Empleo de un Novedoso Método de Lavado (Jiménez *et al.*, 1995).

Dentro del desarrollo de esta investigación, se buscó demostrar la funcionalidad de un nuevo método de lavado que combina el empleo de distintas velocidades en un mismo

ciclo de lavado con el correspondiente ahorro de agua. La Tabla 9 presenta el procedimiento de lavado propuesto por Jiménez *et al.*, 1995.



**Fig. 23 Instalación hidráulica**

**Tabla 9. Procedimiento de lavado de filtros.**

PERIODO	CICLO	VELOCIDAD m/h	DURACIÓN min.
Primero	1	50	3
	2	25	3
Segundo	1	50	3
	2	25	3
Tercero	1	50	3
	2	25	3
Enjuague		60	3

### **2.3 Parámetros de Control.**

Durante cada una de las carreras de filtración se llevó a cabo una rigurosa metodología de muestreo las 24 hrs. del día, tanto en el influente (efluente primario) como en el efluente (agua filtrada). Esto fue con el fin de establecer parámetros de control comparativos que sentaran las bases para obtener el comportamiento de los filtros y sus respectivas eficiencias de remoción.

Los parámetros analizados fueron los siguientes: sólidos suspendidos, turbiedad, color, DQO, huevos del helmintos, fósforo, nitrógeno y pérdida de carga en cada uno de los filtros (Tabla 10). Las anteriores determinaciones fueron realizadas de acuerdo con "Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater"(1987), a excepción de la pérdida de carga, la cual era determinada directamente en campo, mediante la lectura de manómetros instalados en cada uno de los ocho puertos de muestreo integrados en los filtro.

#### **2.3.1 Huevos de Helmintos.**

A los parásitos con forma de gusano se les denomina "helmintos" y se encuentran divididos principalmente en tres grupos biológicos: nemátodos(nematelmintos o gusanos redondos), tremátodos (distomas o duelas) y céstodos (tenias). Para comprender el papel que desempeñan las aguas residuales en la transmisión de los helmintos, se debe considerar primero la variedad de formas que los parásitos emplean para asegurar su diseminación y supervivencia, y que en muchos casos la ruta fecal no tiene ninguna importancia.

En cada una de las corridas fueron tomadas muestras para la determinación de Huevos de Helmintos; estas determinaciones las realizaron diversas instituciones (IMTA, DGCOH e I.I.). Para el caso de agua de retrolavado solo el I.I. (grupo de potabilización) fue el encargado de las determinaciones.

**Tabla 10. Parámetros empleados para el monitoreo de los filtros piloto**

PARÁMETRO	UNIDAD	FRECUENCIA
Turbiedad	UTN	cada 2 h
Color	Pt-Co	cada 2 h
$\Delta p$	mca	cada 2 h
pH		Rutinario
Temperatura	° C	Ocasional
Sólidos suspendidos totales	mg/L	cada 2 h
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	cada 2 h
Sólidos suspendidos fijos	mg/L	cada 2 h
DQOs	mg/L	Ocasional
Fósforo	mg/L	Ocasional
Nitrógeno Total	mg/L	Ocasional
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Ocasional
Huevos de Helminfos	HH/L	Rutinario

# Capitulo 3

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Filtración.

##### 3.1.1 Velocidades de filtración.

Los filtros se operaron de manera continua las 24 hr del día, del 18 de Julio al 25 de Octubre de 1995. Más de 50 carreras de filtración se llevaron a cabo en los filtros de TE 0.8 y 1.2 mm. En lo que se refiere al filtro de TE 0.6 mm, se eliminó en un inicio debido a sus tiempos de carrera demasiado cortos (menores a 3 h.) cuando se probó la menor velocidad de operación (Fig. 24). Ante tales circunstancias se decidió trabajar con los dos filtros restantes y cambiar el material de empaque del filtro 1. (Los ANEXO D y E presentan las bitácoras de los filtros piloto).

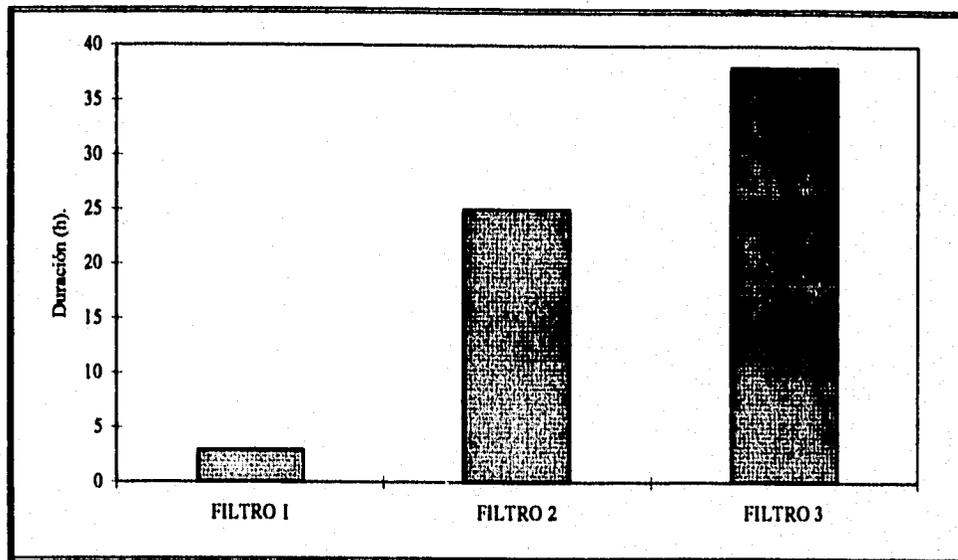


Fig. 24 Duración promedio de carrera ( $v = 7$  m/h).

La operación de cada filtro se llevó a cabo hasta alcanzar la pérdida de carga máxima admisible de 1.70 metros columna de agua (mca). Todos y cada uno de los datos obtenidos durante las diversas carreras de filtración tales como: fecha de inicio, fecha de terminación, pérdida de carga, tasa de filtración, SST, volumen producido y % de agua de lavado se encuentran condensados dentro de las Tablas 11 y 12.

Tal y como se esperaba, la duración de las carreras de filtración presentaron un incremento cuando mayor era el TE del material filtrante y menores eran las tasas de filtración. Dicho de otra manera, el filtro 3 (TE 1.2 mm) presentó un comportamiento superior al filtro 2 (TE 0.8 mm) como lo muestra la Fig. 26 En ambos filtros, el mayor

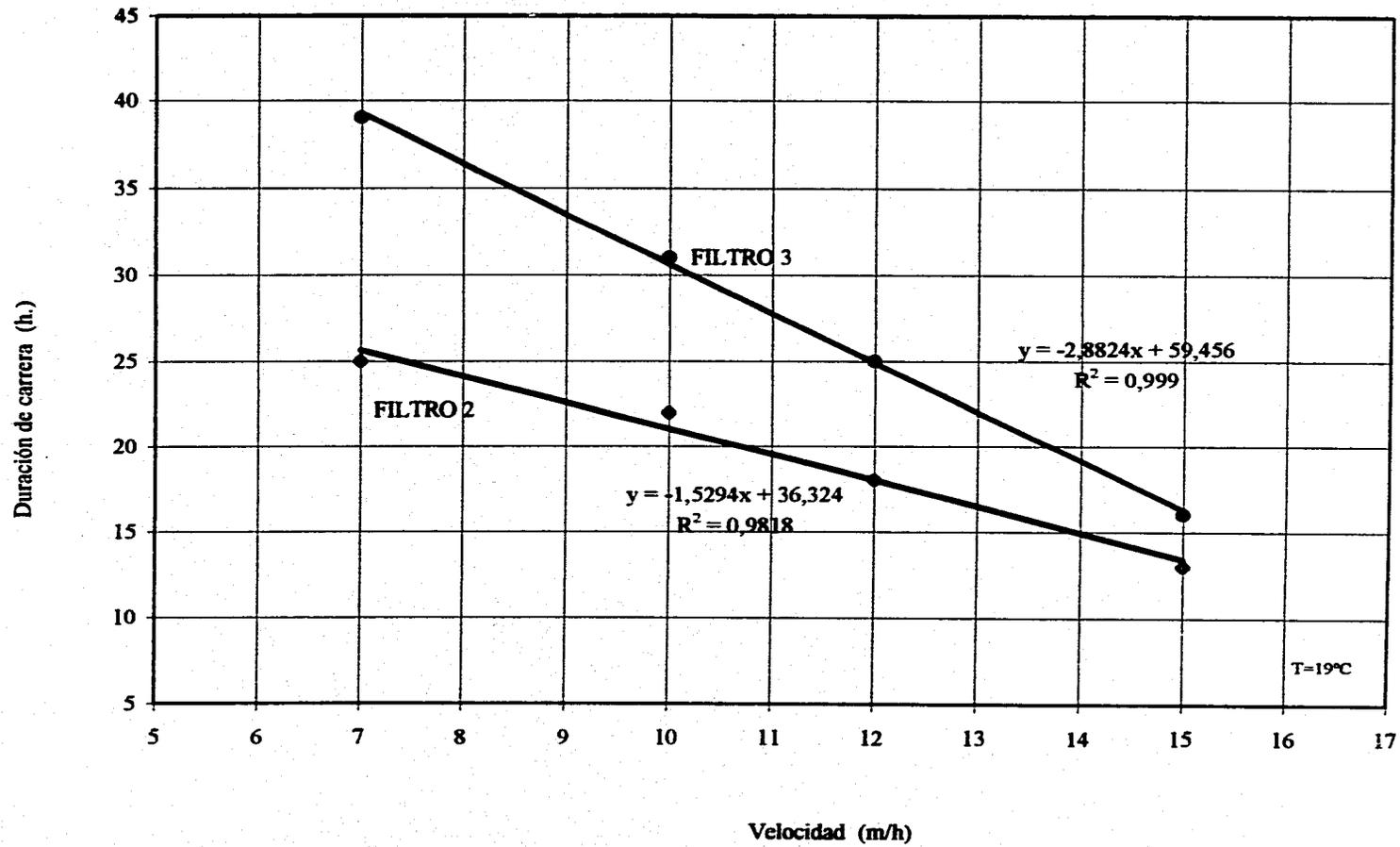
**Tabla 11. Comportamiento del filtro 2 (TE 0.8 mm y CU 1.6)**

No.	INICIO	FIN	DURAC. h	PÉRDIDA DE CARGA m	TASA m/h	SST AGUA CRUDA mg/L	SST PRIMARIO mg/L	SST EFLUENTE mg/L	AGUA PRODUCTA m <sup>3</sup>	% LAVADO
1	19/07/95	20/07/95	22.5	0.94	7	92	54	47	4.95	12
2	20/07/95	20/07/95	9.5	0.57	7	92	54	43	2.10	17
3	24/07/95	25/07/95	25.5	1.42	7	84	50	30	5.61	8.6
4	25/07/95	26/07/95	28	1.77	7	88	47	30	6.16	7.6
5	26/07/95	28/07/95	35	1.6	7	90	54	40	7.70	8.4
6	31/07/95	1/08/95	27	1.5	7	99	59	45	5.94	5.4
7	3/08/95	4/08/95	30	1.51	7	127	50	37	6.40	6.5
8	7/08/95	8/08/95	28	1.55	7	127	54	28	6.16	5.7
9	8/08/95	10/08/95	32.5	1.65	7	109	46	28	7.15	5.6
10	10/08/95	10/08/95	14	1.6	7	146	53	29	3.08	15
11	11/08/95	12/08/95	18.5	1.62	7	181	60	32	4.07	10.5
12	14/08/95	15/08/95	28	1.63	7	176	77	39	6.16	8
13	16/08/95	17/08/95	29	1.57	7	190	80	46	6.40	8
14	23/08/95	23/08/95	13.7	1.66	12	169	80	34	5.17	4.5
15	24/08/95	25/08/95	18	1.02	15	152	73	58	8.48	3.4
16	7/09/95	8/09/95	18	1.68	12	115	55	40	6.80	3
17	11/09/95	12/09/95	14	1.6	12	106	48	32	5.28	3
18	14/09/95	15/09/95	15.5	1.7	12	103	54	33	5.84	3
19	19/09/95	20/09/95	19	1.67	12	108	61	42	7.16	3
20	20/09/95	21/09/95	19.5	1.66	12	100	58	31	7.35	3
21	25/09/95	26/09/95	18	1.67	12	105	40	28	6.78	3
22	4/10/95	5/10/95	16	1.52	12	126	67	51	6.03	3
23	5/10/95	6/10/95	22	1.67	10	92	63	43	6.91	3
24	9/10/95	10/10/95	23	1.68	10	114	57	39	7.23	3
25	10/10/95	11/10/95	14	1.68	10	115	59	35	4.40	3
26	11/10/95	12/10/95	27	1.65	10	124	68	44	8.48	3
27	16/10/95	17/10/95	12	1.36	15	128	74	55	5.66	3
28	17/10/95	18/10/95	15	1.65	15	116	57	37	7.07	3
29	18/10/95	19/10/95	13	1.62	12	128	63	38	4.90	3
30	23/10/95	23/10/95	5	1.69	15	155	64	42	2.36	6.5
31	24/10/95	25/10/95	14	1.68	12	203	60	54	5.28	3

**Tabla 12. Comportamiento del filtro 3 (TE 1.2 mm y CU 1.6)**

No.	INICIO	FIN	DURAC.	PERDIDA DE CARGA	TASA	SST AGUA CRUDA	SST PRIMARIO	SST EFLUENTE	AGUA PRODUCIDA	% LAVADO
			m	m	m/h	mg/L	mg/L	mg/L	m <sup>3</sup>	
1	18/07/95	20/07/95	33	0.85	7	85	51	41	7.26	8.6
2	20/07/95	21/07/95	27.5	1.56	7	89	58	38	6.05	6
3	24/07/95	25/07/95	33.5	1.62	7	83	51	32	7.40	6
4	26/07/95	28/07/95	59	1.55	7	89	50	39	12.98	5.5
5	31/07/95	2/08/95	42.5	1.54	7	102	55	33	9.35	5.5
6	3/08/95	5/08/95	38	0.9	7	130	52	31	8.36	6
7	7/08/95	9/08/95	51.5	1.63	7	119	46	28	11.33	4
8	9/08/95	10/08/95	24	0.82	7	124	47	30	5.28	9
9	10/08/95	12/08/95	35.5	0.99	7	179	58	35	7.81	5
10	14/08/95	16/08/95	39	1.55	7	174	78	43	8.60	6
11	16/08/95	18/08/95	46.5	1.33	7	174	76	35	10.23	9
12	23/08/95	24/08/95	17	1.67	15	162	76	42	8.01	3
13	24/08/95	25/08/95	24.7	1.00	12	150	71	50	9.31	3
14	11/09/95	12/09/95	19.5	1.68	12	99	54	36	7.35	3
15	12/09/95	13/09/95	25.5	1.65	12	106	48	31	9.61	3
16	19/09/95	21/09/95	34	1.69	12	106	60	40	12.82	3
17	21/09/95	22/09/95	19	1.60	12	108	57	38	7.16	3
18	4/10/95	5/10/95	28	1.68	12	134	66	48	10.56	2
19	9/10/95	10/10/95	24	1.65	12	114	57	43	9.05	2.21
20	11/10/95	12/10/95	18	1.70	15	119	67	45	8.48	2.35
21	12/10/95	13/10/95	16	1.69	15	128	74	45	7.54	2.65
22	16/10/95	17/10/95	12	1.67	15	128	74	56	5.66	3
23	17/10/95	18/10/95	17	1.68	15	116	57	39	8.01	2.5
24	18/10/95	19/10/95	19	1.68	10	128	63	39	5.97	3
25	19/10/95	20/10/95	28.5	1.68	10	115	71	46	8.95	3
26	23/10/95	25/10/95	45	1.67	10	165	60	42	14.14	1.41

**Fig. 25. Nomograma: velocidad versus duración de carrera.**



tiempo de duración se presentó para la velocidad de 7 m/h, mientras que para la velocidad de 15 m/h se registraron los menores tiempos de duración.

En el diseño de filtros para el tratamiento de las aguas residuales, los parámetros están generalmente limitados a la selección del tamaño del medio y a la tasa de filtración (Matsumoto, 1982), con la gráfica de la Fig. 25 se tienen las condiciones para evaluar la duración de carrera para una velocidad determinada. Por ejemplo, si se busca una duración mayor a 24 h, con el fin de efectuar sola una vez al día el lavado del filtro; para la columna 2 (TE 0.8 mm) deberá emplearse como velocidad máxima de diseño un valor igual o menor a 9 m/h; mientras que para el filtro 3 (TE 1.2 mm), la velocidad de diseño no será mayor de 13 m/h.

### **3.2 Parámetros de control.**

#### **3.2.1 Sólidos Suspendidos Totales.**

La concentración de SST en el influente presentó variaciones a lo largo de toda la investigación, el intervalo estuvo comprendido entre 38 y 96 mg/L. En lo que corresponde a las concentraciones en los efluentes, el filtro 2 (TE 0.8 mm) éstas variaron entre 20 y 88 mg/L; a su vez al filtro 3 (TE 1.2 mm), correspondieron concentraciones entre 18 y 80 mg/L. Los valores de remoción que se presentaron en cada uno de los filtros, se encuentran graficados en la Fig. 26.

Los mejores valores de remoción se presentaron para el filtro 2 (TE 0.8 mm) cuando la tasa de filtración fue de 10 m/h. La Fig. 27 muestra que el mayor volumen de sólidos suspendidos atrapados por unidad de volumen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) se obtuvo para esta velocidad; en contraste, la menor cantidad de sólidos suspendidos atrapados por unidad de volumen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) correspondieron a la velocidad de 7 m/h.

En lo que respecta al filtro 3 (TE 1.2 mm) la velocidad a la cual se logró un mayor atrapamiento de los sólidos por unidad de volumen fue la de 12 m/h, y al igual que en el filtro 2 (TE 0.8 mm) la menor cantidad de sólidos atrapados correspondió a la velocidad de 7 m/h.

Tanto en la Fig. 27 como en la Fig. 28, se observa con claridad que a mayor velocidad y mayor tamaño específico del medio (TE) se logra una mayor penetración de los sólidos dentro de la cama filtrante; esto debido a la fuerza de impulso que generan las altas velocidades.

#### **3.2.2 Determinación del tamaño de partícula para los sólidos filtrables.**

Una típica distribución del tamaño de partículas filtrables presentes en el agua del Gran Canal, del efluente primario y del efluente filtrado se muestran en las Fig. 29 y 30. La determinación de sólidos se efectuó con papel filtro whatman de tamaño de poro

**Fig. 26 Remoción de sólidos suspendidos.**

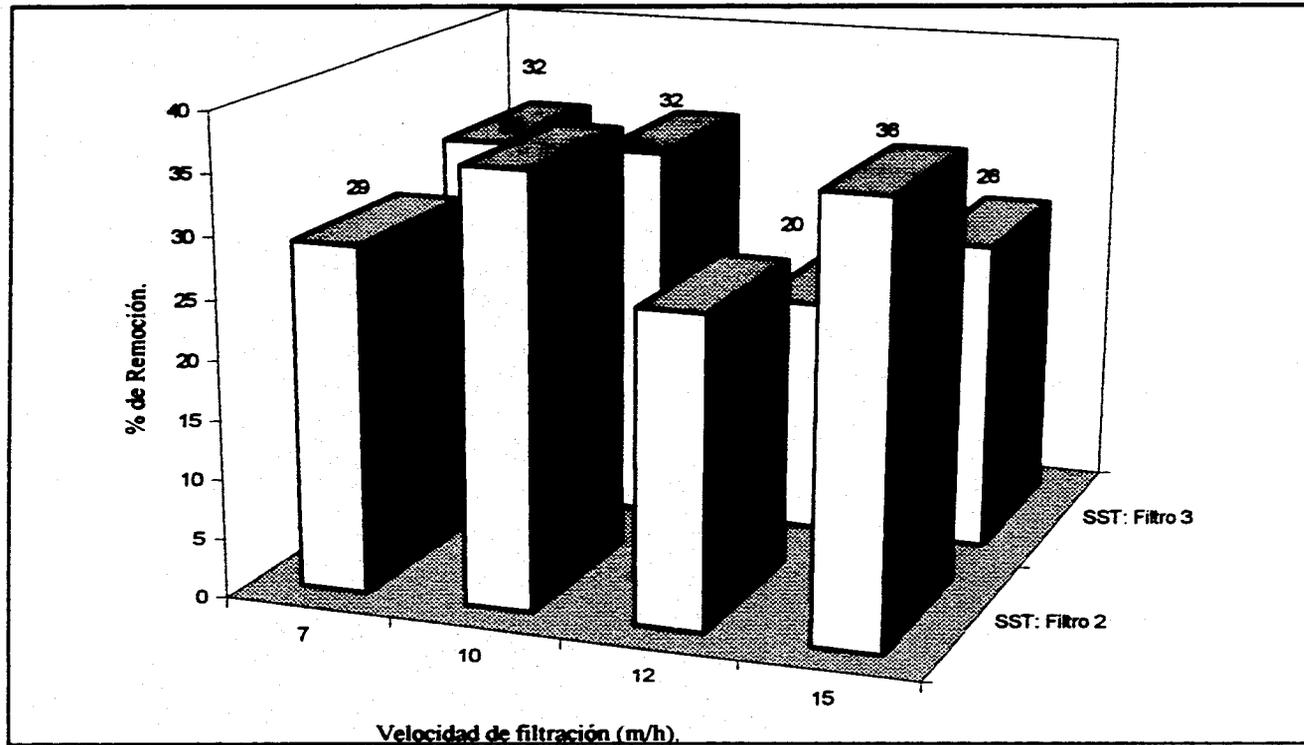
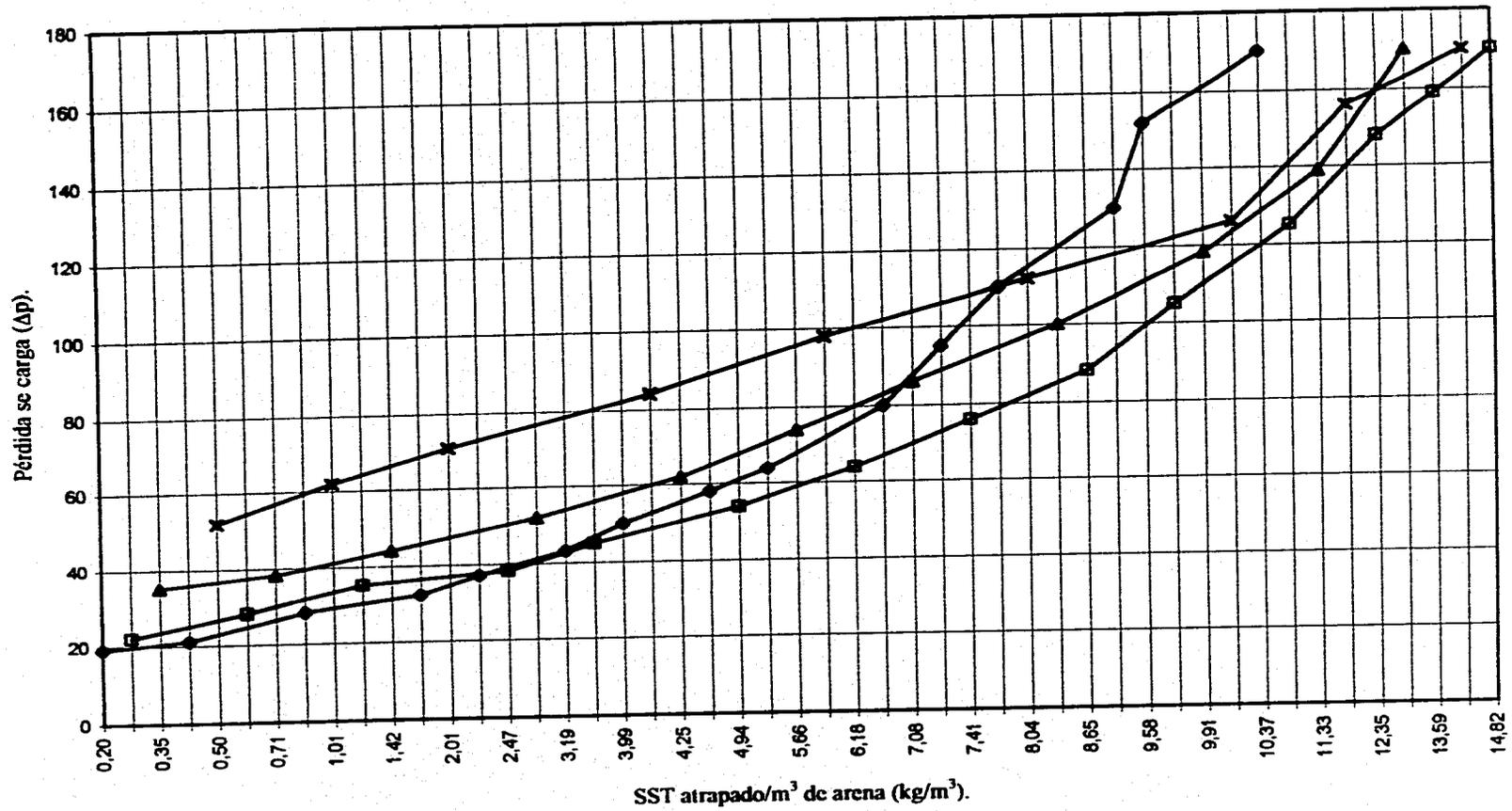
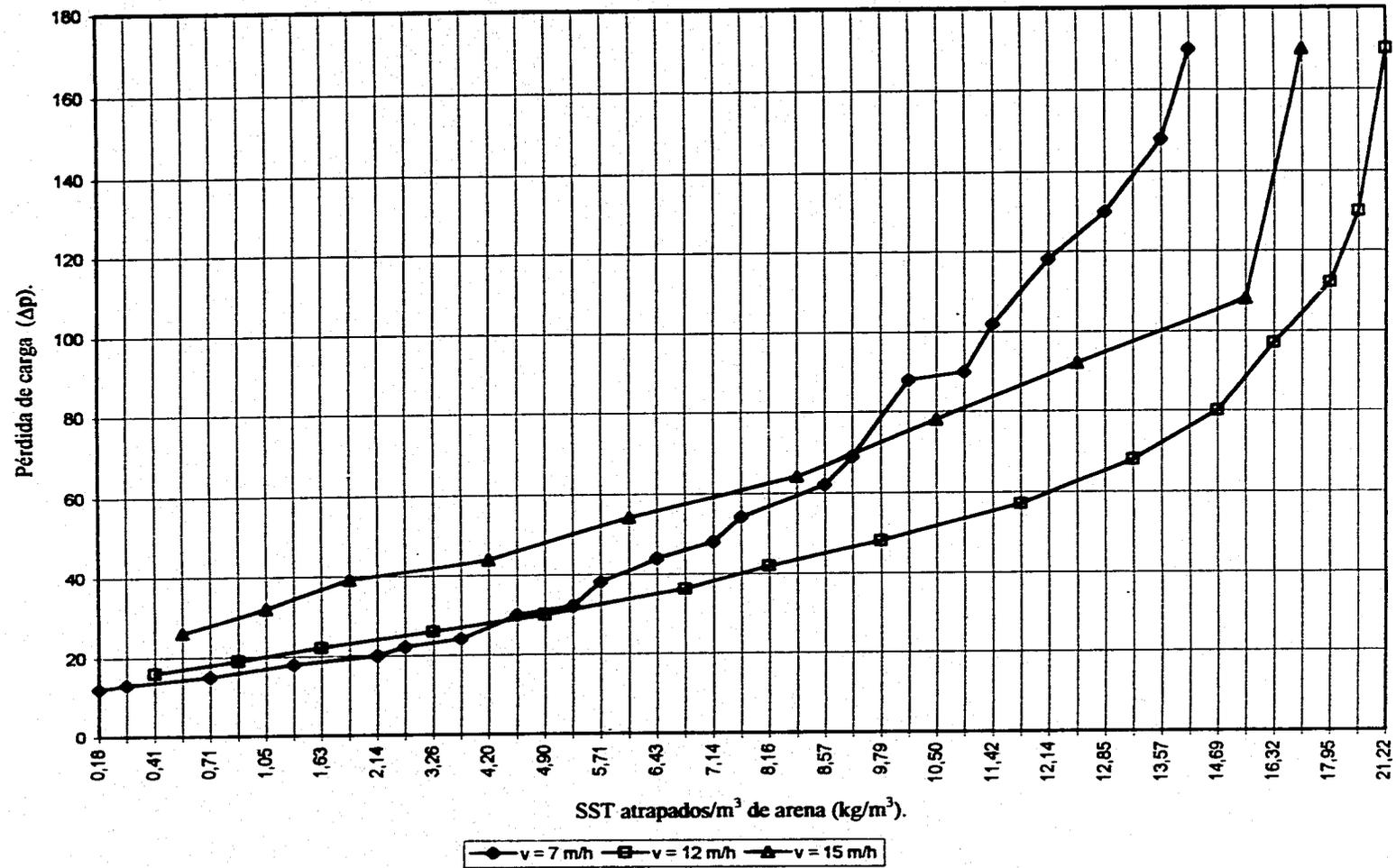


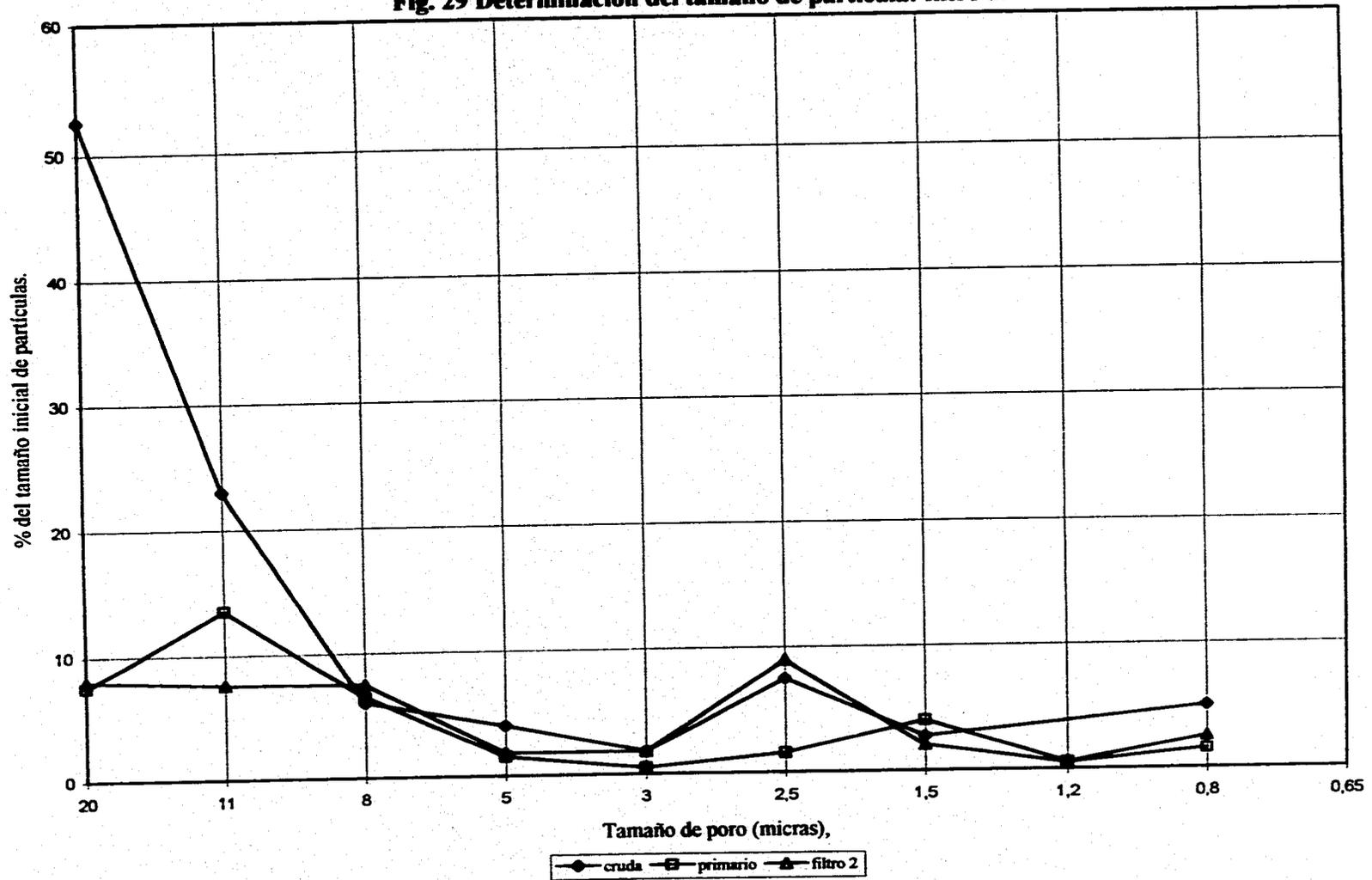
Fig. 27 Sólidos suspendidos totales atrapados: filtro 2



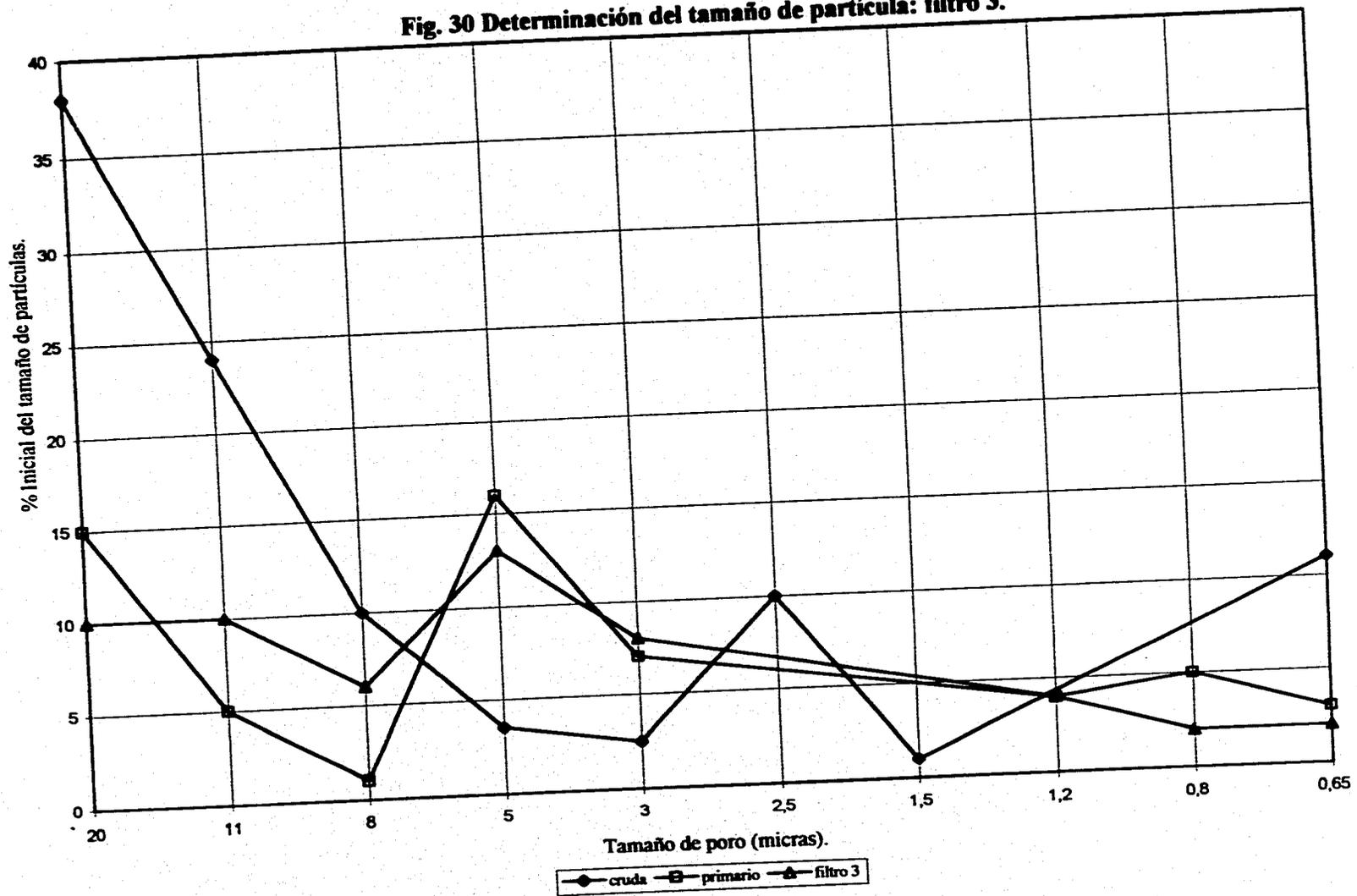
**Fig. 28 Sólidos suspendidos totales atrapados: filtro 3**



**Fig. 29 Determinación del tamaño de partícula: filtro 2.**



**Fig. 30 Determinación del tamaño de partícula: filtro 3.**



específico. Se utilizó papel filtro de policarbonato con los siguientes tamaños de poro: 20, 11, 8, 5, 3, 2.5, 1.5, 1.2, 0.8 y 0.65  $\mu\text{m}$  al igual que un contador de partículas.

Basado en los datos presentados en las Fig. 29 y 30, una porción significativa de los sólidos fueron más pequeños que 1  $\mu\text{m}$ . En una determinación de SS acorde con los Métodos Estándar, esos sólidos no pueden ser detectados, porque el tamaño de poro del filtro de fibra de vidrio empleado en dicha determinación es aproximadamente de 1.2  $\mu\text{m}$ . Así, mientras el lecho filtrante retiene fracciones de sólidos mayores a 2  $\mu\text{m}$ , los sólidos por abajo de 1  $\mu\text{m}$  de tamaño no son afectados. Esto se nota fácilmente, ya que la presencia de una gran cantidad de partículas de tamaño entre 0.001 y 1.0  $\mu\text{m}$  generan altas lecturas de turbiedad y color.

La Fig. 31 muestra que el área bajo la curva es el promedio de los SST (mg/L) relacionados con el tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) para cada uno de los efluentes de los diferentes procesos (agua cruda, efluente primario y efluente del filtro 3). En dicha gráfica se observa que el 60% de las partículas mayores a las 20  $\mu\text{m}$  son removidas durante el proceso de TPA y la filtración remueve un 18 %. El tamaño promedio de los Helmintos oscila entre 20 y 80  $\mu\text{m}$ , de allí la efectividad de su remoción durante la filtración. Young (1985) menciona que las partículas menores a 20  $\mu\text{m}$  no se remueven con eficiencia, aun cuando el TE del filtro sea de 0.2 mm. Las partículas de los SST comprendidas entre 5 y 100  $\mu\text{m}$  fueron perfectamente retenidas de acuerdo a lo mencionado por Huiung (1981) citado por Dardy (1991).

### 3.2.3 Turbiedad.

La Fig. 32 muestra que los mejores porcentajes de remoción se presentaron cuando la tasa de filtración fue de 7 m/h para ambos filtros. Las turbiedades que se registraron en el efluente estuvieron comprendidos entre 56 y 253 UTN, mientras que los valores registrados en los efluentes de los filtros 2 y 3 variaron de 29 a 240 y 21 a 225 UTN respectivamente. Cabe mencionar que las bajas remociones presentadas se deben al tamaño de la partícula tal y como se señaló en el apartado 3.2.2.

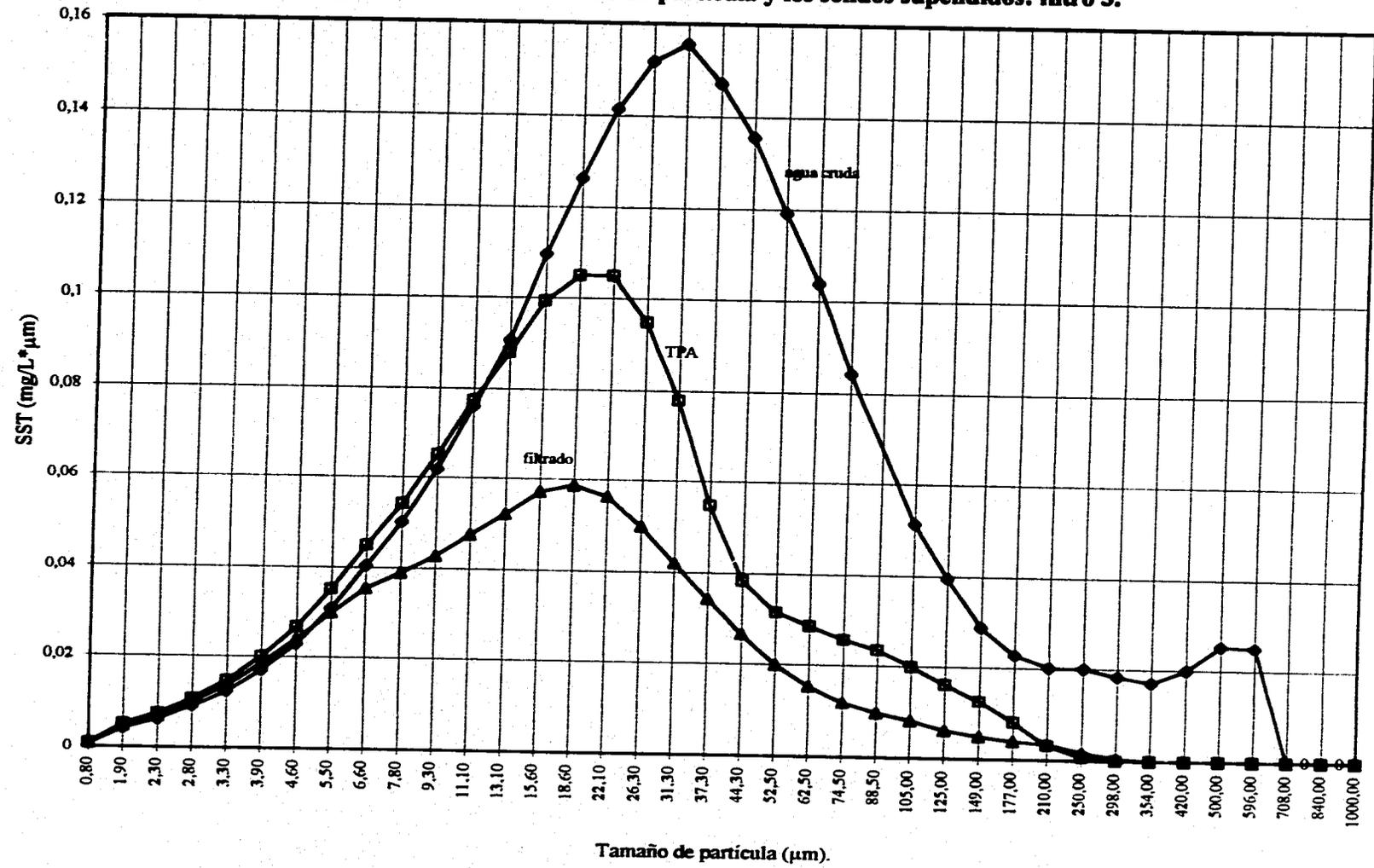
### 3.2.4 Color.

En lo referente a color, la Fig. 33 señala los bajos valores de remoción que se presentaron. El mayor valor de remoción (17 %) se presentó cuando el filtro 2 trabajó a una velocidad de 7 m/h. por su parte el filtro 3 solo alcanzó valores de remoción del orden entre 6 y 10 %, todo esto generado por la presencia de partículas con tamaño inferior a 1  $\mu\text{m}$ .

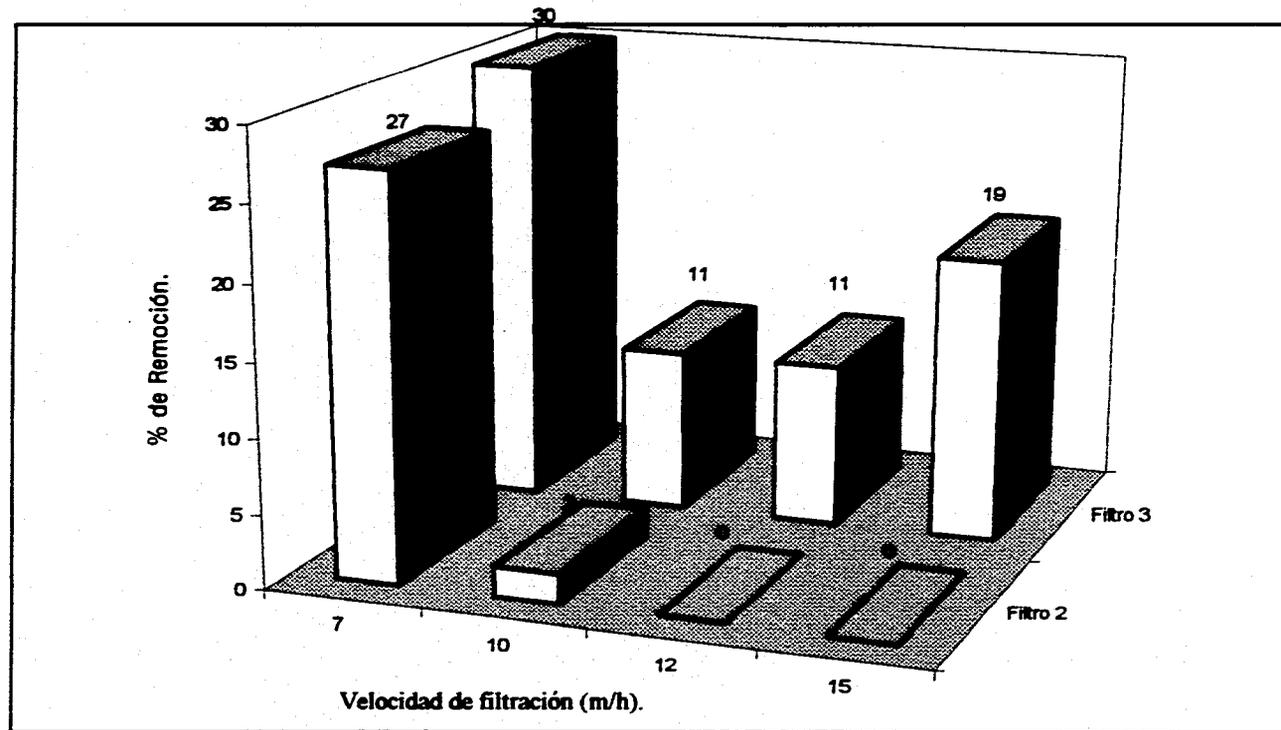
### 3.2.5 Carga orgánica como DQO.

Las concentraciones de DQO que se presentaron en el influente variaron del orden de los 76 mg/L hasta los 350 mg/L. En Fig. 34 se muestra el porcentaje de remoción que alcanzaron cada uno de los dos filtros; con casi un 27% de remoción el filtro 3, fue

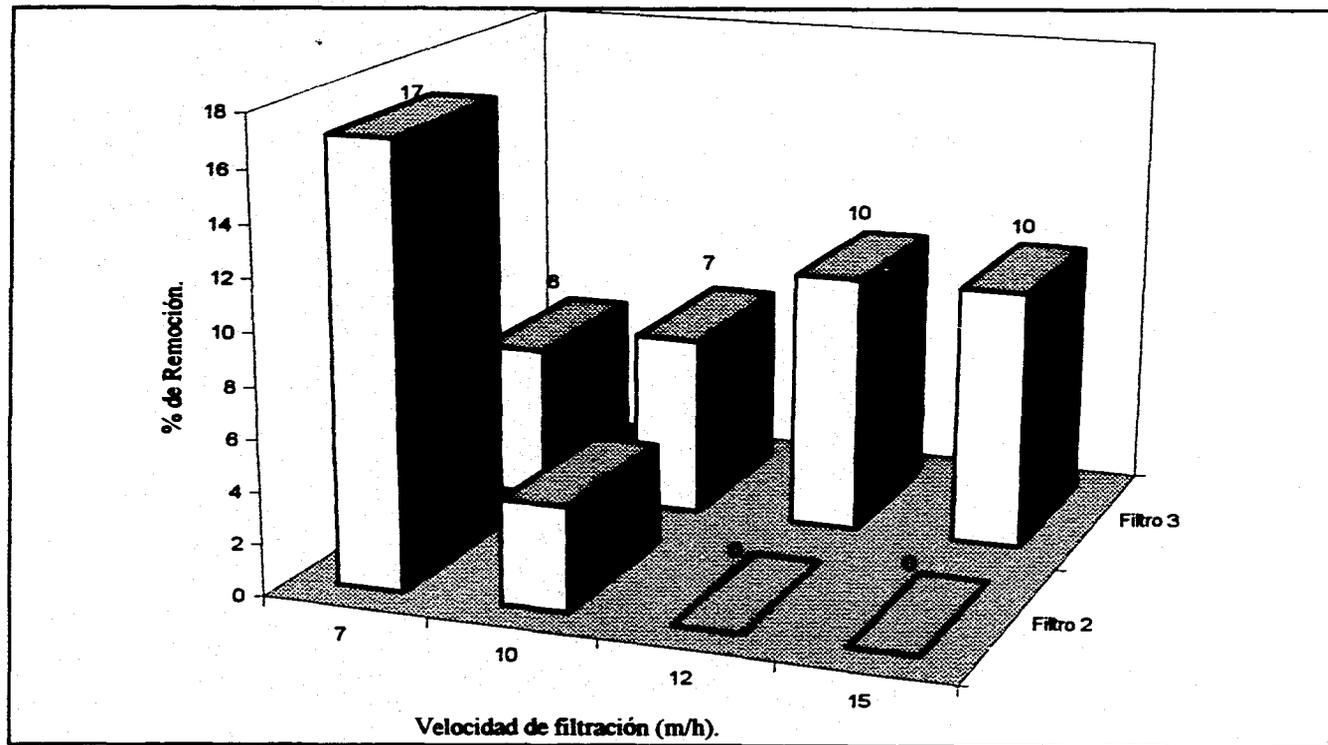
**Fig. 31 Relación del tamaño de partícula y los sólidos suspendidos: filtro 3.**



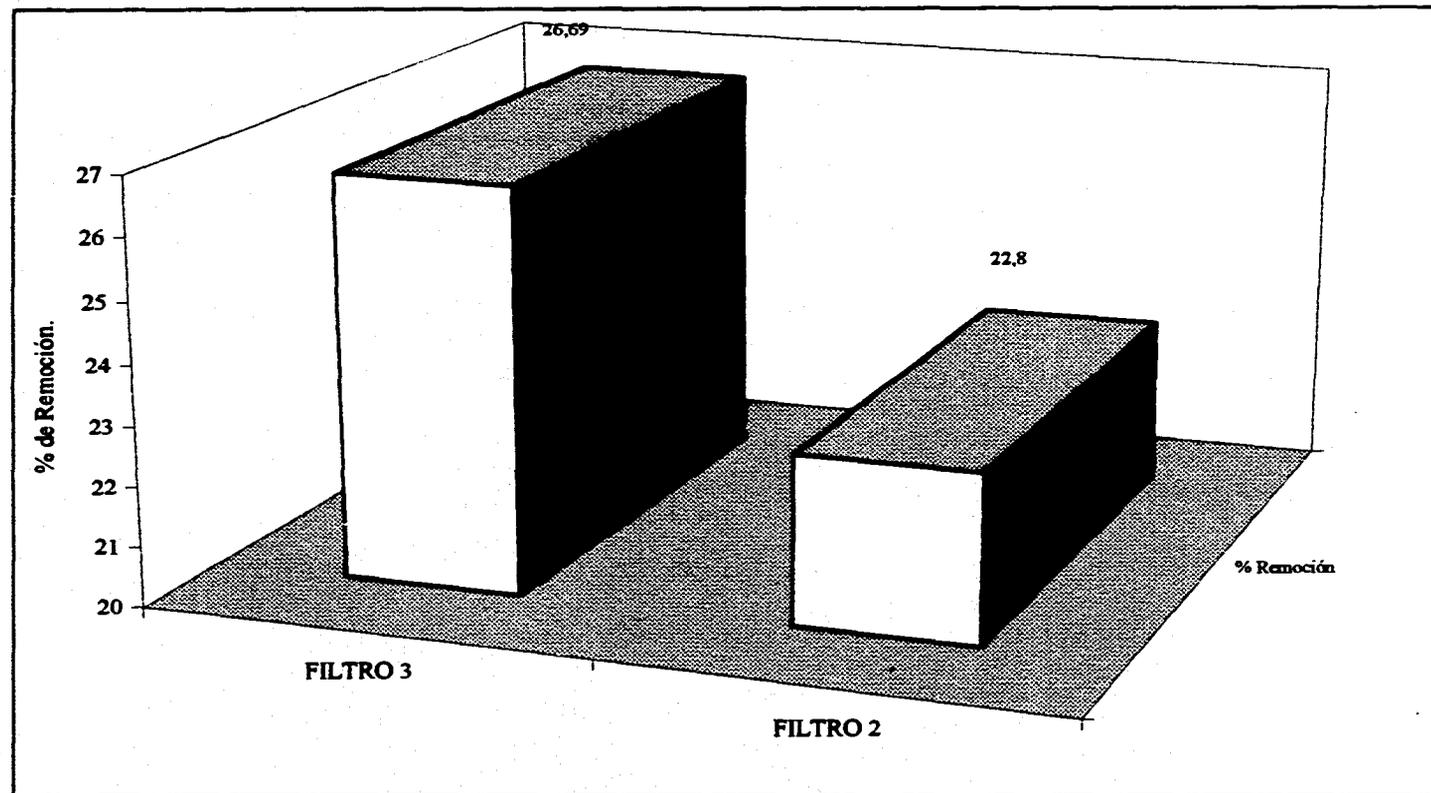
**Fig. 32 Remoción de turbiedad.**



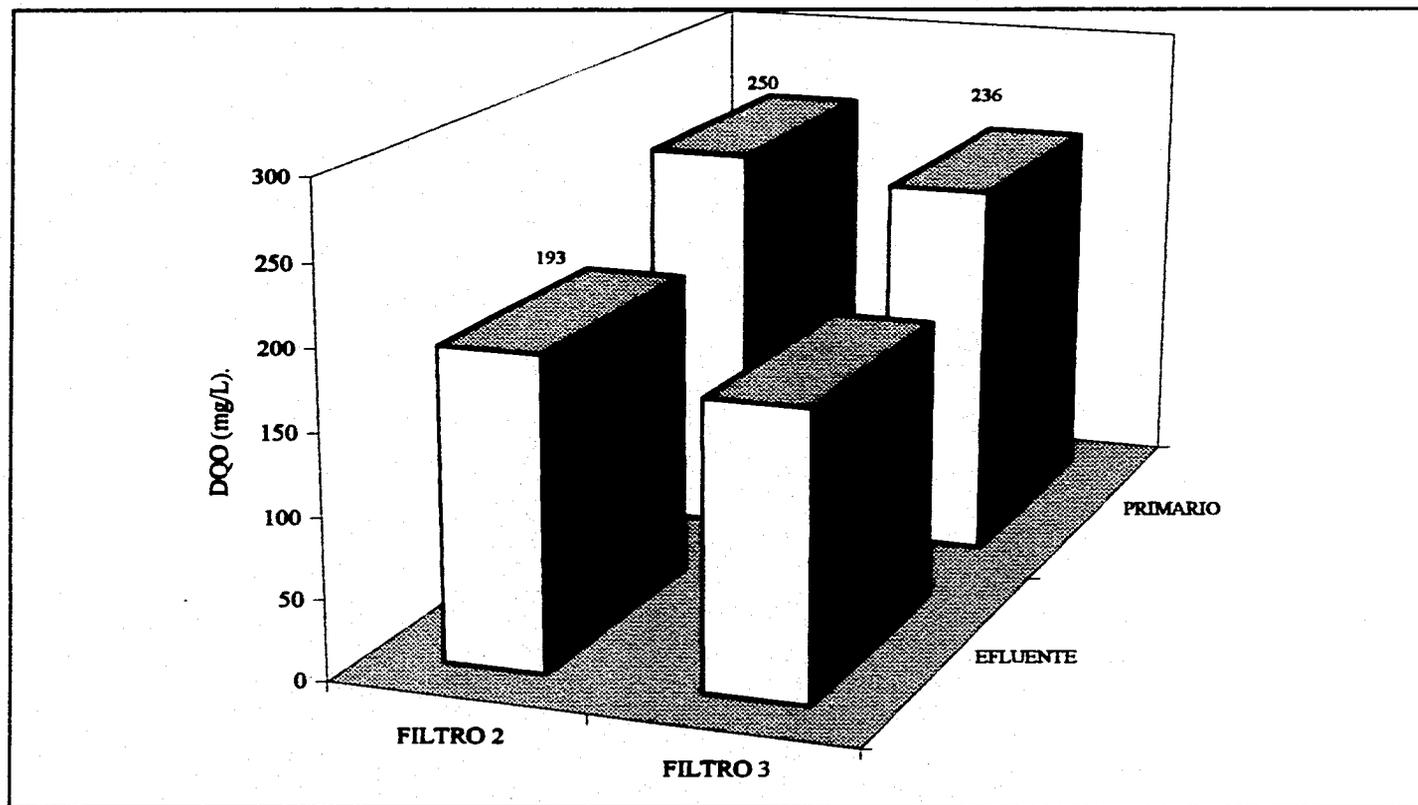
**Fig. 33 Remoción de color.**



**Fig. 34 Remoción de carga orgánica como DQO.**



**Fig. 35 Valores promedio de carga orgánica.**



superior al 2, quien registró únicamente 23% de remoción máxima. La NOM-032 no reporta valores de DQO, sólo restringe de forma directa a la DBO, con un valor máximo de 120 mg/L. Considerando la relación DBO/DQO de 1/2 para aguas municipales sugerida por Metcal and Eddy (1991), podría esperarse un valor máximo admisible para DQO de 240 mg/L. Ante esta situación, la Fig. 35 presenta los valores promedio de cada uno de los efluentes en ambos filtros, los cuales son de 195 mg/L y 175 mg/L para el filtro 2 y 3 respectivamente.

### 3.2.6 Remoción de Nutrientes.

#### 3.2.6.1 Nitrógeno.

El contenido total de nitrógeno en un agua residual municipal, después de un tratamiento secundario, oscila entre 20 y 60 mg/L N (Westcot *et al.*, 1990). Los valores que se presentaron durante el desarrollo de esta investigación fueron del orden de 42 a 45 mg/L N (Tabla 13 y 14). En la Fig. 36 se muestra que la mejor eficiencia de remoción se consiguió con el filtro 2 (9 %); cabe mencionar que el nitrógeno presente en el agua residual regenerada que llega hasta el campo de cultivo es esencialmente idéntico al nitrógeno contenido en los fertilizantes agrícolas.

#### 3.2.6.2 Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>).

En lo referente al N-NH<sub>3</sub>, éste no sufrió ninguna variación en su concentración a lo largo del tratamiento primario avanzado y en la filtración (Fig. 37); pero el carácter generalmente alcalino de las aguas residuales hace que parte del nitrógeno amoniacal que éstas contienen pueda perderse por emisión hacia la atmósfera, cuando el riego se realiza mediante aspersores y en menor proporción, cuando el riego es superficial. Henderson *et al.*, (1955) citados por Stuart y Asano (1990) han estimado que las pérdidas de amoníaco por volatilización durante el riego por aspersión de un agua con un pH comprendido entre 7.5 y 8.5 podrían ascender hasta un 20 % de la cantidad de amoníaco añadida. La posibilidad de que el amoníaco gaseoso quede absorbido en la superficie de las hojas o en el suelo puede hacer que estas pérdidas sean incluso menores.

#### 3.2.6.3 Fósforo.

El fósforo es otro elemento nutritivo requerido por todas las plantas. Las concentraciones que se registraron tanto en el influente como efluente de los filtros 2 y 3 fueron de 5.9 a 7.8 mg/L y 5.3 a 7.6 mg/L respectivamente. El comportamiento de ambos filtros fue similar, ya que presentó una diferencia de aproximadamente de un 2 % entre los efluentes generados por ambos filtros (Fig.38). Sin embargo, el aporte de fósforo se acumula gradualmente en el suelo, disminuyendo así la necesidad de aportes complementarios de este fertilizante en años sucesivos. El exceso de fósforo en los suelos no ha llegado a ser un problema (Westcot *et al.*, 1990 citados por Stuart y Asano),

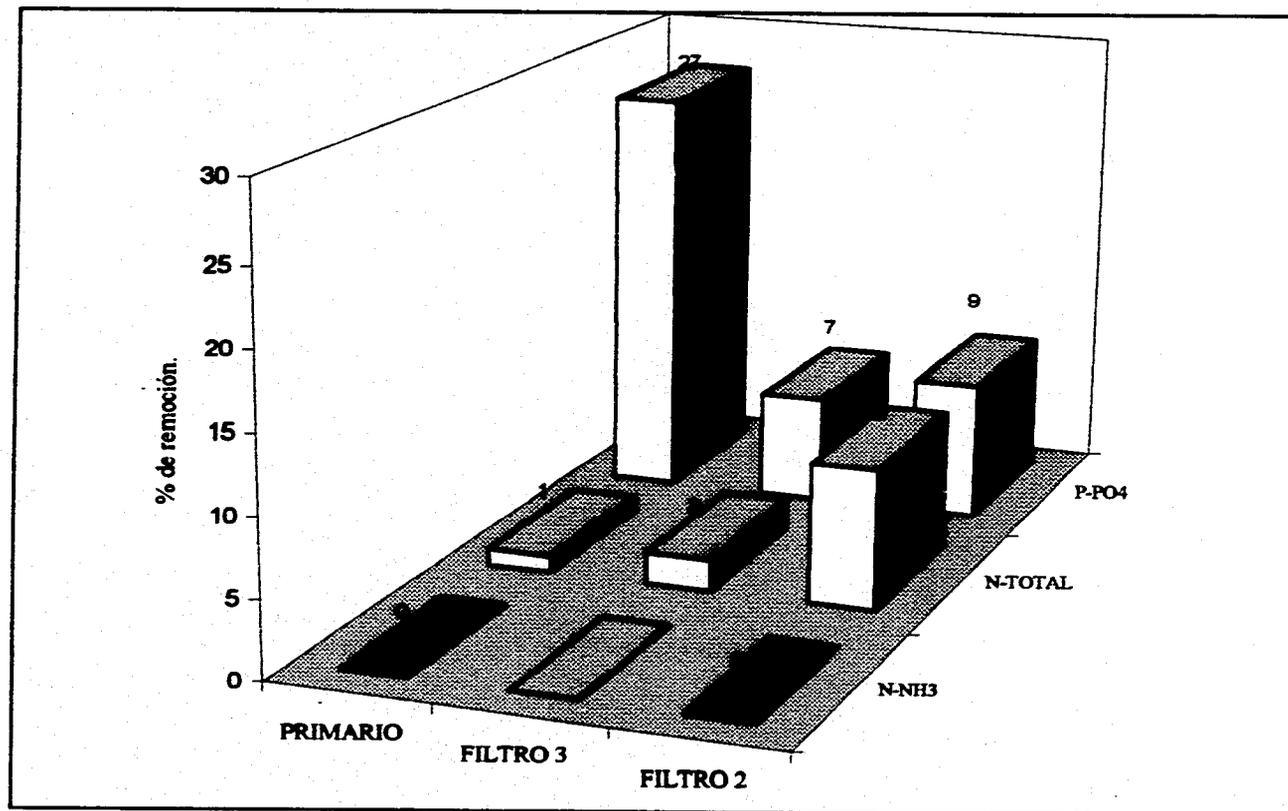
**Tabla 13. Remoción de nutrientes: filtro 2.**

FECHA	HORA	pH	AGUA CRUDA			EFLUENTE PRIMARIO						FILTRO DE C.S.					
			N-TOTAL mg/L	N-NE, mg/L	P-PO, mg/L	N-TOTAL		N-NE,		P-PO,		N-TOTAL		N-NE,		P-PO,	
						mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re
12/10/95	8:00	7.97	44	13	9.41												
12/10/95	11:00					43	4	13	7	7.8	23	41	5	13	7	6.2	21
16/10/95	20:00	8.21	45	14	9.85	45	1	14	1	7.6	23	43	4	13	8	7.5	23
17/10/95	20:00	8.41	43	14	9.1												
17/10/95	23:00					42	2	13	5	6.3	30	32	24	12		5.5	13
24/10/95	20:00	7.91	44	13	9.34												
24/10/95	23:00					44	1	13	0	5.9	37	42	10	13		5.8	1

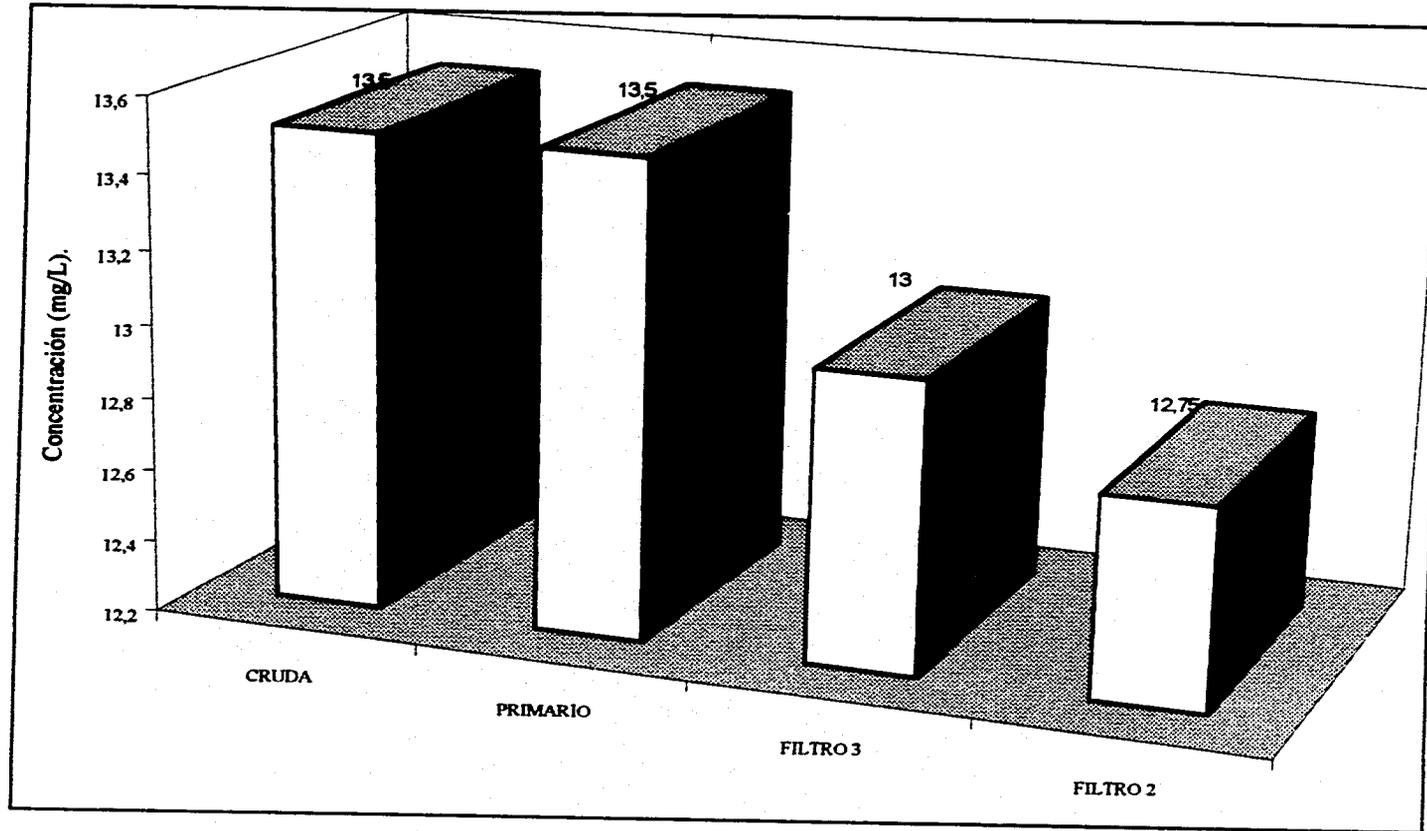
**Tabla 14. Remoción de nutrientes: filtro 3.**

FECHA	HORA	pH	AGUA CRUDA			EFLUENTE PRIMARIO						FILTRO DE L2					
			N-TOTAL mg/L	N-NE, mg/L	P-PO, mg/L	N-TOTAL		N-NE,		P-PO,		N-TOTAL		N-NE,		P-PO,	
						mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re	mg/L	% Re
12/10/95	8:00	7.97	44	13	9.41												
12/10/95	11:00					43	4	13	7	7.8	23	43		13		7.5	5
16/10/95	20:00	8.21	45	14	9.85	45	1	14	1	7.6	23	43	4	13	7	7.6	1
17/10/95	20:00	8.41	43	14	9.10												
17/10/95	23:00					42	2	13	5	6.3	30	42		13		5.3	16
24/10/95	20:00	7.91	44	13	9.34												
24/10/95	23:00					44	1	13	0	5.9	37	43	2	13		5.3	9

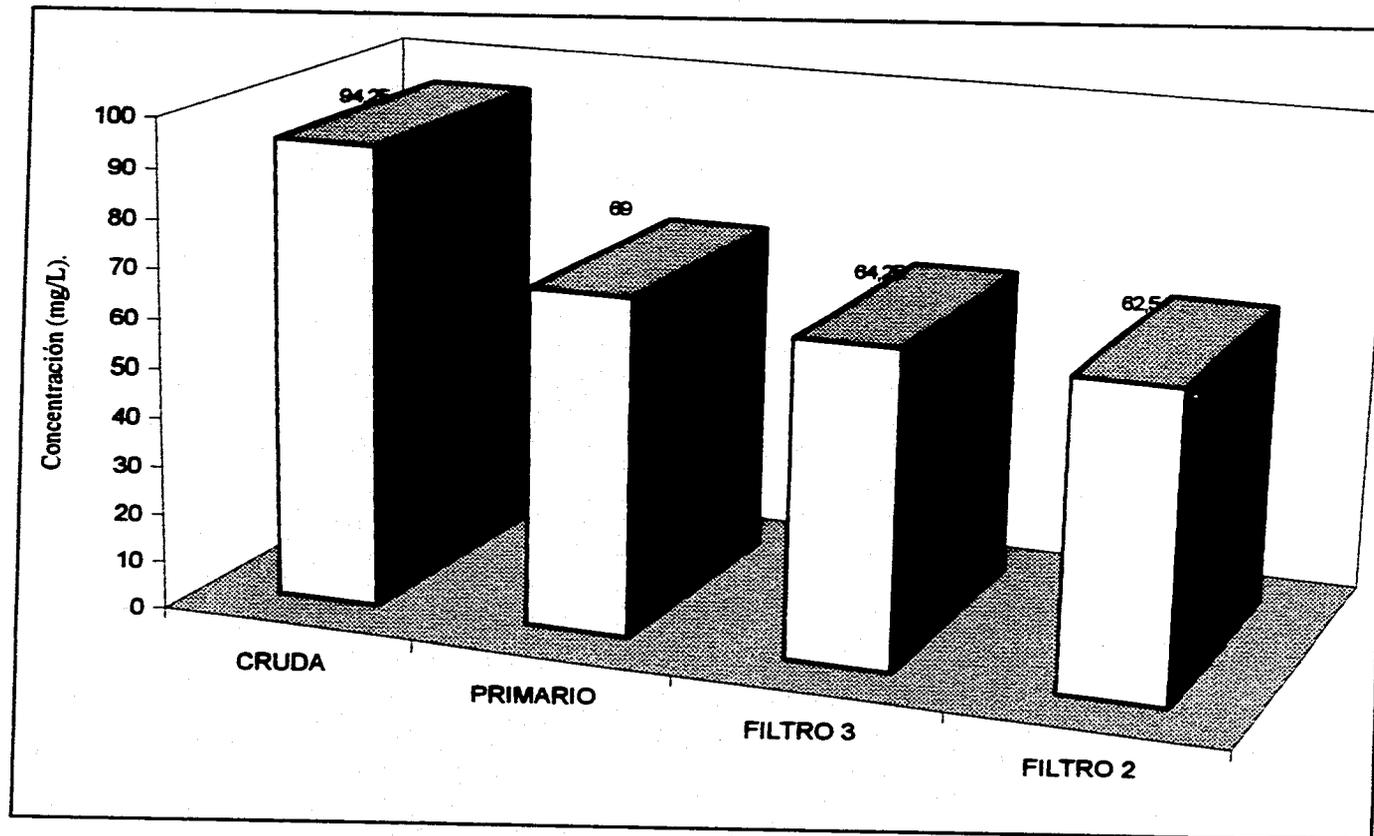
**Fig. 36 Remoción de nutrientes.**



**Fig. 37 Nitrógeno amoniacal..**



**Fig. 38 Fósforo (P-PO4).**



1990) y, por consiguiente no se ha establecido ninguna directriz para evaluar su concentración.

### 3.2.7 Pérdida de Carga.

Como se mencionó anteriormente, la pérdida de carga máxima admisible para cada uno de los filtros fue de 1.70 m.c.a. El alcanzar este valor es función directa del gasto másico; es decir, el gasto de operación multiplicado por la concentración de sólidos suspendidos. De acuerdo con Ives (1960), la pérdida de carga a través del filtro está relacionada con el volumen de floculos atrapados. Por lo tanto, para un medio de TE y una velocidad de filtración dados, la pérdida de carga total depende solamente del volumen de sólidos retenidos por el filtro.

Tchobanoglous y Eliassen (1970) propusieron una ecuación empírica relacionando el desarrollo de la pérdida de carga con la cantidad de sólidos acumulados dentro de los poros del filtro. Ellos supusieron que la pérdida de carga dependía únicamente de la cantidad de sólidos acumulados dentro del medio filtrante.

Las Figs. 39 y 40 muestra el desarrollo de la pérdida de carga como una función de SS acumulados dentro del filtro. Con la misma concentración y características, la pérdida de carga desarrollada fue dependiente de la cantidad de SS acumulados y no fue significativamente afectada por la velocidad de filtración. Esto confirma la suposición hecha por Tchobanoglous y Eliassen.

### 3.2.8 Características promedio del efluente.

La Tabla 15 muestra las características promedio de los efluentes filtrados haciendo una comparación con la NOM-032; de esta forma se constata que las concentraciones de los parámetros de cada uno de los filtros, presentan valores inferiores a los citados en la norma.

## 3.3 Lavado de filtros.

### 3.3.1 Velocidades de retrolavado.

Esta investigación sirvió para probar un nuevo sistema de retrolavado de filtros rápidos (Jiménez *et al.*, 1995). En el inicio de las pruebas de filtración, se emplearon de manera literal los criterios mencionados en la Tabla 9; pero con este procedimiento, los porcentajes de agua para el retrolavado alcanzaron valores hasta del 17 % (Tabla 11 y 12). A medida que se realizaba el lavado, se constató de manera visual, que con el empleo de las velocidades iniciales (50 y 25 m/h) en ocasiones no se lograba la expansión necesaria para expulsar los sólidos atrapados en el medio filtrante; fue así como se decidió incrementar las velocidades.

**Tabla 15. Características del efluente filtrado .**

PARÁMETRO	UNIDAD	FILTRO 3	FILTRO 2	NOM-032
pH		7.73	7.76	6.5-8.5
SST	mg/L	80	67	120
SSV	mg/L	40	49	
S. Sedimentables	mL/L	20.1	20.1	
Turbiedad	UTN	46	45	
Color	Pt-Co	200	183	
Alcalinidad Total	mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	805	796	
DQO total	mg/L	211	172	
DQO soluble	mg/L	211	174	
DBO total	mg/L	90	100	
DBO soluble	mg/L	69	69	120
Fósforo Total	mg/L	8.21	7.2	
Cond. eléctrica	µmhos/cm	2274	2287	2000
S.Totales	mg/L	1844	1844	
Coliformes Totales	NMP/100 mL	100×10 <sup>5</sup>	60.667×10 <sup>6</sup>	
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	100×10 <sup>4</sup>	9.633×10 <sup>6</sup>	

El emplear velocidades entre 75 a 80 m/h se consiguió la expulsión de los flocs atrapados casi en su totalidad; al mismo tiempo que se comenzaron a emplear dichas velocidades, disminuyeron los tiempos de lavado (solo 2 min. por ciclo). De igual forma se constató que no era necesario la aplicación de varias etapas como era la propuesta inicial. Como al aplicar la primera etapa de lavado se alcanzaban resultados satisfactorios; ante esto se modificó el criterio de lavado adoptando el descrito en la Tabla 16.

**Tabla 16. Procedimiento de lavado.**

CICLO	VELOCIDAD m/h	TIEMPO min.	EXPANSIÓN %
Alto	75-80	2	18-20
Bajo	45-55	2	8-10
Enjuague	75-80	-	18-20

Mientras que Baumann *et al.*, (1974), empleaban el 10 % del agua producida en pruebas a nivel piloto, en este trabajo el uso de agua durante el retrolavado se logró reducir hasta un 2.3% en promedio (TE 1.2 mm). Generalmente, un buen diseño de filtros usa de 3 a 4% o menos del agua filtrada para propósitos de lavado (Dawda *et al.*, 1978).

### 3.3.2 Eficiencia de lavado.

La eficiencia de lavado se verificó mediante la evaluación de la pérdida de carga. Si al iniciar la corrida la  $\Delta p$  resultaba apreciablemente mayor a la reportada en la Tabla 17 el lavado había sido ineficiente y era necesario repetir la operación.

Fig. 39-A Pérdida de carga: filtro 2. Velocidad 7 m/h.

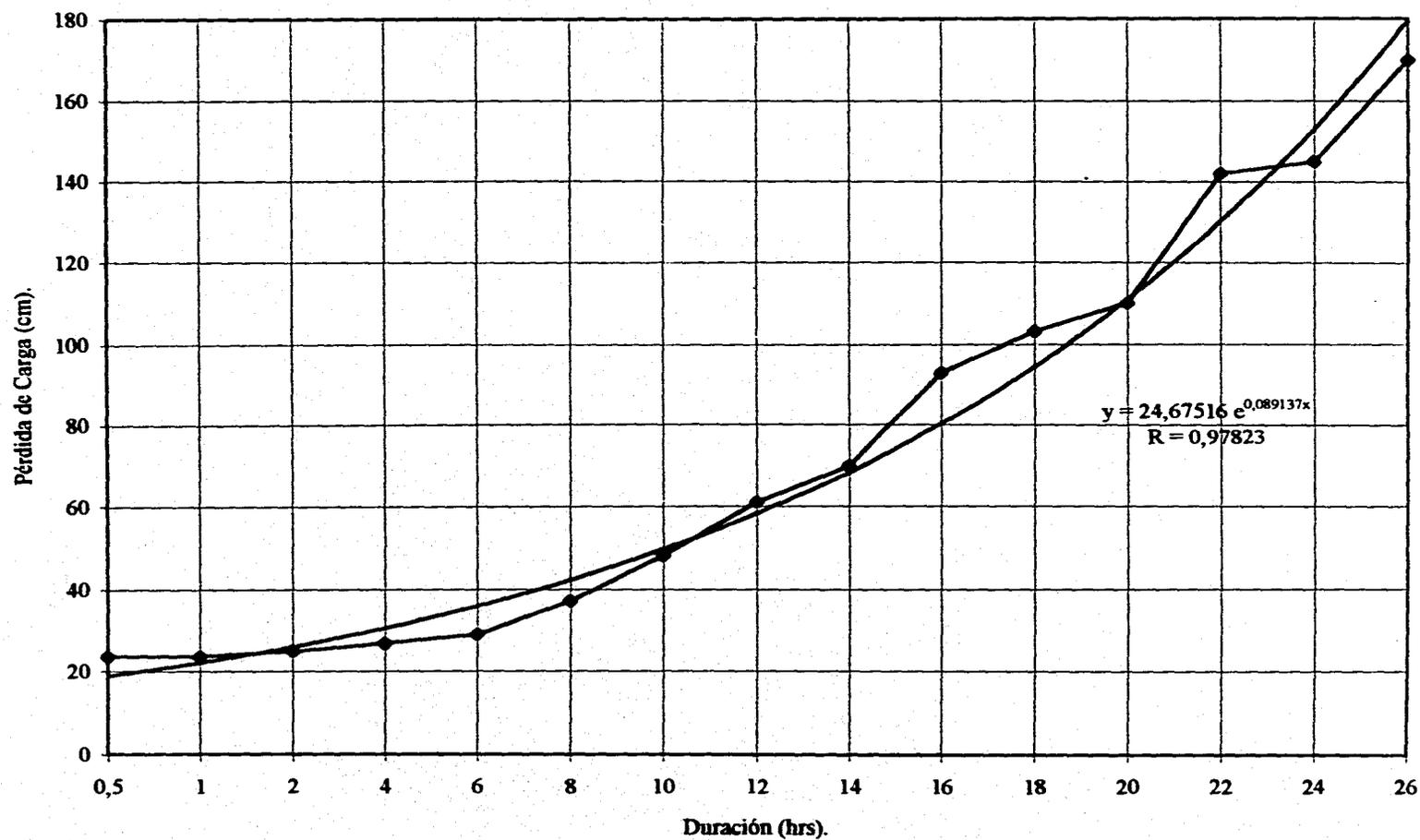
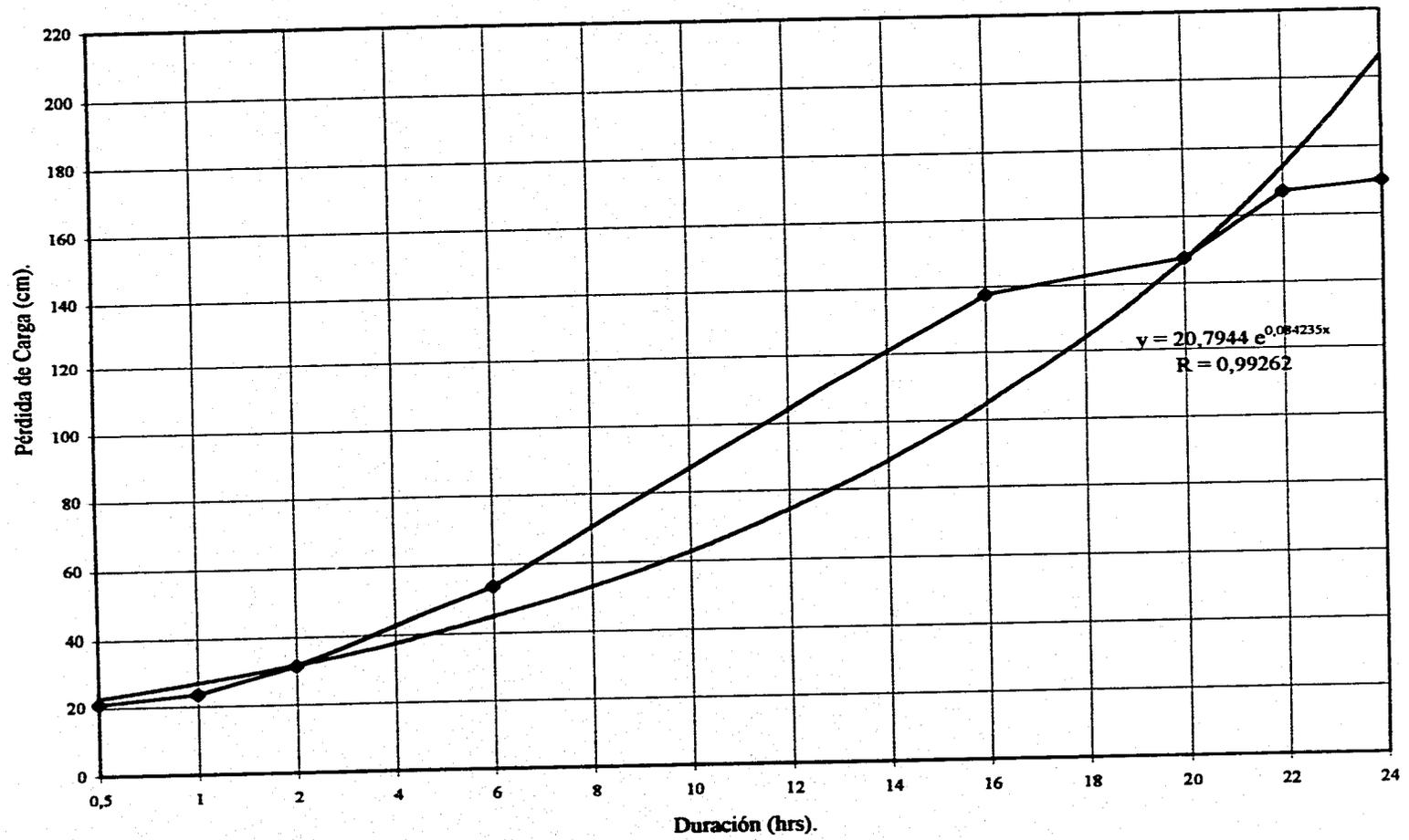
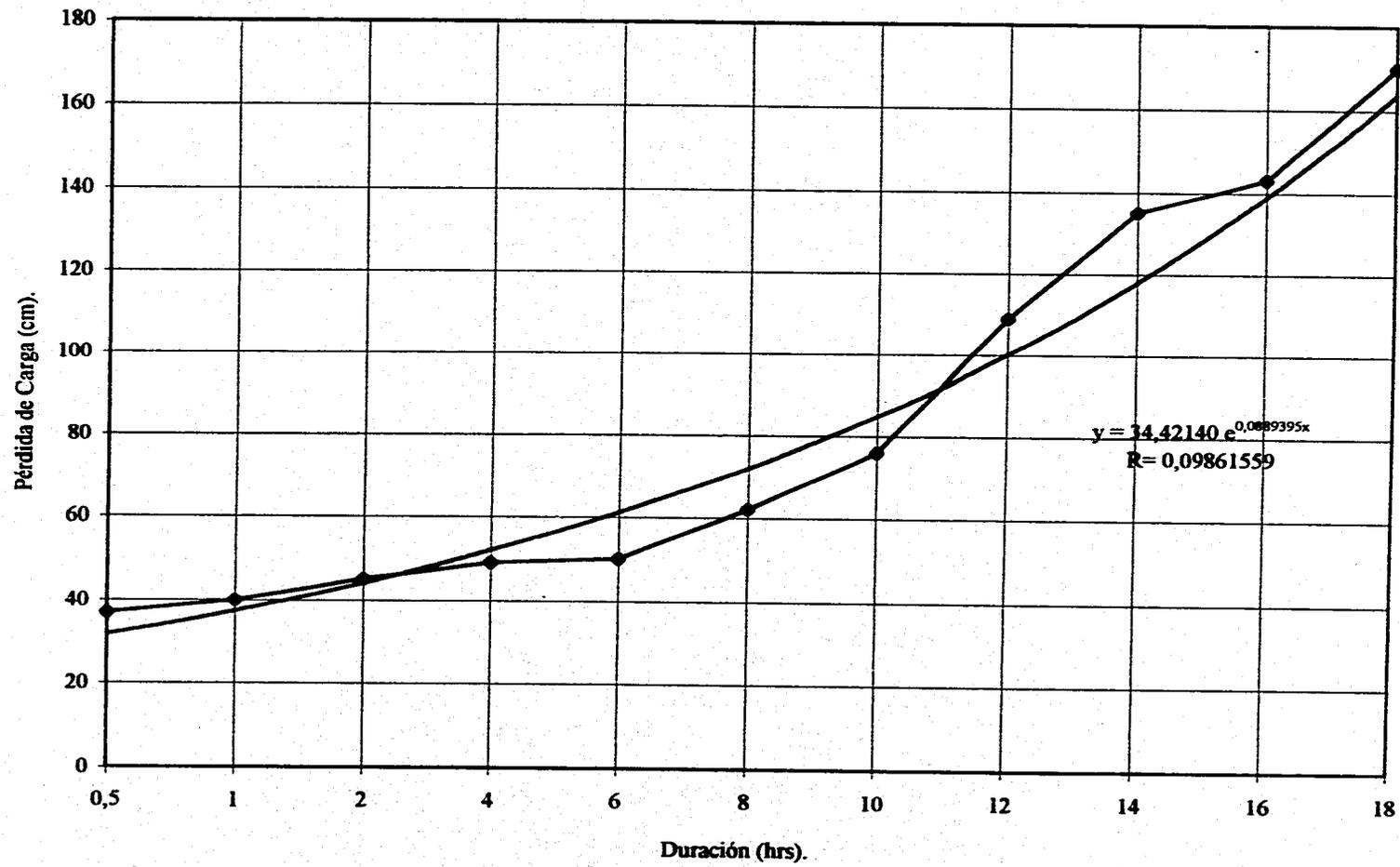


Fig. 39-B Pérdida de carga: filtro 2. Velocidad 10 m/h.



**Fig. 39-C Pérdida de carga: filtro 2. Velocidad 12 m/h.**



**Fig. 39-D Pérdida de carga: filtro 2. Velocidad 15 m/h.**

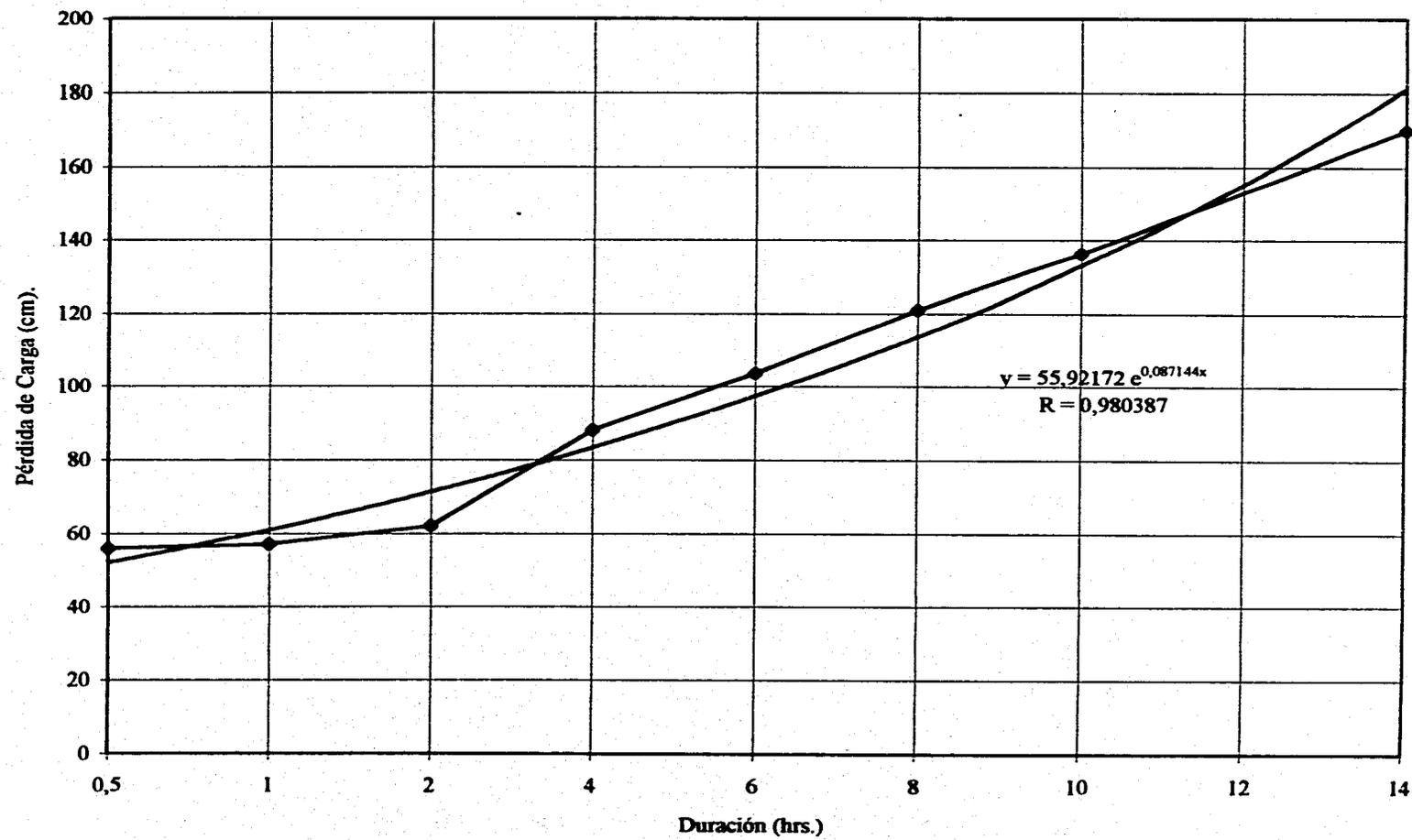


Fig. 40-A Pérdida de carga: filtro 3. Velocidad 7 m/h.

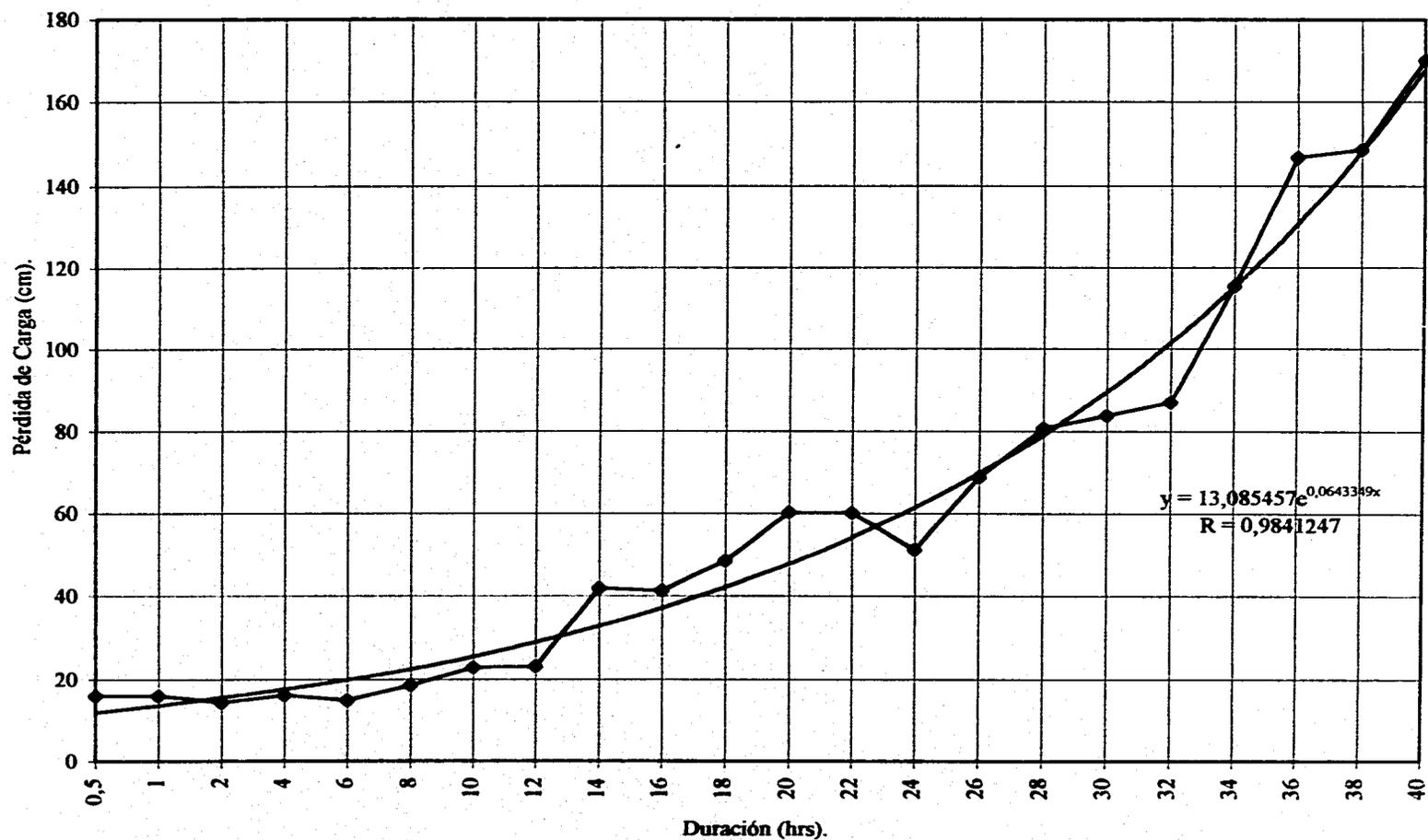
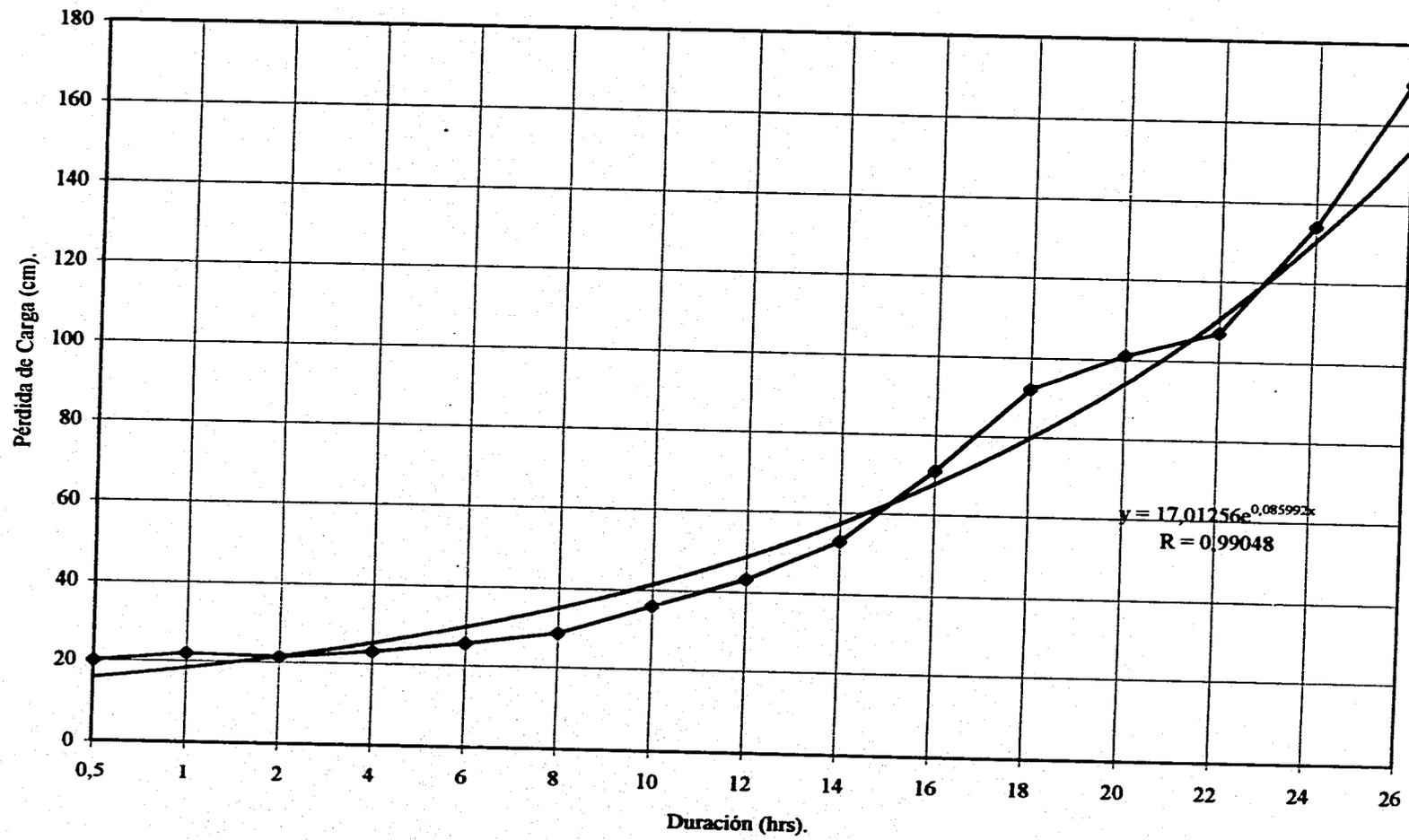
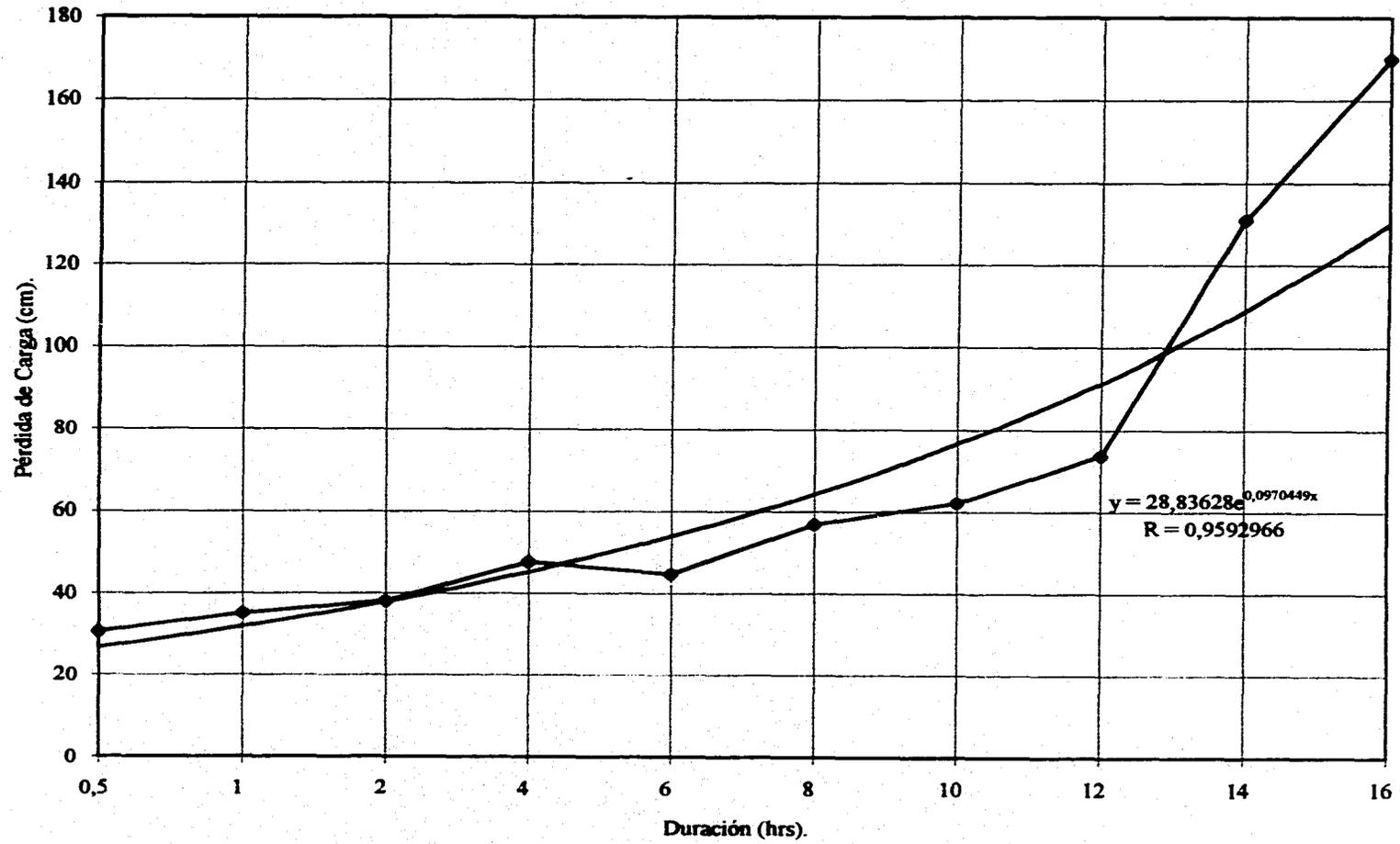


Fig. 40-B Pérdida de carga: filtro 3. Velocidad 12 m/h.



**Fig. 40-C Pérdida de carga: filtro 3. Velocidad 15 m/h.**



**Tabla 17. Pérdida de carga inicial.**

VELOCIDAD m/h	TE 0.8 mm	TE 1.2 mm
7	19	16
10	21	19
12	36	22
15	46	26

### 3.4 Remoción de Huevos de Helminetos.

Las determinaciones de los huevos de Helminetos estuvieron a cargo de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.) y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Las Tablas 18 y 19 presentan el comportamiento los Huevos de Helminetos durante el desarrollo la investigación. Dichas Tablas reporta valores promedio, máximos y mínimos en el efluente de cada uno de los filtros. En ambos casos, las concentraciones de HH se encuentran por debajo de los límites que establece la NOM.

Los valores de las Tablas 18 y 19 se presentaron sin considerar a la velocidad de operaciones; ya que como lo muestran las Fig. 41 y 42 las diferencias que existen en relación a la concentración de HH de los efluentes son prácticamente nulos; notándose una ligera superioridad del filtro 3.

**Tabla 18. Valores registrados de HH/L (DGCOH).**

EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 2		
PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1.35	4.80	0.25	0.06	0.43	0.00
EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3		
PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1.86	7.70	0.65	0.10	0.25	0.00

**Tabla 19. Valores registrados de HH/L (IMTA).**

EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 2		
PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1.58	3.03	0.45	0.05	0.18	0.00
EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3		
PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1.71	5.16	0.45	0.042	0.18	0.00

Tal y como lo demostró Murcott (1995), se buscó establecer una correlación entre los sólidos suspendidos y los huevos de Helminetos presentes en el efluente filtrado; pero

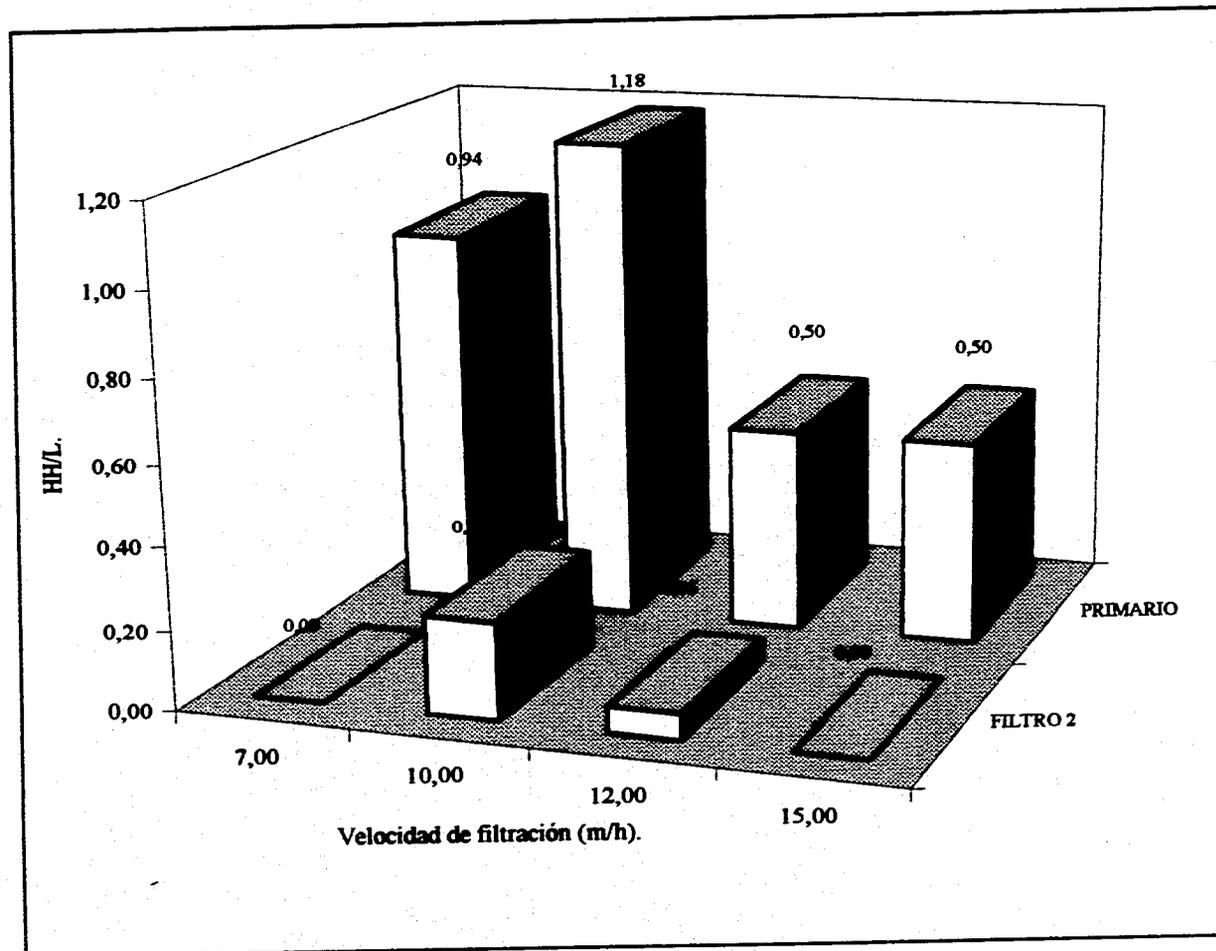
como lo muestran las Fig. 43 y 44 no fue posible establecer una relación entre la concentración de sólidos y huevos de helmintos, esto debido al intervalo tan corto de la concentración de los Helmintos; ya que los valores registrados en su mayoría son inferiores a 1, mientras que Murcott empleó durante la construcción de sus gráficas lecturas de Helmintos/L superiores a 20.

Por otra parte, también se realizó la determinación de huevos de Helmintos a los lodos colectados en el agua de retrolavado; la Tabla 20 muestra los valores registrados, en donde queda de manifiesto las altas concentraciones que aun conserva el efluente primario avanzado.

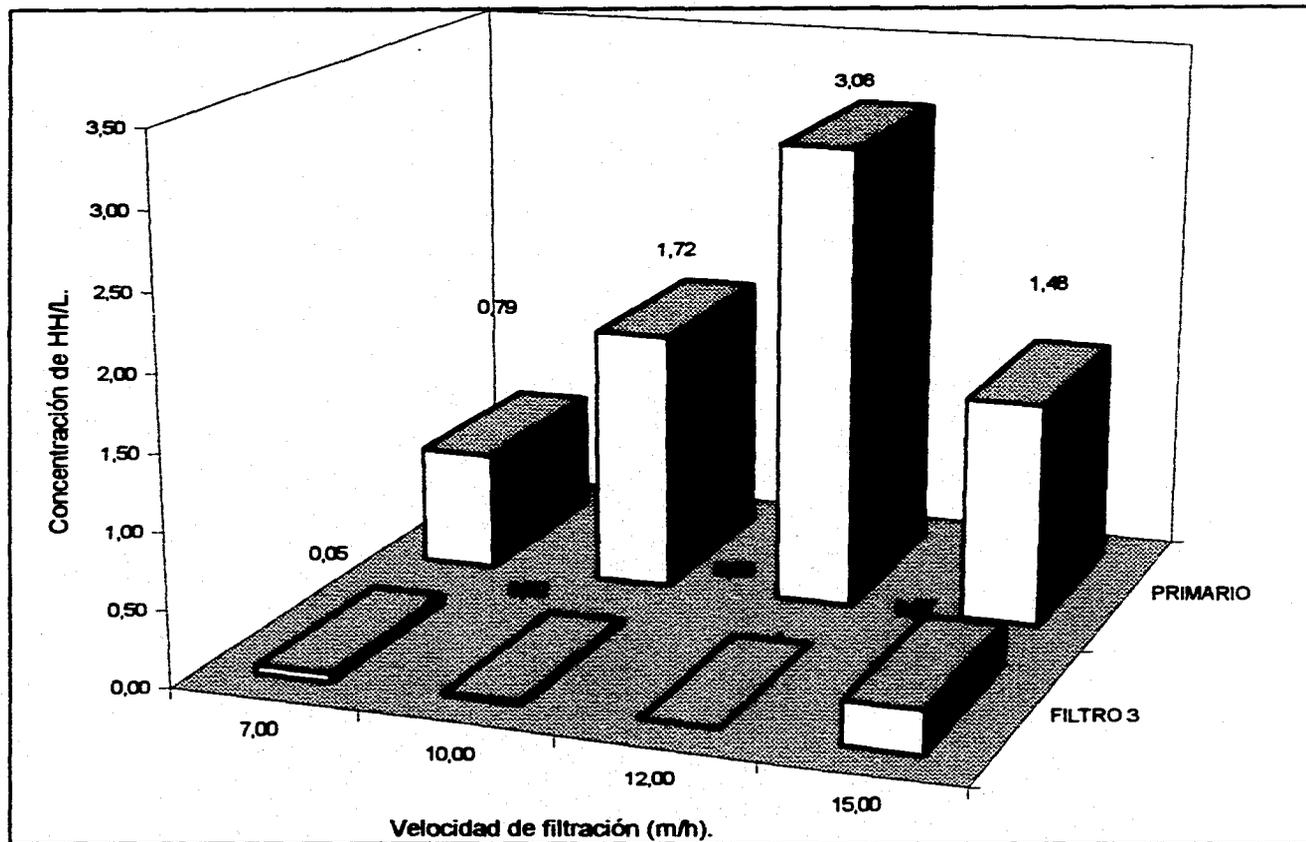
**Tabla 20. Concentración de HH/L en lodos de lavado.**

FILTRO 2			FILTRO 3		
MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
210	1 120	565	355	1 300	696

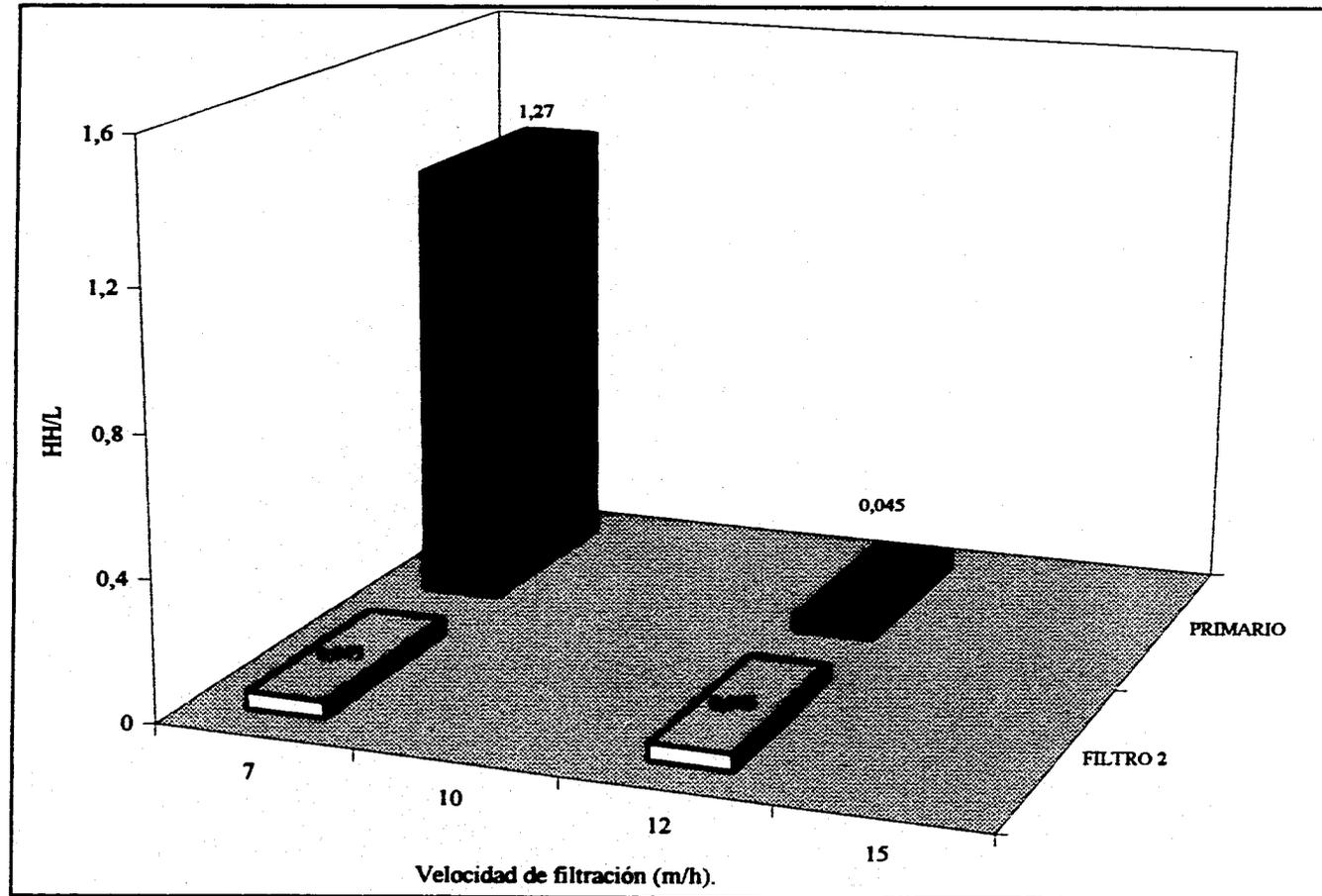
**Fig. 41-A Comportamiento promedio de HH: DGCOH. Filtro 2**



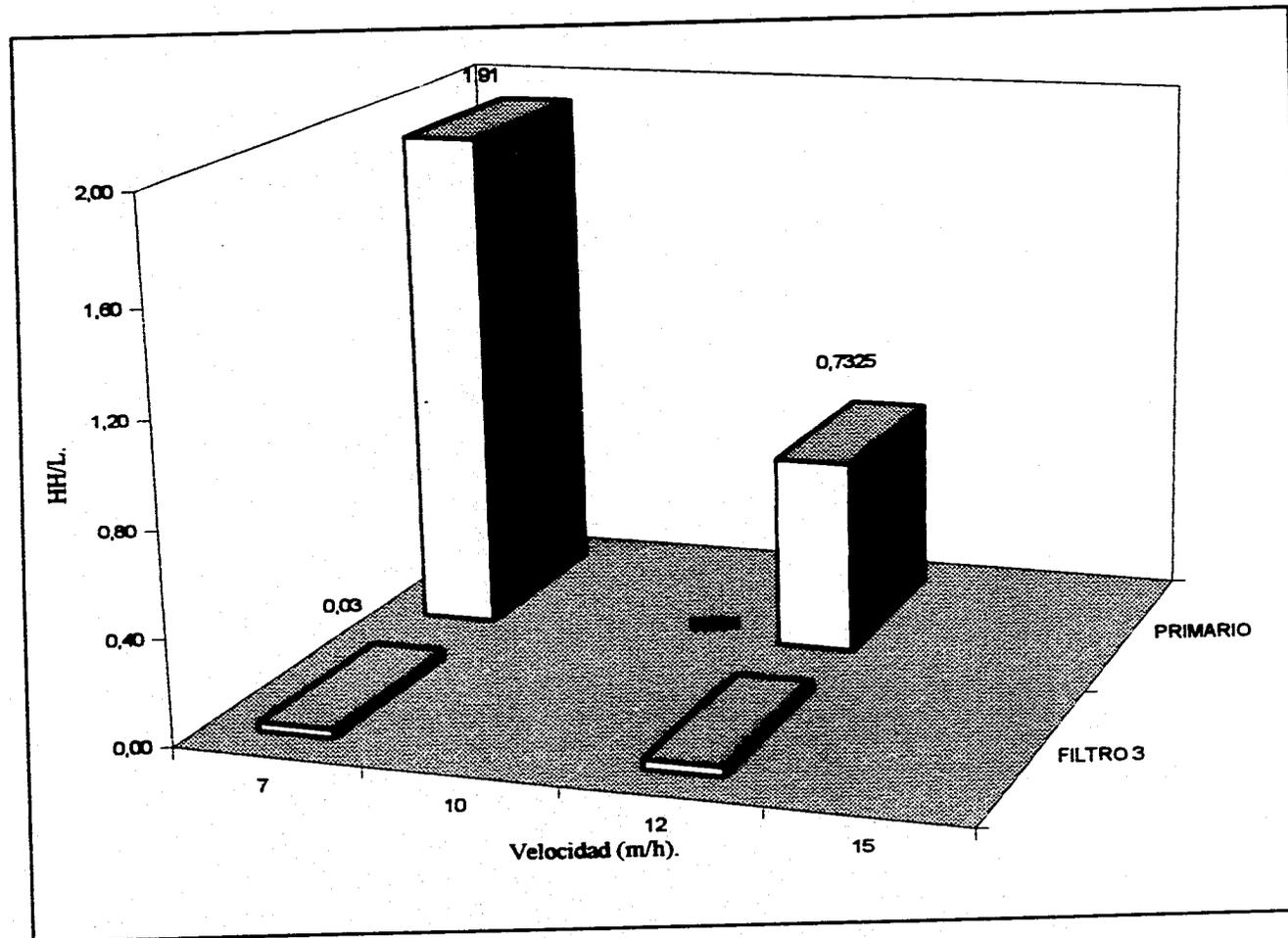
**Fig. 41-B Comportamiento promedio de HH: DGCOH. Filtro 3.**



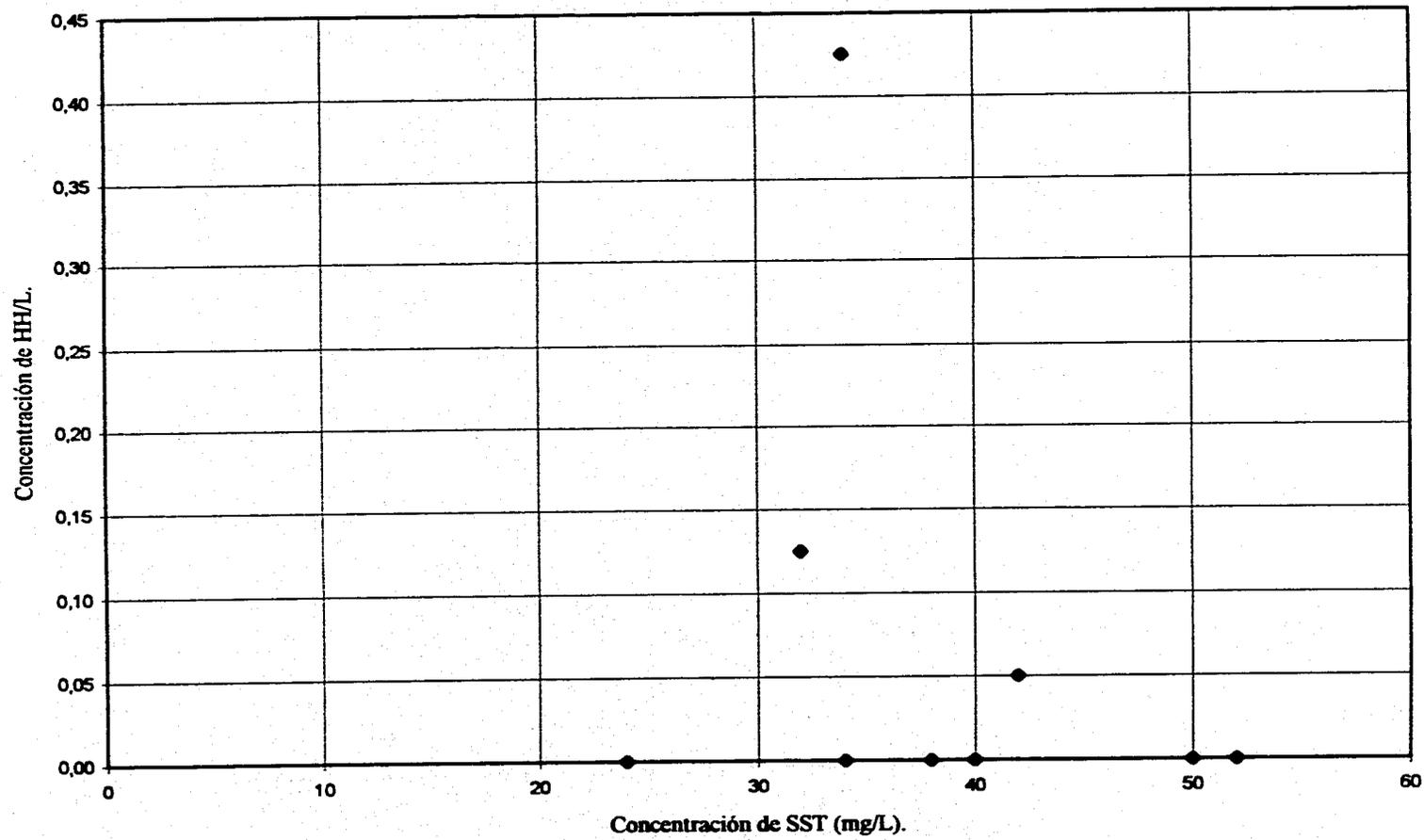
**Fig. 42-A Comportamiento promedio de HH: IMTA. Filtro 2.**



**Fig. 42-B Comportamiento promedio de HH: IMTA. Filtro 3.**



**Fig. 43-A. HH versus SST: DGC0H. Filtro 2.**



**Fig. 43-B. HH versus SST: DGCOH. Filtro 3.**

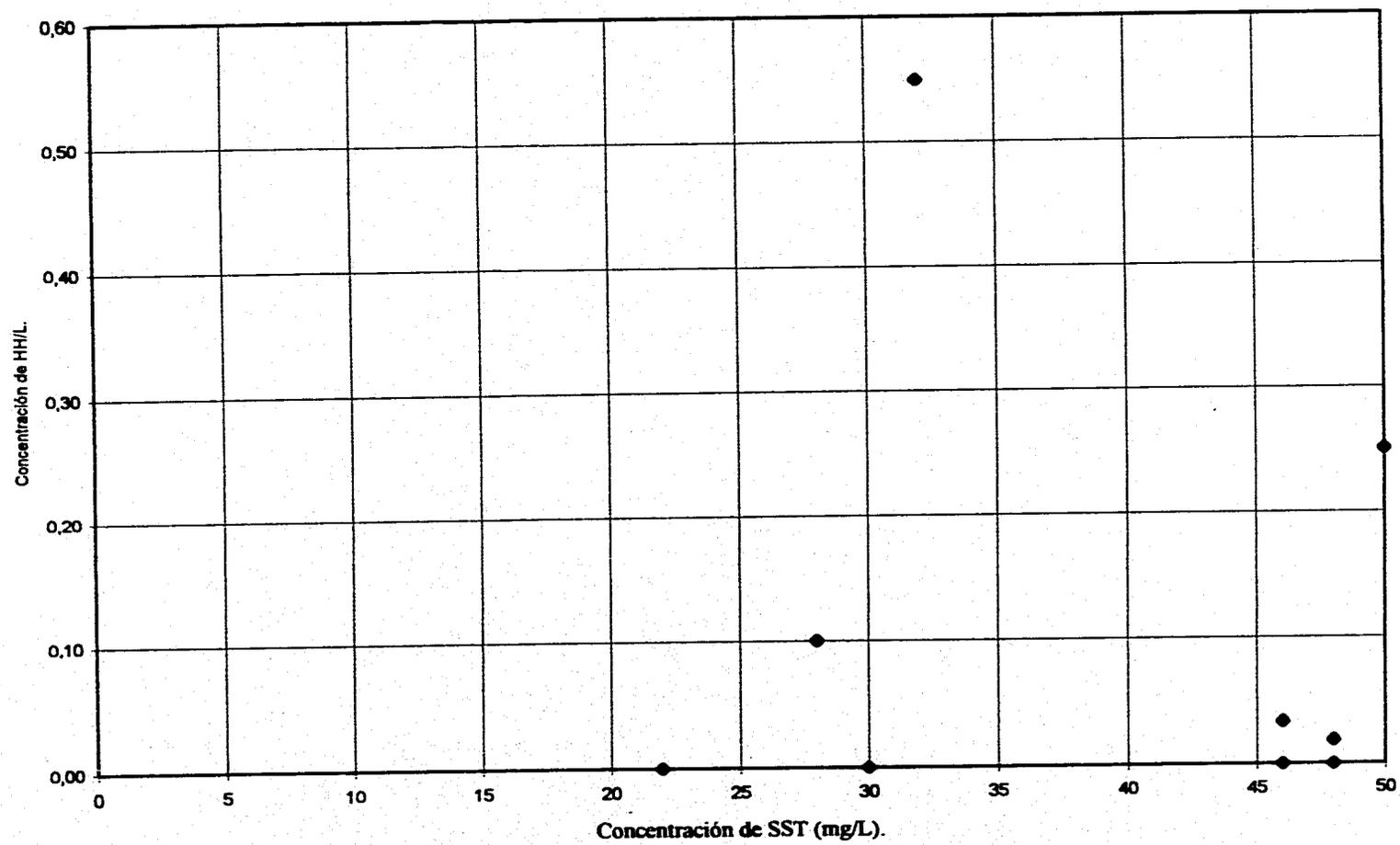
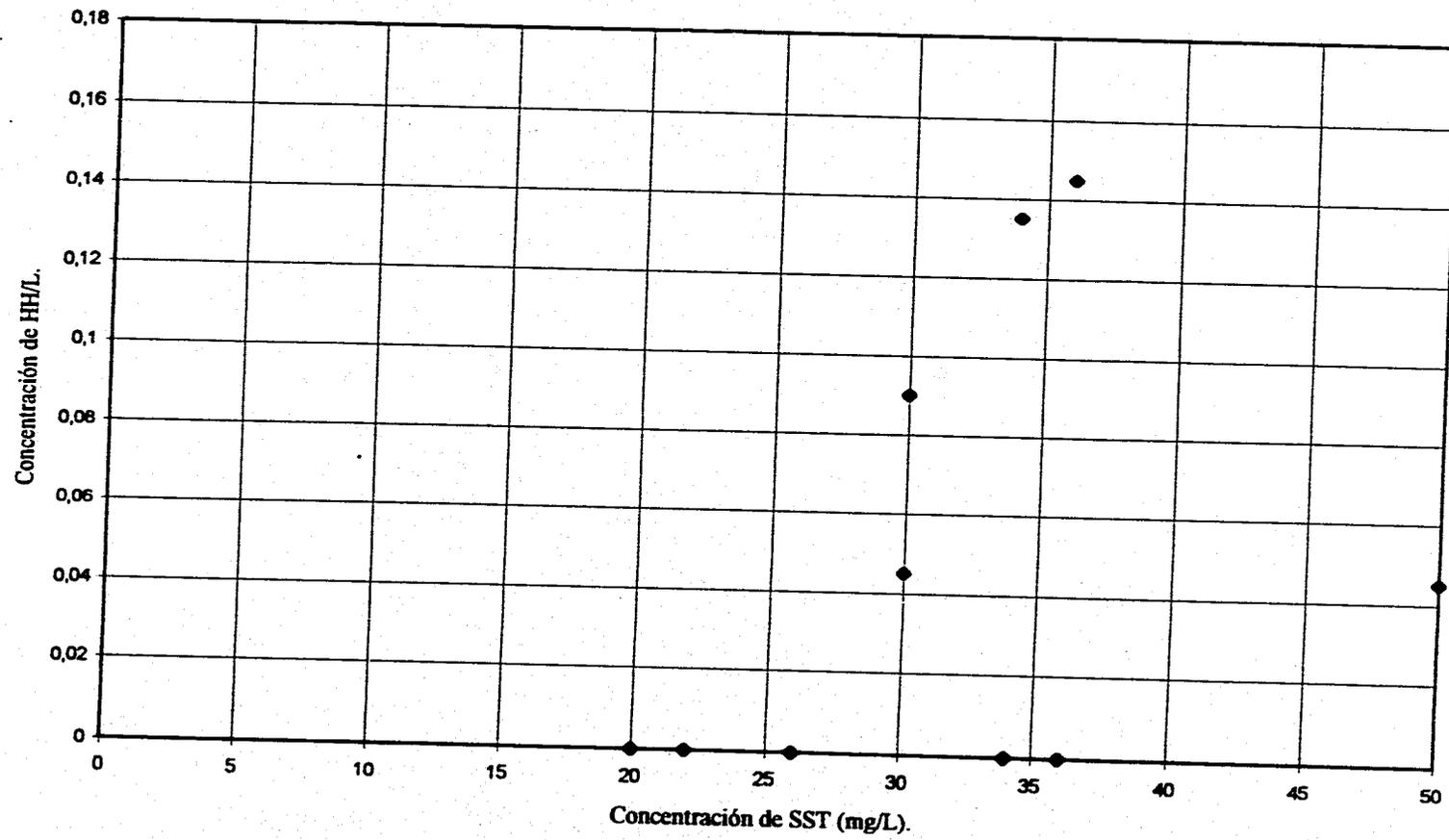
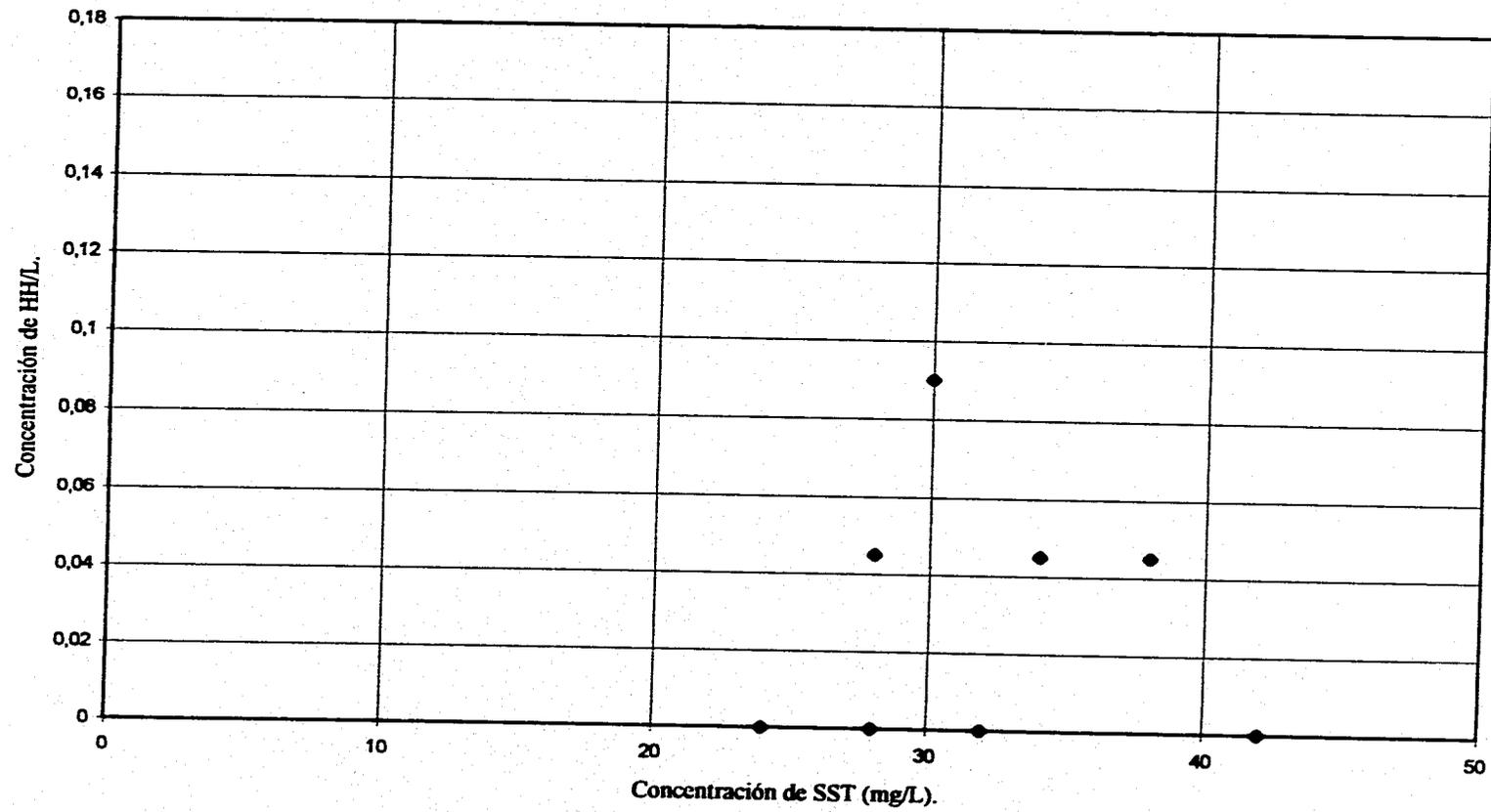


Fig. 44-A. HH versus SST: IMTA. Filtro 2.



**Fig. 44-B. HH versus SST: IMTA. Filtro 3.**



# Capitulo 4

#### 4. CONCLUSIONES.

Basado en los resultados presentados en este estudio, la calidad del agua que se obtiene durante la filtración de un efluente primario avanzado está relacionada con las características del influente, el tamaño efectivo del medio filtrante y la tasa de filtración.

El objetivo de este trabajo consistió en encontrar los parámetros que permitan un diseño adecuado y confiable para el sistema de filtración de TPA. Tal y como se propuso, se establecieron los siguientes **criterios de diseño**: a) características del material filtrante (TE 1.2 mm y CU de 1.6), b) espesor del lecho (1.0 m), c) duración de carrera ( $16 < h < 36$  h), d) tasa de filtración (10 m/h), e) tipo y frecuencia de lavado, f) producción y consumo de agua para lavado.

De donde los criterios de diseño que aquí se recomiendan para la ejecución a gran escala de un sistema de filtración, son los siguientes:

Material de empaque:	arena silícea.
Tamaño de medio:	1.2 mm.
Coefficiente de uniformidad:	1.6
Espesor de la cama filtrante:	1.0 m.
Velocidad de filtración.	10 m/h.
$\Delta p$ máx:	1.7 m.
Sistema de lavado:	agua.
Ciclos de lavado:	3.
Velocidad del primer ciclo	75-80 m/h (2 min.).
Velocidad del segundo ciclo:	45-55 m/h (2 min.).
Velocidad de enjuague:	75-80 m/h.
Volumen lavado/volumen filtrado:	3 %.

De los tres diferentes tamaños de arena (TE de 0.6, 0.8 y 1.2 mm) propuestos al inicio de la experimentación, se descartó desde un principio la arena de TE 0.6 mm; ya que cuando los filtros trabajaron con la velocidad más baja (7 m/h) la duración de carrera resultante fue inferior a 5 h. De acuerdo con Kawamura (1975), este tipo de filtro es antieconómico.

Se encontró que la arena silícea de TE 1.2 mm presenta los mejores tiempos de duración, es decir, para las velocidades de trabajo de 7, 10, 12 y 15 m/h los tiempos fueron de 16, 25, 32 y 38 h respectivamente; mientras que para la arena de TE 0.8 mm la duración de carrera fueron de 12, 18, 22 y 25 h para las velocidades anteriormente señaladas.

Con las cuatro tasas de filtración propuestas (7, 10, 12 y 15 m/h) se realizaron más de 50 corridas entre ambos filtros, con estos datos se generó un nomograma de diseño. Con dicha gráfica, es posible estimar la duración de corrida de un filtro conociendo la velocidad de filtración y el TE del medio.

Las altas velocidades (>12 m/h) aparentan no tener efectos significativos en la calidad del agua filtrada, lo cual confirma los comentarios citados en la literatura. La tasa de filtración óptima resultó ser de 10 m/h, ya que con la cual se tienen duraciones de carrera superior a las 24 h para ambos filtros.

Con una carga hidráulica disponible de 1.7 mca se observó un comportamiento a detalle de la pérdida de carga ( $\Delta p$ ). Se considera que el valor de la carga hidráulica utilizado es aceptable tal y como lo mencionan Kawamura (1975) y Young (1985). Ya que a mayor  $\Delta p$  se incrementa la concentración de SS retenidos presentando una gran compactación. Con un alto índice de compactación, los problemas que se generan repercuten en la expansión y expulsión de sólidos atrapados; por lo cual, se deben usar mayores tasas de lavado para lograr buenos resultados.

Otra de las metas planteadas al inicio de este trabajo, consistió en observar la eficiencia de remoción de los huevos de helmintos durante el proceso de filtración; lo cual se cumplió con eficiencia. Se registraron remociones del orden de 95% para el filtro de TE 1.2 mm y 96% para el filtro de TE 0.8 mm. Es decir, las concentraciones a la salida de los filtros fueron de 0.1 y 0.06 HH/L para el filtro de TE 1.2 mm y TE 0.8 respectivamente. Ambos valores de igual forma, cumplen tanto con la normatividad nacional como con la internacional para reúso en riego sin restricciones de cultivos. Por lo cual, el criterio de selección del TE de la arena depende únicamente de la duración.

La remoción de nutrientes, aunque no era lo que se buscaba, debido a que los suelos del Valle del Mezquital son nutricionalmente pobres y el aporte de nutrientes que realizan las aguas residuales se ve ampliamente reflejado en la alta productividad de la zona, se presentó en ambos filtros. En el filtro de TE 1.2 mm los porcentajes de remoción registrados tanto para el fósforo (P- $PO_4$ ) como para el nitrógeno total fueron en ambos casos del 9%. Por otra parte, para el filtro de TE 0.8 mm, los valores de remoción registrados fueron de 7 y 2% para nutrientes anteriormente señalados.

El empleo de un nuevo método de lavado en pruebas a nivel piloto fue una más de las aportaciones de esta investigación, dicho método demostró excelentes ventajas: buena eficiencia de lavado, bajo consumo de agua (< 3%), ahorro tanto del sistema de lavado con aire como del lavado superficial. Funcionó de manera satisfactoria, considerando las características del material. Se determinaron los ciclos (alto, bajo y enjuague) y tasa de lavado óptimas (de 45-55 m/h y 75-80 m/h).

Junto con la filtración de un TPA, surgió la inquietud dentro de un nuevo campo de investigación en México: el uso de la determinación del tamaño de partículas aplicado

al diseño, operaciones y monitoreo de sistemas de tratamiento de agua. Éste tan interesante campo de trabajo, tiene muy poco desarrollo a nivel mundial, por lo cual estamos en un muy buen momento para iniciar las investigaciones apropiadas y estar dentro de los principales países que aborden este campo. Inclusive se puede pensar, que conociendo el tamaño de las partículas presentes en un tipo específico de agua (tanto residual como potable), y al mismo tiempo saber que tipo de contaminantes se deben remover; es muy sencillo establecer el proceso y las etapas de tratamiento; con el correspondiente ahorro de tiempo, dinero y recursos humano.

Es decir, como un ejemplo a lo anterior, podemos mencionar que en lo que respecta a una determinación de los Helmintos, la técnica empleada requiere de aproximadamente dos días; mientras que una determinación del tamaño de partículas se lleva tan solo 5 minutos. Recordando que el tamaño promedio de los Helmintos oscila entre 20 y 80  $\mu\text{m}$  y que por otra parte, la capacidad de retención de un filtro de arena con TE 1.2 mm es hasta de 2  $\mu\text{m}$ . Con estas dos aseveraciones, es posible determinar la eficiencia inmediata del proceso de filtración, sin la necesidad de esperar a observar los resultados de la determinación tradicionales.

Este estudio no sólo ha demostrado la factibilidad de emplear a la filtración como un mecanismo para la remoción de los huevos de Helmintos, también ha generado antecedentes sobre la filtración de un efluente primario avanzado anteriormente inexistentes en el país. Toda la metodología y resultados aquí descritos sientan las bases para investigaciones posteriores, ya que la información disponible tanto a nivel nacional como internacional en este campo es mínima.

Con todos los datos anteriormente señalados, se tienen las herramientas necesarias para la ejecución de un macro proyecto; reduciendo los factores de incertidumbre que habitualmente se presentan en la gran mayoría de los diseños y obras realizadas en el país.

Dentro de las recomendaciones, es necesario seguir realizando pruebas de filtración con el mismo materia, es decir; emplear un TE de 1.2 mm pero con un efluente de mayor calidad dentro de un filtro de escala semi-industrial. Esto es, construir y operar un TPA con más altas remociones, para que de esta forma la filtración puede cumplir mucho mejor con sus propósitos tradicionales en cuanto a la remoción de sólidos.

# Capitulo 5

## 5. BIBLIOGRAFÍA.

Adin, A., Baumann, R. y Cleasby, J. (1979) "The application of filtration theory to pilot plant design". *Journal American Water Works Associations*, 71, 17.

Alon, Giora and Adin, Avner (1994) "Mathematical modeling of particle size distribution in secondary effluent filtration". *Water Environment Research*, 66, 836.

Amirtharajah A. y Cleasby J.L. (1972), "Predicting expansion of filters during backwash". *Journal of American Waters Works Association*. pp 52-59.

Amirtharajah A. (1978) "Optimum Backwashing of Sand". *Journal of Environmental Engineering Division*. Vol. EE5., pp 917-931.

Amirtharajah A. (1985). "The interface between filtration and backwashing" *Water Research* Vol. 19, No.5, pp 581-588

Amirtharajah A. (1988) "Some theoretical and conceptual views of filtration". *Journal of American Waters Works Association*. Diciembre, pp 35-46.

Arboleda J., Vargas F. y Correal H. (1969) "Manual de tratamiento de aguas potables". Programa de Ingeniería Sanitaria, Caracas, Venezuela. Publicación 30, pp 143-217

Arboleda V. J., (1973). "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". CEPIS/OMS, pp 296-558.

Arboleda J., Cleasby J. L. (1979) "Velocity Gradients in Granular Filter Backwashing". *Journal of American Waters Works Association (AWWA)*. Diciembre, pp 732-738.

AWWA (1989) "Procedure Manual for Polymer Selection in Water Treatment Plants". October 1989. USA.

Bauman, E.R. and Huang, J. Y. C. (1974) "Granular filters for tertiary wastewater treatment". *Journal Water Pollution Control Federation*, 46, 1958.

Baskerville, R.C. and Gale, R.S. (1968) "A simple Automatic Instrument for Determining the Filtrability of Sewage Sludges". *Water Pollution Control*, 67:233

Cifuentes, E., Blumenthal, M. J., Ruiz-Palacios, G. y Beneth, S. (1992). "Health Impact Evaluation of Wastewater in Mexico". *Public Health Revue*. 19: 243-250.

Blake, C. F. (1922) "The Resistance of Packing to Fluid Flow". American Institute Chemical Engineers., pp. 14-415.

Buitrón G. y Jiménez B. (1988). "Manual de operación de filtros de arena". Proyecto 7305. Contrato CC-86-323 D, elaborado para la SARH por el Instituto de Ingeniería. México.

Camp T., (1965) "Theory of water filtration (Discussion)". *Journal of Sanitary Engineering Division A.S.C.E.* Vol 91, octubre, pp 55-69.

Camp Th. R., Graber S. D., Conklin G. F. (1971) "Backwashing of Granular Water Filters". *Journal of the Sanitary Engineering Division A.S.C.E.* Vol 97, No. SA6, Diciembre pp 903-925.

CEPIS (1987). "Estudio de las modificaciones sugeridas por los consultores del CEPIS, para la planta potabilizadora Los Berros". México D.F.

Cleasby, J.L. *et al.* (1975) "Developments in backwashing of granular filters". *Journal Environmental Engineer Division American Society of Civil Engineer*, 101, 713.

Cleasby J. y Woods C. (1975) "Intermixing of dual media and multimedia granular filters". *American Water Works Association*. Vol. 67, No 4, April, pp 197-203.

Cleasby J., Stangl E y Rice G. (1975) "Developments in Backwashing of granular Filters". *Journal on the Environmental Engineer Division*. EES, pp 713-727.

Cleasby J. L. and Baumann E. R. (1977) "Backwash of Granular Filters Used in Wastewater Filtration" EPA-600/2-77 MERL, U.S. Environmental Protection Agency.

Cleasby J., Arboleda J., Burns D., Prendiville P. y Savage E. (1977) "Backwashing of granular filters". *Water Research* Vol.69, No 2, pp 115-126.

Cleasby J., y Lorence J. (1978). "Effectiveness of backwashing for wastewater filters". *Journal of the Environmental Engineer Division*. Agosto, pp 749-765.

Cleasby J. L., Fan Kuo-shu (1981) "Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media". *Journal of Environmental Engineering Division*. Vol. 107, No.EE3, Junio, p.p 455-471.

Cleasby J. L., Dharmarajah A. H. (1987) "Comparison of Backwash Models for Granular Media" pp 472-473.

Comisión Nacional del Agua (1993). "Resultados de la red estatal de monitoreo en Hidalgo a partir de 1985-1993". México.

CRANE (1989). "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" Mc Graw-Hill, México D.F.

- Darby, J. L., Lawler, D. F., Wilshusen, T. P. (1991) "Depth filtration of wastewater: Particle size and ripening". *Research Water Pollution Control Federation*. 63, 228.
- Dawda, M. M., Davidson, M.L. and Middlebrooks, E.J. (1978) "Granular media filtration of secondary effluent". *Journal Water Pollution Control Federation*. 50, 2143.
- Deb Arun K., (1969) "Theory of sand filtration" *Journal of the Sanitary engineering division. Proceedings of the ASCE*. Vol. 95, No.3, Junio pp 399-542.
- Dharmarajah A. H., Cleasby J. L. (1986) "Predicting the Expansion Behavior of Filter Media". *Journal of American Waters Works Association*. Diciembre, pp 66-76.
- Dharmarajah A. H., Cleasby J. L. (1987) "Expansion of Granular Filters During Backwashing". *Journal of Environmental Engineering Division*. Vol. 115, p.p 469-471.
- Diaper E., Ives K. (1965) "Filtration through size-graded media" *Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE*. SA3 pp 89-114.
- Fair Geyer J. y Okun D.(1979). "Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales" Ed. Limusa.
- Francois R. y Van Haute A. (1985) "Backwashing and conditioning of a deep bed filter". *Water Research*, Vol 19, No 11, pp 1357-1362
- Gregory,Ross (1972). "Backwashing of granular water filters". *Journal of Sanitary Engineering Division A.S.C.E*. No. SA4, Vol 98, Agosto,pp 680-681.
- Hamann C. L., McKinney R. E., (1967) "Upflow Filtration Process". *Journal American Water Works Association*. Vol 60, No. 9, Septiembre, pp 1023-1039.
- Hill F. (1962). "Communications on some Aspects Up flow Filtration". *Journal Institute Water Engineering*, Vol 16 pp 336.
- Hirsch A. (1968) "Filter Backwashing test and upflow equalization" *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* Vol 94, No 1, pp 129-146
- Hudson H. (1963) "Functional Design of rapid Sand Filters". *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol 89. No 1, pp 17-28.
- Ives, K.J., (1960) "Rational Design of Filters". *Institution of Civil Engineerings*. Vol. 16, London, England. pp 189.

- Ives K. J., Sholji I., (1965). "Resarch on variables affecting filtration" *Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineerings*, Vol 91, No. 4, Agosto pp 1-19.
- Iwasaki, T. (1937) "Some Notes on Sand Filtration". *Journal American Water Works Association*. Octubre. 29:10:1591.
- Jiménez C., B. (1995). "Filtración". Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM. México.
- Jiménez B., Buitrón G., Vega E., Silva A. y Becerril J. (1989). "Proyecto funcional y análisis de diferentes tipos de bajodrenes para filtros de plantas potabilizadoras". Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Jiménez, B., Bribiesca y Chávez, C. (1995). "Modelación Matemática y Calibración de un Nuevo Método de Lavado de Filtros Profundos". Instituto de ingeniería; UNAM. México
- Jiménez, B., Chávez, A. y Hurtado, C. (1995). "Tratabilidad del agua residual del Valle de Mexico". Informe para la Comisión Nacional del Agua. México.
- Johnson R. and Cleasby J. (1966) "Effect of backwashing on filter effluent quality". *Journal of the Sanitary Engineering Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers*. Vol 92, No 1, pp 215-229
- Jung H. y Savage E. (1974) "Deep Bed Filtration". *Journal American Water Works Association*. Vol 66, No. 2, pp 73-78
- Kawamura S. (1975). "Design and operation of High-Rate Filters-Part 1, 2 and 3". *Journal of American Waters Works Association*. Octubre, November and December.
- Kuo, Jih-Fen, *et al* (1994) "Evaluation of four different tertiary filtration plants for turbidity control". *Water Enviroment Research*, 66, 879.
- Matsumoto M. R., Galeziewski T. M., (1982). "Filtration of Primary Effluent". *Journal of Water Pollution Control Federation*. Vol. 54, No. 12, Diciembre pp 1581-1591.
- Metcalf & Eddy Inc., (1991) "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". Mc. Graw-Hill Book Company, USA.
- Murcott, S. (1995). "Ecatepec Pilot Plant and Jar Test Result with Aluminum Sulfate Polymer". *Massachusetts Institute of Technology*. USA.
- Oeben R., Haines H. y Ives K. (1967). "Comparison on Normal and Reverse grades filtration". *Journal American Water Works Association*. pp 429-439.

Quaye B. (1987) "Predicting optimum backwash rates and expansion of multimedia filters" *Water Research* Vol.21 No 9, pp 1077-1087

Ooten, R.J., Shao, Y.J., Soroushian, F. y Crosse, J. (1991). "Southern California Secondary Equivalency Treatment Research and Operational Projects". 66th Annual Conference & Exposition. Anaheim, California; USA. October 3-7. *Water Environment Federation*. pp 95-106.

Shao, Y. J., Lui, A., Jenkins, D., Wada, F. Y Crosse, J. (1993). "Advanced Primary Treatment: an Alternative to Biological Secondary Treatment". The City of Los Angeles (CA); Hyperion.

Siemak, R. C. (1984) "Tertiary Filtration: Practical design considerations" *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 56, No. 8, August, pp 944-949.

Skrentner, Robert (1989) "Instrumentation". Handbook for water and wastewater treatment plants. Lewis Publishers.

Sotomayor, C., Vásquez, B., Aguilar, F. y Croda, R. (1994). "Identificación de Helmintos". *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (SMISA)*. Año 7, No. 23. México.

Steel, E.W. y McGhee, T.J. (1981). "Abastecimiento de agua y alcantarillado". Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona.

Stuart, G. Y Asano, T. (1990) "Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual". California State Resource Control Board. USA.

Tchobanglous G. and Eliassen R., (1970) "Filtration of treated sewage effluent". *Journal of the Sanitary Engineering Proceeding of the American Society of Civil Engineers*. No.2, April, pp 243-265.

Water Pollution Control Federation, (1977). "Wastewater Treatment Plant Design: WPCF Manual of Practice No. 8". USA.

Weber W., (1972) "Physicochemical Processes for Water Quality Control" Wiley Interscience, USA.

Young, J. C. (1985) "Operating problems with wastewater filters". *Journal Water Pollution Control Federation*, 57, 22.

**Anexo A**

## **ANEXO A.**

### **A-1. Determinación de la curva granulométrica.**

La determinación de la curva granulométrica es un análisis que se emplea no sólo en el tratamiento de agua sino, en general, para caracterizar cualquier material granular como se requiere en mecánica de suelos, la industria de la construcción, etc. El procedimiento consiste en:

- a). Colocar la muestra de arena (se recomienda de 100 a 1000 g) en un juego de tamices estandarizados de tamaño consecutivo (TABLA A-1) dispuesto en orden decreciente de apertura y efectuar un cribado intenso durante 5 minutos como mínimo en un agitador mecánico (Rot-tap).

**TABLA A-1 SERIE AMERICANA DE TAMICES.**

<b>SERIE No.</b>	<b>APERTURA mm</b>
100	0.140
70	0.210
50	0.297
40	0.420
30	0.595
20	0.841
16	1.190
12	1.680
8	2.380
6	3.360
4	4.760
1/4	6.360
3/8	9.510
1/2	12.700
3/4	19.000
1	25.400

- b). Se pesa la arena retenida en cada malla y se calcula en porcentaje que representa del total de la muestra

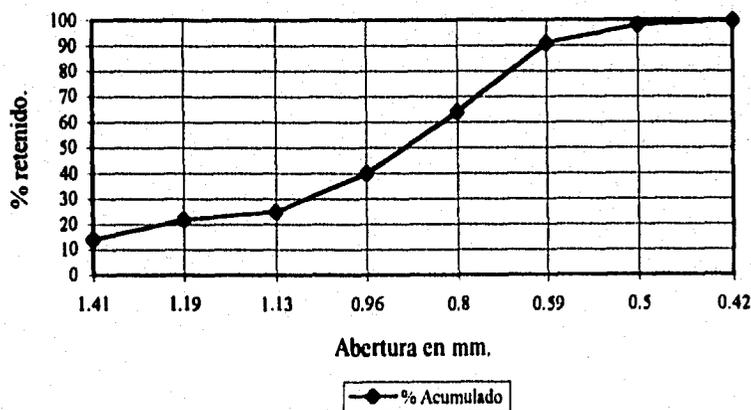
- c). Se suman los porcentos anteriores en forma acumulativa para cada tamaño con el objeto de obtener el porcentaje retenido acumulado en cada malla, es decir, la fracción que es mayor que el tamaño de la apertura correspondiente y que por tanto no pasa a los tamices menores.

- d). Se calcula la fracción del material que es mayor que el tamaño de la criba correspondiente, restándole al 100% cada uno de los valores anteriores.
- e). Se gráfica en papel semilogarítmico la apertura de la malla en mm contra el porcentaje que pasa acumulado y se obtiene la curva granulométrica.
- f). El TE (tamaño efectivo) se obtiene leyendo el valor de la apertura para el 10% y representa el tamaño de la décima parte del material que pasa la criba y que determina la eficiencia de filtración.
- g). El valor de CU (coeficiente de uniformidad) se calcula dividiendo los tamaños correspondientes al 60 y 10% de dicha curva. En las TABLA A-2, A-3 y A-4 se presenta el cálculo que ilustran las FIG. A-1, A-2 y A-3.

TABLA A-2 DETERMINACIÓN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA FILTRO I

Malla No.	Abertura mm.	Peso gr.	% Retenido	% Acumulado.
12	1.41	70	14	14
14	1.19	40	8	22
16	1.13	15	3	25
18	0.96	75	15	40
20	0.80	120	24	64
30	0.59	135	27	91
35	0.50	35	7	98
40	0.42	10	2	100

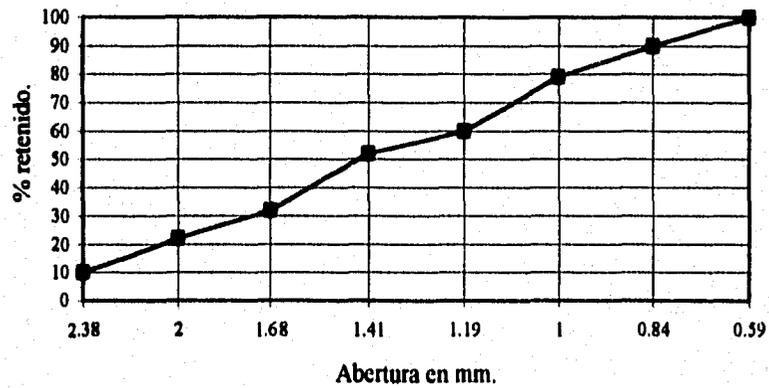
FIG. A-1 CURVA GRANULOMETRICA: FILTRO 1.



**TABLA A-3. CALCULO DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA FILTRO 2**

Malla No.	Abertura mm.	Peso gr.	% Retenido	% Acumulado
8	2.38	50	10	10
10	2.00	60	12	22
12	1.68	50	10	32
14	1.41	100	20	52
16	1.19	40	8	60
18	1.00	95	19	79
20	0.84	55	11	90
30	0.59	50	10	100

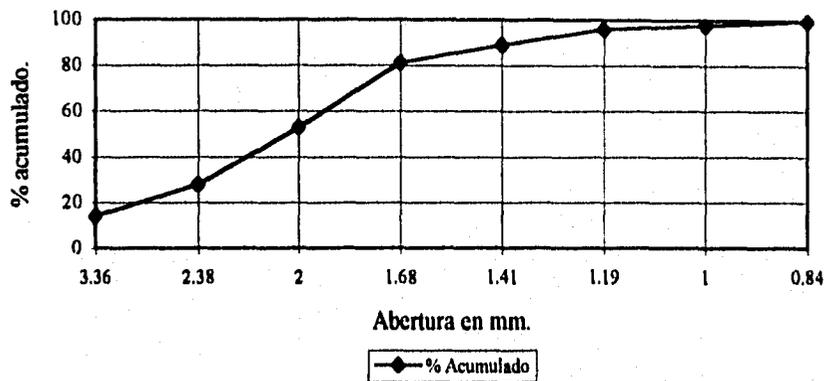
**FIG. A-2 CURVA GRANULOMETRICA: FILTRO 2**



**TABLA A-4. CALCULO DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA FILTRO 3**

Malla No.	Abertura mm.	Peso gr.	% Retenido	% Acumulado
6	3.36	70	14	14
8	2.38	70	14	28
10	2.00	125	25	53
12	1.68	140	28	81
14	1.41	40	8	89
16	1.19	35	7	96
18	1.00	10	2	98
20	0.84	140	2	100

FIG. A-3 CURVA GRANULOMÉTRICA : FILTRO 3



### A-2. Determinación de las características de la arena.

Otros ensayos que se realizan al medio filtrante son la solubilidad (para determinar qué tanto se dañará el medio con el tiempo), la ignición (para definir la resistencia), la densidad (para evaluar la fuerza requerida para el lavado) y la porosidad (para medir cuántos sólidos puede retener el empaque por unidad de volumen). A continuación se describe la forma de determinarlos en laboratorio.

#### A-2.1. Solubilidad.

##### A-2.1.1. Solubilidad en ácido clorhídrico.

##### Procedimiento:

- Se lava una muestra de 10 g con agua destilada, se seca a 103 °C en la estufa durante 24 horas y se pesa (a).
- Se sumerge la muestra en solución de HCl al 30% (en volumen), diluyendo 4 volúmenes de HCl en 10 de agua destilada.
- Se deja reposar la muestra 24 horas, entre 18 y 20°C
- Se seca, se lava con agua destilada, se seca y se pesa de nuevo (b)

##### Cálculo

$$\% \text{ Soluble} = \frac{(a - b)}{a} \times 100$$

### A-2.1.2 Solubilidad en hidróxido de sodio

#### Procedimiento:

- Se lava una muestra de 10 g con agua destilada, se seca a 103 °C en la estufa durante 24 horas y se pesa (a).
- Se sumerge la muestra en solución de NaOH al 10% (en volumen)
- Se deja reposar la muestra en la solución durante 24 horas, entre 18 y 20 °C
- Se seca, se lava con agua destilada, se seca y se pesa de nuevo (b)

#### Cálculo

$$\% \text{ Soluble} = \frac{(a - b)}{a} \times 100$$

### A-2.2. Ignición

#### Procedimiento:

- Sepone a peso constante una cápsula de porcelana colocándola en la mufla a 700 °C
- Se lava y seca 20 g de muestra
- Se coloca en la cápsula y se pesa (a).
- Se mete a la mufla durante 1 hora a 700 °C
- Se enfría en el desecador hasta temperatura ambiente y se pesa nuevamente (b)

#### Cálculo:

$$\% \text{ Perdidas por ignicion} = (a - b) \times 100$$

### A-2.3 Densidad real.

#### Procedimiento:

- La muestra se lava y se seca a 130 °C durante 24 horas. Se pesa una cantidad de arena (pa) y se hierve en 100 mL de agua destilada durante 5 min., con el fin de expulsar el aire retenido dentro de los poros.
- Se pesa un matraz aforado (pm)
- Se enfría la muestra y se introduce al matraz, se afora con agua destilada y se vuelve a pesar (pf)

#### Cálculos:

$$\text{Peso del agua} = pf - pm - pa$$

$$\text{Volumen del agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{densidad del agua}}$$

$$\text{Volumen de la muestra (vm)} = \frac{\text{Volumen de aforo}}{\text{Volumen de agua}}$$

$$\text{Densidad Real} = \frac{pa}{vm}$$

#### A-2.4 Densidad aparente

##### Procedimiento:

- La muestra se lava y se seca a 130° C durante 24 horas.
- Se enfría la muestra y se introduce a una probeta graduada, se agita y se deja la muestra asentar en su forma natural, si es necesario, se dan dos pequeños golpes en el fondo para que la arena asiente. Se mide el volumen (vm)
- Se pesa la cantidad de arena contenida en ese volumen (pa)

##### Cálculos:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{pa}{vm}$$

#### A-2.5 Porosidad

##### Procedimiento

- Se toma un volumen de muestra (V.M.) y se seca durante 24 horas y se vuelve a pesar (W.)

##### Cálculos

- a) . Se determina el volumen seco de la muestra ( $V_s$ ) a partir del peso seco ( $W_s$ ) y el peso específico ( $\rho_s$ )

$$V_s = \frac{W_s}{\rho_s}$$

- b) . El volumen de espacios vacíos  $V_v$  se obtiene restando el volumen medido (V.M.) del volumen seco ( $V_s$ )

$$V_v = VM - V_s$$

- c). El valor de la porosidad es la relación de volumen de espacios vacíos entre el volumen medido

$$Porosidad = \frac{V_v}{VM}$$

La porosidad se determina:

$$Porosidad = \frac{Densidad Real - Densidad Aparente}{Densidad Real}$$

# **Anexo B**

## **ANEXO B.**

En este ANEXO se muestra el comportamiento que presentó el filtro 1. La operación de dicho Filtro estuvo formada por dos etapas: a) arena (TE 1.1) y antracita (TE 2.2) y b) arena y antracita (TE 1.1).

El comportamiento que presentó el filtro 1, fue totalmente distinto a los dos filtros, por lo cual se decidió no presentar los resultados generados dentro del cuerpo del trabajo.

Dentro de variaciones que se presentaron fueron un menor número de carreras realizadas

### **B-1. Primera Etapa.**

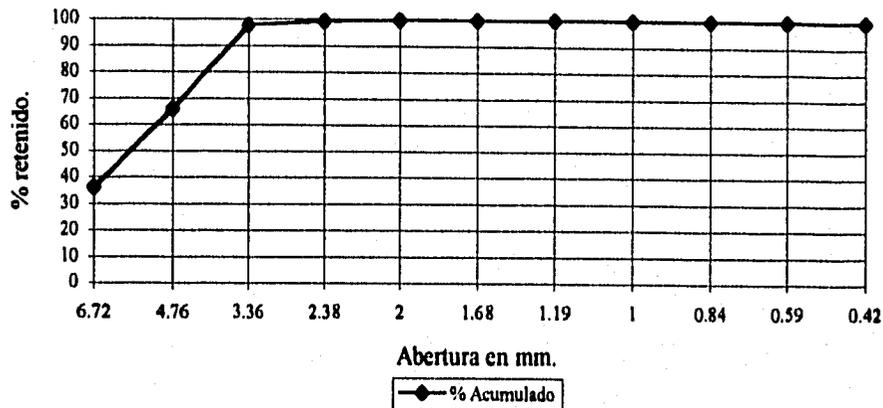
#### **B-1.1. Características del Medio Filtrante.**

Esta etapa estuvo caracterizada por el uso de un lecho filtrante doble. El material empleado fue arena y antracita. La elección del TE del material estuvo a cargo del Patrocinador del Proyecto. La TABLA B-1 muestra el cálculo de la curva granulométrica.

**TABLA B-1. DETERMINACIÓN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA.**

<b>Malla No.</b>	<b>Abertura mm.</b>	<b>Peso gr.</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulado</b>
1/4	6.72	181.00	36.20	36.20
4	4.76	149.00	29.80	66.00
6	3.36	159.00	31.80	97.80
8	2.38	8.00	1.60	99.40
10	2.00	1.50	0.30	99.70
12	1.68	0.50	0.10	99.80
16	1.19	0.59	0.11	99.91
18	1.00	0.13	0.03	99.94
20	0.84	0.07	0.01	99.95
30	0.59	0.07	0.03	99.98
40	0.42	0.09	0.02	100.00

FIG. B-1 CURVA GRANULIMÉTRICA.



**B-1.2. Comportamiento de la Primera Etapa.**

Tal y como lo muestra la TABLA B-2, solo 6 corridas se efectuaron.

TABLA B-2. COMPORTAMIENTO DEL FILTRO 1 (PRIMERA ETAPA).

No.	Duración (hr)	Pérdida de Carga (m)	Tasa (m/h)	SST Agua Cruda (mg/L)	SST Efluente Primario (mg/L)	SST Agua Filtrada (mg/L)	Agua Producida (m <sup>3</sup> )	% Lavado
1	9.5	1.55	7	96	58	45	2.086	23
2	24	1.15	7	86	50	45	5.256	9.3
3	72	1.53	7	88	57	33	15.768	4.4
4	42.5	1.28	7	102	56	38	9.308	2.8
5	38	0.90	7	130	52	46	8.322	3
6	26	1.55	7	124	47	34	5.694	9.1

**B-1.3. Problemas de operación.**

El principal y único problema que se presentó fue la ineficacia del lavado; esto debido al tamaño de material. De igual manera, al considerar las recomendaciones del patrocinador, la arena que se utilizó fue de TE 1.1. Al momento de llevarse a cabo el lavado, era necesario aplicar velocidades muy bajas (20 a 30 m/h) con el fin de evitar el intermezclado entre ambos materiales; al hacer esto, no se lograba la expulsión total de los sólidos atrapados y la formación de bolas de lodo era inminente.

## B-2. Segunda Etapa.

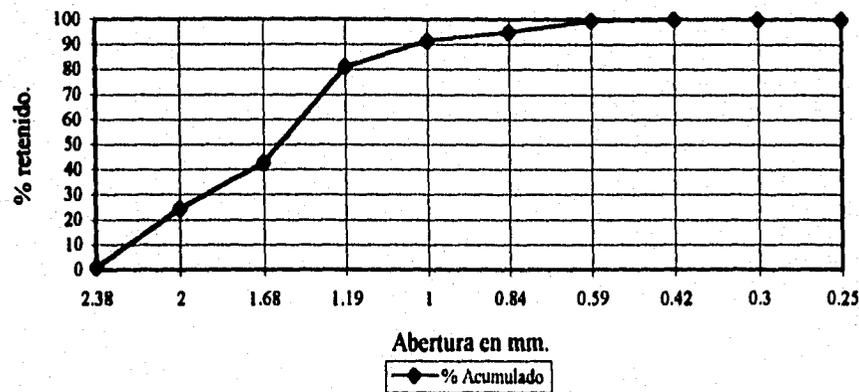
### B-2.1. Características del Medio Filtrante.

Nuevamente se empleó un lecho doble; solo que la relación entre los TE de ambos fue más acorde para evitar el intermezclado que se había presentado anteriormente. La TABLA B-2 presenta el cálculo de la curva granulométrica.

TABLA B-3 DETERMINACIÓN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA.

Malla No.	Abertura mm.	Peso gr.	% Retenido	% Acumulado
8	2.38	5.00	1.00	1.00
10	2.00	101.50	20.40	21.41
12	1.68	106.50	21.30	42.74
16	1.19	192.00	38.4	81.14
18	1.00	52.00	10.4	91.54
20	0.84	17.00	3.40	94.94
30	0.59	23.00	4.60	99.54
40	0.42	2.12	0.42	99.96
50	0.30	0.16	0.03	99.99
60	0.25	0.05	0.01	100.00

FIG. B-2 CURVA GRANULOMÉTRICA.



### B-2.2). Comportamiento de la segunda etapa.

En la TABLA B-4, se muestran los resultados generados con el empleo de antracita y arena de TE 1.1 y CU 1.1. Al comparar los valores de SST registrados en en el efluente, con los generados en los filtros 2 y 3, se ve claramente que no existió ninguna diferencia en cuanto a calidad del agua filtrada.

TABLA B-4 COMPORTAMIENTO DEL FILTRO 1

No.	Duración h.	Pérdida de carga mca	Tasa m/h	SST agua cruda mg/L.	SST primario mg/L.	SST efluente mg/L.	Agua Producida m <sup>3</sup>	% Lavado
1	37	1.50	7	186	80	34	6.40	6.40
2	17	0.72	12	164	75	40	6.40	5.00
3	13.5	0.44	15	152	72	52	6.35	3.92
4	21	1.66	12	115	55	38	7.91	2.52
5	18	1.68	12	99	55	39	6.78	2.00
6	22	1.69	12	98	53	33	8.29	2.43
7	19	1.67	12	107	57	37	7.16	3.00
8	12.5	1.69	15	108	44	31	5.88	3.00
9	26	1.64	10	117	60	37	8.16	2.56

### B-2.3. Problemas de operación.

La velocidad de lavado que se empleó fue del orden de 25 m/h; ya que al aplicar velocidades superiores, se generaba el fenómeno de intermezclado. El uso de esta velocidad no cumplía con los requisitos mínimos de lavado, durante el transcurso de la operación, en repetidas ocasiones se presentó la aparición de bolas de lodo; lo cual es un indicativo de la mala eficiencia del lavado. Ante esta situación, se comprueba que para un lecho doble, el lavado unicamente con agua no es el mas adecuado.

**Anexo C**

## ANEXO C

### Criterios de diseño empleados para la construcción de los filtros pilotos.

MATERIAL DE EMPAQUE		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
Arena	Arena. Kawamura, 1958	Es el medio mas económico
TE DEL MATERIAL		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
TE 0.6, 0.8 y 1.2 mm CU 1.6	CU=1.6 o mayor. Young, 1985  TE=0.55 mm CU=1.45, Kawamura, 1975 CU≤1.5. Matsumoto <i>et al.</i> , 1982 0.5-1.0 mm. ASCE, 1986 CU≤1.65. Tchobanoglous <i>et al.</i> , 1986 TE=0.45 y mayores CU=1.5 y menor. Geyer <i>et al.</i> , 1968 TE = 1.0. Adin <i>et al.</i> , 1979	Recomendable desde el punto de vista comercial     Según el tipo de drenes  El más empleado en los Estados Unidos.
ESPESOR DE CAMA DE ARENA		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
1.0 m	0.75 m. Kawamura, 1975 0.25-0.40 m. ASCE, 1986  0.6-0.75 m. Tchobanoglous <i>et al.</i> , 1986 0.76 m. Geyer <i>et al.</i> , 1968	Cuando la velocidad de operación es de 12 m/h.
PÉRDIDA DE CARGA		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
1.70 mca	< 3.0 m. Young, 1985  2 a 3 m. Kawamura, 1975  1.4 m. Matsumoto, <i>et al.</i> , 1982. 2 a 4 m. ASCE, 1986 2.44-2.74 m. Geyer <i>et al.</i> , 1968  3.0 m. Metcalf and Eddy, Inc. 1979	Pérdida de carga mayores ocasionan gran compresión del medio y sólidos atrapados. Formación de mudball y carreras de filtración muy cortas. Alturas mayores a los 3 m requieren de mayor presión durante el lavado. Aunque una altura de 1.8 m es adecuada, ya que es el punto donde se presenta la inflexión de la curva de pérdida de carga.  Considerando una penetración profunda de la materia suspendida.

VELOCIDAD DE FILTRACIÓN		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
7, 10, 12 Y 15 m/h	5 a 7 m/h. Kawamura, 1975 4.8 a 19.2 m/h. Matsumoto <i>et al.</i> , 1982  2.5 a 5 m/h. Tchobanoglous <i>et al.</i> , 1986 4.8 a 24 m/h. ASCE, 1986 5.0 - 36 m/h. Adin <i>et al.</i> , 1979.	Velocidades empleadas dentro de su modelo experimental con enfluyente biológico.
NÚMERO DE FILTROS		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
3	mínimo 3. Adin <i>et al.</i> , 1979 hasta donde sea posible un número máximo de filtros. Metcalf and Eddy, 1979	Flexibilidad de operación. construidos en paralelo para que reciban el mismo tipo de agua.
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
Acrílico	Material transparente. Adin <i>et al.</i> , 1979	Permiten la observación de las condiciones del medio. (mudball, agrietamientos, etc).
SECCIÓN TRANSVERSAL		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
D = 20 cm. A = 0.03141 m <sup>2</sup> .	A=0.4 m <sup>2</sup> . Matsumoto <i>et al.</i> , 1982 D ≥ 50 diámetro del grano máximo. Adin <i>et al.</i> , 1979  D=15 cm. Metcalf and Eddy, 1979.	Sección del modelo empleado Minimizar el efecto de pared. Las paredes afectan la porosidad de la cama a una distancia de aproximadamente de 3 a 4 veces el diámetro de la pared y el fenómeno de transporte de partículas que es influenciado a una distancia de 4 a 5 veces el diámetro del grano. Diámetro empleado durante la filtración que simula el comportamiento de un filtro real.
% DE AGUA DE LAVADO		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
> 2.3 %	3 A 10 %. Young, 1986  1-6 %. Geycr <i>et al.</i> , 1968	Valores mayores indican problemas de operación.
EXPANSIÓN DURANTE EL LAVADO		
MODELO FÍSICO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
9 A 18%	40%. Kawamura, 1985	

# **Anexo D**

**ANEXO D.**

**Análisis estadístico de los resultados de Huevos de helmintos.**

Fecha	Primario	Filtro 2	Filtro 3
4/07/95	3,03	0,00	
5/07/95	2,70		
6/07/95		0,05	
25/07/95	1,34	0,05	0,05
26/07/95	1,45	0,09	
27/07/95	0,45	0,14	0,05
1/08/95	2,50	0,15	0,05
2/08/95	0,00	0,00	
4/08/95		0,00	0,00
8/08/95	2,35	0,00	0,00
9/08/95	5,16		0,09
10/08/95	1,79	0,00	0,10
11/08/95	0,22	0,00	0,00
12/08/95	0,75	0,00	0,00
15/08/95	1,00	0,00	
16/08/95	2,10		0,10
17/08/95	1,22	0,00	
21/08/95	4,20		0,00
22/08/95	2,00	0,00	
23/08/95	0,00	0,00	0,00
24/08/95	0,40	0,00	0,00
25/08/95	0,30	0,00	0,00
26/08/95	0,33	0,00	
8/09/95	2,12		0,22
9/09/95	0,40		
12/09/95	1,13	0,00	0,08
13/09/95	0,68	0,00	0,05
15/09/95	0,66	0,05	
20/09/95	0,56	0,13	0,05
21/09/95	0,56	0,00	0,05
22/09/95	1,46	0,05	
27/09/95	2,47	0,05	
5/10/95			0,00
6/10/95		0,00	
10/10/95	0,78	0,05	
12/10/95	1,13		0,25
13/10/95	2,28		0,02
17/10/95	3,50	1,13	
18/10/95	1,05		0,55
19/10/95	1,90		0,03

Fecha	Primario	Filtro 2	Filtro 3
20/10/95			0,00
24/10/95	1,60	0,43	
25/10/95	1,50		0,05
n	38,00	30,00	26,00
Promedio	1,50	0,08	0,07
Desviación	1,17	0,22	0,12
Máximo	5,16	1,13	0,55
Mínimo	0,00	0,00	0,00

## D.1 Efluente primario

$$\eta = 38 \quad x = 1.50 \quad Sx = 1.17 \quad v = 37$$

$$1 - \alpha = 0.95 - 0.05 = 0.90$$

$$tc_{1-\alpha} = 1.645$$

### D.1.1 Aplicando "t"

$$P \left\{ \mu x \leq x + tc \frac{Sx}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.9$$

$$P \left\{ \mu x \leq (1.50) + (1.645) \frac{1.17}{\sqrt{37}} \right\} = 0.9$$

$$P \{ \mu x \leq 1.816 \} = 0.95$$

### D.1.2 Aplicando "z"

$$P \left\{ \mu x \leq x + z \frac{Sx}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.95$$

$$P \left\{ \mu x \leq (1.50) + (1.2) \frac{1.17}{\sqrt{37}} \right\} = 0.9$$

$$P \{ \mu x \leq 1.73 \} = 0.95$$

## D.2 Filtro 2 (0.8 mm y Cv = 1.6)

$$\eta = 30 \quad x = 0.08 \quad S_x = 0.22 \quad v = 29$$

$$1 - \alpha = 0.95 - 0.05 = 0.90$$

$$t_{c_{1-\alpha}} = 1.645$$

### D.2.1 Aplicando "t"

$$P \left\{ \mu_x \leq x + t_c \frac{S_x}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.9$$

$$P \left\{ \mu_x \leq (0.08) + (1.645) \frac{0.22}{\sqrt{29}} \right\} = 0.95$$

$$P \{ \mu_x \leq 0.147 \} = 0.95$$

### D.2.2 Aplicando "z"

$$P \left\{ \mu_x \leq x + z \frac{S_x}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.95$$

$$P \left\{ \mu_x \leq (0.08) + (1.29) \frac{0.22}{\sqrt{29}} \right\} = 0.95$$

$$P \{ \mu_x \leq 0.132 \} = 0.95$$

## D.3 Filtro 3 (1.2 mm y Cv = 1.6)

$$\eta = 26 \quad x = 0.07 \quad S_x = 0.12 \quad v = 25$$

$$1 - \alpha = 0.95 - 0.05 = 0.90$$

$$t_{c_{1-\alpha}} = 1.645$$

### D.3.1 Aplicando "t"

$$P \left\{ \mu x \leq x + t_c \frac{Sx}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.9$$

$$P \left\{ \mu x \leq (0.07) + (1.645) \frac{0.12}{\sqrt{25}} \right\} = 0.95$$

$$P \{ \mu x \leq 0.10948 \} = 0.9$$

### D.3.2 Aplicando "z"

$$P \left\{ \mu x \leq x + z \frac{Sx}{\sqrt{\eta - 1}} \right\} = 0.95$$

$$P \left\{ \mu x \leq (0.07) + (1.29) \frac{0.12}{\sqrt{25}} \right\} = 0.95$$

$$P \{ \mu x \leq 0.0707 \} = 0.95$$

### D.4 Efluente primario

$$H_0: \mu_x = 1 \quad x = 1.50$$

$$H_1: \mu_x < 1$$

$$\Gamma x = \frac{Sx}{\sqrt{n}} = \frac{1.17}{\sqrt{38}} = 0.18979$$

$$P \{ xc \leq \mu x + Zc (\Gamma x) \} = 0.95$$

$$P \{ xc \leq 1 + (1.29) (0.1897) \} = 0.95$$

$$P \{ xc \leq 1.2448 \} = 0.95$$

D.5 Filtro 2 (0.8 mm y Cv = 1.6)

$$H_0: \mu_x = 1$$

$$H_1: \mu_x < 1$$

$$\Gamma_x = \frac{S_x}{\sqrt{n-1}} = \frac{0.22}{\sqrt{29}} = 0.0408$$

D.5.1

$$P \{x_c \leq \mu_x + Z_c (\Gamma_x)\} = 0.95$$

$$P \{x_c \leq 1 + (1.29)(0.040)\} = 0.9$$

$$P \{x_c \leq 1.0516\} = 0.95$$

D.5.2

$$P \{x_c \leq \mu_x + t_c (\Gamma_x)\} = 0.95$$

$$P \{x_c \leq 1 + (1.699)(0.0408)\} = 0.9$$

$$P \{x_c \leq 1.0748\} = 0.95$$

D.6 Filtro 3 (1.2 mm y Cv = 1.6)

$$H_0: \mu_x = 1$$

$$H_1: \mu_x < 1$$

$$\Gamma_x = \frac{S_x}{\sqrt{n-1}} = \frac{0.12}{\sqrt{25}} = 0.024$$

D.6.1

$$P \{xc \leq \mu x + Zc(\Gamma x)\} = 0.95$$

$$P \{xc \leq 1 + (1.29)(0.024)\} = 0.95$$

$$P \{xc \leq 1.03\} = 0.9$$

D.6.2

$$P \{xc \leq \mu x + tc(\Gamma x)\} = 0.95$$

$$P \{xc \leq 1 + (1.708)(0.024)\} = 0.9$$

$$P \{xc \leq 1.04\} = 0.9$$

# **Anexo E**

### ANEXO E BITACORA DE FILTRACIÓN

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1								
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	
18/07/95	16:00	50			INICIO DE CARRERA 7 M/H.																		
	17:00		115					3															
	18:00	52						3															
	19:00						83	3															
	20:00	52	94		40	96	414	3															
	21:00		88		50	95	386	3															
	22:00	54	75		46	90	371	3															
	23:00		77		46	83	359	3															
	#####	46	73		40	86	381	3															
19/07/95	1:00		84		36	89	357	3															
	2:00	40	67		42	136	401	3															
	3:00		94					3															
	4:00	46	101		34	100	428	3															
	5:00		100					3															
	6:00	46	102		38	112	384	3															
	7:00		90					3															
	8:00	46	94		38	118	403	3															
	9:00							3															
	10:00	48	125	419	28	109	406	3															
	11:00							3															
	12:00	54	147	464	46	103	386	3															
	13:00							3															
	14:00	44	110	352	38	159	229	3															
	15:00							3															
	16:00	48	83,4	293	46	55	288	3															
	17:00							3															
	18:00	46			42	42	149	3															
	19:00		83,5					3															
	20:00	62	82,3		46	22	256	3															
	21:00		95,6					3															
	22:00	64	100		50	21	303	3															
	23:00		83,6					3															
	0:00	60	84,9		48	31	424	3															
20/07/95	1:00							3															
	2:00	70			58			3															
	3:00				FIN DE CARRERA																		

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1								
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	
20/07/95	13:30				INICIO DE CARRERA 7 M/H.																		
	14:00	62			52	181	494	3															
	15:00							3															
	16:00	56						3															
	17:00				48	113	590	3															
	18:00	56	89,8	403				3															
	19:00		75,5	376	44			3															
	20:00	58	72,3	369	40	95	482	3															





	21:00	50					3		7				2		7	38	62	373	1	7	
	22:00						3		7				2		7				1	7	
	23:00	54	82	368			3		7				2		7				1	7	
	<del>00:00</del>	54	124	514	30	40	278	3	7	44	41	414	2	7	30	55	372	1	7		
28/07/95	1:00						3		7				2		7				1	7	
	2:00		126				3		7				2		7				1	7	
	3:00						3		7				2		7				1	7	
	4:00	66	130		34	34	55	3	291	7	60	85	378	2	7	48	70	335	1	7	
	5:00		120	458			3		7				2		7				1	7	
	6:00						3		7				2		7				1	7	
	7:00		103				3		7				2		7				1	7	
	8:00	48	102	384	36	36	49	3	261	7	44	68	348	2	7	28	67	332	1	7	
	8:30						3		7				2		7				1	7	
	9:00		103				3		7				2		7				1	7	
	10:00		69				3		7				2		7				1	7	
	11:00	48	94	374	36	36	49	3	551	7						60	279		1	7	
	12:00		82				3		7										1	7	
	13:00				36	90	439	3	7										1	7	
	14:00	60	72	332			3		7										1	7	
	15:00		83		48		3		7								48	286		1	7
	15:00																			1	7
	16:00																			1	7
	17:00																			1	7
	18:00	52	108	437													56	305		1	7
	19:00																			1	7
	20:00																			1	7
	21:00	50	137														56	264		1	7
	22:00	68	137	480																1	7
	23:00																			1	7
	<del>00:00</del>	54	82	368													45	232		1	7
29/07/95	1:00	60	110	393																1	7
	2:00		115																	1	7
	3:00	43	116	380																1	7
	4:00	48	130	458													34	62	289	1	7
	5:00	58	131																	1	7
	6:00																			1	7
	7:00		126																	1	7
	8:00	38	103	388													38	55	260	1	7
	8:10																			1	7

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO				FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1							
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	
31/07/95	15:30																						
	16:00	62	86	363	86	84	84	3	7	44	73	73	2	7									
	16:30							3	7	60			2	7									
	17:00								7					7									
	17:30								7					7									
	18:00	56	122	469	36	90	439	3	7	48	72	386	2	7	48	89	406	1	7				
	19:00		88	373				3	7				2	7									
	20:00		115					3	7				2	7									
	21:00	50	72	332	36	85	350	3	7	42	73	309	2	7	46	83	354	1	7				
	22:00		88					3	7				2	7									
	23:00							3	7				2	7									

1/08/95	#####	44	61	286	46	46	57	3	315	7	44	43	274	2	7	44	58	323	1	7		
1:00								3		7				2	7				1	7		
2:00			125	465				3		7				2	7				1	7		
4:00	68	137	480		74	348		3		7	32	53	290	2	7	38	81	394	1	7		
5:00			122					3		7				2	7				1	7		
6:00								3		7				2	7				1	7		
8:00	60	110		38	38	83		3	383	7	36	66	316	2	7	38	95	398	1	7		
10:00								3		7				2	7				1	7		
11:00	48	119	380	50	64	317		3		7	44	56	274	2	7	50	89	377	1	7		
11:30								3		7	60			2	7				1	7		
12:00	68	86	365	40				3		7				2	7	38			1	7		
14:00	58	89		44		58		3	251	7	46	48	273	2	7	52	87	366	1	7		
15:00								3		7				2	7				1	7		
16:00				60	52			3		7				2	7				1	7		
18:00	58	127	482	50		39		3	274	7	52	39	267	2	7	52	61	376	1	7		
18:30								3		7	FIN DE CARRERA											
19:00	58	97	402					3		7									1	7		
20:00		61						3		7									1	7		
21:00	58	118	443	52		42		3	253	7									1	7		
22:00	66	114	485					3		7									1	7		
23:00								3		7									1	7		
#####	58	122	469	62	65	355		3		7									1	7		
2/08/95	1:00							3		7								54	316	1	7	
2:00			85					3		7									407	1	7	
3:00								3		7										1	7	
4:00	58	88	373	50	48	276		3		7						48	42	248	1	7		
5:00								3		7										1	7	
6:00	46	95						3		7									501	1	7	
7:00	48	89	359					3		7									455	1	7	
8:00	54	125						3		7									52	265	1	7
9:00			93					3		7										1	7	
10:00	46	54	281					3		7										1	7	
11:00			99					3		7										1	7	
12:00								3		7										1	7	
FIN DE CARRERA																						

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1							
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA
3/08/95	17:30	66			INICIO DE CARRERA 7 M/H.																	
	18:00	68			64	100	517	3		7	60	105	507	2		7	64	123	526	1		7
	18:30				70	104	478	3		7	64	98	481	2		7	66	110	490	1		7
	19:00	64			60	96	474	3		7	60	87	463	2		7	60	103	483	1		7
	20:00							3		7				2		7				1		7
	21:00	58	97	402	52	83	425	3		7	52	75	417	2		7	56	69	411	1		7
	22:00							3		7				2		7				1		7
	#####	66	114	489	56	83	483	3		7	52	84	411	2		7	58	78	417	1		7
4/08/95	1:00			109				3		7				2		7				1		7
	2:00			92		396		3		7				2		7				1		7
	3:00	52		101		370		3		7				2		7				1		7
	4:00	52		116	434			3	348	7	46	83	358	2		7	40	70	326	1		7
	5:00	54	44.9	240				3		7				2		7				1		7
	5:30	48						3		7	40			2		7	34			1		7
	6:00			68				3		7				2		7				1		7
	7:00	54	56	235				3		7				2		7				1		7

	8:00	48	89	359	42	42	61	3	303	7	42	56	289	2	7	40	55	278	1	7					
	9:00		80,3					3		7				2	7				1	7					
	10:00	48	66,5	276				3		7				2	7	54			1	7					
	11:00	46	54	281	40	31	218	3		7	34	45	235	2	7	36	35	207	1	7					
	12:00							3		7				2	7				1	7					
	13:00	38	71,3	328				3		7				2	7				1	7					
	14:00		71,3			41	262	3		7	40	275	2	7		44	217	1	7						
	15:00		99,8					3		7				2	7				1	7					
	16:00	50	99,9	383				3		7				2	7				1	7					
	18:00				40			3		7	38			2	7	40			1	7					
	19:00		88	298		33	238	3		7		31	226	2	7		41	265	1	7					
	20:00	54	84,3	435				3		7				2	7				1	7					
	21:00	56	112	449	38			3		7				2	7				1	7					
	22:00		84,7					3		7	52			2	7				1	7					
	#####	56	106	508	38	32	238	3		7	52	31	223	2	7	46	34	233	1	7					
5/08/95	1:00		86,3					3		7	FIN DE CARRERA													1	7
	3:00							3		7	FIN DE CARRERA													1	7
	4:00	60	110	467	46	38	236	3		7	FIN DE CARRERA										30	44	247	1	7
	5:00	68	133					3		7	FIN DE CARRERA													1	7
	6:00							3		7	FIN DE CARRERA													1	7
	8:00	62	92	396				3		7	FIN DE CARRERA										30			1	7
	8:30							3		7	FIN DE CARRERA													1	7
	9:00							3		7	FIN DE CARRERA													1	7

**ANTRACITA 2.2 Y ARENA T.E. 1.1**

FECHA	HORA	EPEDIENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1								
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQOR	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQOR	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQOR	TASA	
7/08/95	14:00	52	101	370	INICIO DE CARRERA 7 M/L					INICIO DE CARRERA 7 M/L					INICIO DE CARRERA 7 M/L								
	14:30				42	113	473	3	7	40	119	492	2	7	54	101	467	1	7				
	15:00	50	94	372	44	113	461	3	7	38	116	466	2	7	48	95	418	1	7				
	16:00	54	44,9		30			3	7	22			2	7	34			1	7				
	17:00		100					3	7				2	7				1	7				
	18:00	54	56	240	32	84,2	349	3	7	28	79,2	346	2	7	44	56,5	295	1	7				
	19:00		79					3	7				2	7				1	7				
	20:00	46	67	301				3	7				2	7				1	7				
	21:00	48	66,5	276	32	54,4	284	3	7	26	68,1	301	2	7	28	38,7	238	1	7				
	22:00		80					3	7				2	7				1	7				
	23:00							3	7				2	7				1	7				
	#####	38	71,3	328	20	51,5	286	3	7	18	56,4	287	2	7	32	35,3	286	1	7				
8/08/95	1:00							3	7				2	7				1	7				
	3:00		104					3	7				2	7				1	7				
	4:00	62		383	22	56	377	3	7	16	48,6	377	2	7	28	45,1	232	1	7				
	5:00		107					3	7				2	7				1	7				
	8:00	36	84,3	345	26	26,2	173	3	7	18	42,9	212	2	7	18	29,6	165	1	7				
	9:00		98			123		3	7				2	7				1	7				
	10:00							3	7				2	7				1	7				
	11:00	92	121	508	32	45		3	7	22	48		2	7				1	7				
	12:00							3	7				2	7				1	7				
	13:00		113					3	7				2	7				1	7				
	14:00	68			30	85	256	3	214	7	50	57	293	2	208	7							
	15:00	82	151	378		110	457	3	7		67	334	2	175	7								
	16:00							3	7				2	7				1	7				
	17:00		102					3	7				2	7				1	7				
	18:00	50	100	400	34	50	287	3	210	7	52	37	235	2	211	7							
	19:00		116	432				3	7				2	7				1	7				
	20:00	46	108	356				3	7				2	7				1	7				







	10:00	78	108		40	37	245	3		7	44	38	112	2		7
	11:00	84	122	808	58	31	252	3	98	7	52	35	278	2	101	7
	12:00	82	144		34	32	316	3		7	36	30	306	2		7
	13:00							3		7				2		7
	14:00	80	117	530	44	36	312	3		7	46	35	297	2		7
	15:00		143					3		7				2		7
	16:00	90	144		28	34	303	3		7	58	34	321	2		7
	17:00		136					3		7				2		7
	18:00	80	103	220	24	31	284	3	191	7	48	29	287	2	167	7
	19:00					44	248	3		7	FIN DE CARRERA					
	20:00	74	137	924	24			3		7						7
	21:00							3		7						7
	22:00		122					3		7						7
	23:00							3		7						7
	#####	64	156	1480	32	22	208	3		7						7
18/08/95	1:00							3		7						7
	2:00		118					3		7						7
	3:00							3		7						7
	4:00	86	150	980	34	22	249	3		7						7
	5:00							3		7						7
	6:00		119					3		7						7
	7:00							3		7						7
	8:00	70	124	215	36	28		3		7						7
	9:00							3		7						7
	10:00				36	29		3		7						7
	11:00	94	147	764				3		7						7
	12:00	84	129	441	48	33	261	3		7						7
	12:30							3		7	FIN DE CARRERA					

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO					FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1								
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA			
23/08/95	13:00																								
	13:30				44	59	473	3	15	46	54	458	2	15	46	62	373	1	15						
	14:00	66	56		40	62	389	3	15	36	50	372	2	15	30	66	381	1	15						
	15:00	50	50		42	66	394	3	15	38	60	390	2	15	44	74	373	1	15						
	16:00	64	64		36	72	444	3	15	32	82	432	2	15	44	44	380	1	15						
	17:00	60	60		32	74	393	3	15	34	84	380	2	15	36	96	343	1	15						
	18:00	96	96		42	82	416	3	227	42	92	392	2	203	46	112	353	1	223	15					
	19:00	58	58		42	92	401	3	15	32	92	405	2	15	36	58	349	1	15						
	20:00		117					3	15				2	15				1	15						
	21:00							3	15				2	15				1	15						
	22:00	52	52	415	34	74	386	3	15	32	72	344	2	15	30	24	291	1	15						
	23:00							3	15	20	186	368	2	15				1	15						
	#####		77					3	15	FIN DE CARRERA									1	15					
24/08/95	1:00	60	60	344	26	76	448	3	15						26	26	434	1	15						
	2:00		141					3	15									1	15						
	3:00							3	15									1	15						
	4:00		154					3	15									1	15						
	5:00	54	96	430	84	84	1040	3	15						66	66	980	1	15						
	6:00		142					3	15									1	15						
	7:00		144					3	15	FIN DE CARRERA									1	15					
		68		535																					
			165																						

24/08/95		INICIO DE CARRERA 12 M/H.										INICIO DE CARRERA 12 M/H.										INICIO DE CARRERA 12 M/H.									
16:00	90			528	80	134	526	3		12	72	137	513	2		12	68	127	495	1		12									
17:00	86				80			3		12	74	74	513	2		12	60	116	411	1		12									
18:00	80	142			60	101	437	3	167	12	80	110	438	2	161	12	56	97	400	1	171	12									
19:00	82				30	96	423	3		12	80	97	410	2		12	58	87	423	1		12									
20:00	80	119	438		48	91	386	3		12	40	100	391	2		12	58	87	386	1		12									
21:00	64	114						3		12			342	2		12				1		12									
22:00	64				34	44	319	3		12	58	62	319	2		12	46	38	300	1		12									
23:00	66	147	525					3		12			350	2		12				1		12									
#####								3		12				2		12				1		12									
25/08/95	1:00	68	158	530	32	24	268	3		12	50	37	294	2		12	46	24	260	1		12									
	2:00							3		12				2		12				1		12									
	3:00	44	131	450				3		12				2		12				1		12									
	4:00							3		12				2		12				1		12									
	5:00	54	138	451	34	96	345	3		12	30	106	350	2		12	30	97	340	1		12									
	6:00							3		12						12				1		12									
	7:00	54	145	456				3		12				2		12				1		12									
	7:30									12						12						12									
	8:00							3		12				2		12						12									
	9:00		144					3		12				2		12						12									
	10:00							3		12						12						12									
	10:30				46			3		12						12						12									
	11:00							3		12						12						12									
	12:00	70			38	97	324	3		12						12						12									
	13:00							3		12						12						12									
	14:00	68			40			3		12						12						12									
	15:00							3		12						12						12									
	16:00	78			30			3		12						12						12									
	17:00							3		12						12						12									

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

7/09/95	13:00																					
	13:30																					
	14:00	62	176	506																		
	14:30	74																				
	15:30	56																				
	16:00	68	162	538																		
	17:00																					
	18:00	58	144	477																		
	19:00																					
	20:00	46	129	444																		
	21:00																					
	22:00	50	104	394																		
	23:00																					
	0:00	42	92	368																		
8/09/95	1:00		118	426																		
	2:00	50	137	370																		
	3:00																					
	4:00	60	158	521																		
	5:00	50	157	504																		
	6:00	48	158	504																		
	7:00																					

INICIO DE CARRERA 12 M/H.										INICIO DE CARRERA 12 M/H.									
48	142	548	2		12	40	103	453	1		12								
50	140	544	2		12	44	109	475	1		12								
48	148	428	2		12	50	140	488	1		12								
40	148	538	2		12	38	141	490	1		12								
			2		12				1		12								
38	140	508	2		12	36	144	477	1		12								
			2		12				1		12								
38	114	455	2		12	36	113	441	1		12								
			2		12				1		12								
48	105	417	2		12	38	98	392	1		12								
			2		12				1		12								
			2		12				1		12								
28	114	420	2		12	32	113	413	1		12								
			2		12				1		12								
			2		12				1		12								
30	137	435	2		12	32	131	448	1		12								
			2		12				1		12								
			2		12				1		12								

	8:00	50	172	478
	8:45			
	9:00			
	10:00	56	154	380
	10:25	64		

36	144	500	2	12	32	141	487	1	12
FIN DE CARRERA									
								1	12
								1	12
					36	125	300	1	12
34	FIN DE CARRERA								

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3				FILTRO 2				FILTRO 1							
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO
11/09/95	18:00	66			INICIO DE CARRERA 12 M/H.				INICIO DE CARRERA 12 M/H.				INICIO DE LA CARRERA 12 M/H.							
	18:30	60			48	141	471	3	12	44	140	454	2	12	46	131	451	1	12	
	19:00	58			40	136	539	3	12	42	141	538	2	12	48	123	442	1	12	
	20:00	64			40	130	547	3	12	46	130	523	2	12	46	115	442	1	12	
	21:00							3	12				2	12				1	12	
	22:00	56			42	129	473	3	12	38	122	455	2	12	44	113	425	1	12	
	23:00							3	12				2	12				1	12	
	0:00	52						3	12				2	12				1	12	
12/09/95	1:00	50			40	104	446	3	12	36	112	457	2	12	34	107	449	1	12	
	2:00	50						3	12				2	12				1	12	
	3:00							3	12				2	12				1	12	
	4:00	48						3	12				2	12		93	404	1	12	
	5:00	50			34	95	416	3	12	26	91	402	2	12	30			1	12	
	6:00	50						3	12				2	12				1	12	
	7:00							3	12				2	12				1	12	
	8:00	56	104	520	36	99	526	3	12	32	100	491	2	12	34	92	488	1	12	
	8:30							3	12	FIN DE CARRERA								1	12	
DGCOH	9:00	50						3	12									1	12	
	10:00	52	150	480	34	136		3	12						32	106	445	1	12	
	11:00	60						3	12									1	12	
	12:00	58	128	453	30	127	488	3	12						30	59	286	1	12	
	12:20							3	12	FIN DE CARRERA										
	13:00							3	12											
	14:00	150	154	335	38	113	456	3	12											
	14:20				FIN DE CARRERA															

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3				FILTRO 2				FILTRO 1							
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO
12/09/95	18:00	58	138	487	INICIO DE LA CARRERA 12 M/H.															
	18:30	52			48	109	328	3	12											
	19:00	50			42	95	374	3	12											
	20:00	50	101	330	38	92	373	3	12											
	21:00							3	12											
	22:00				42	104	363	3	12											
	23:00	48	133	426	24			3	12											
	0:00	42	132	424				3	12											
13/09/95	1:00	50			38	114	398	3	12											
	2:00							3	12											
	3:00							3	12											
	4:00	56	115	443				3	12											
	5:00	40			28	104	408	3	12											
	6:00							3	12											
	7:00							3	12											
	8:00	40	126	519	36	116	440	3	12											

	9:00								
DGCOH	10:00	34	146	478	32	118	499	3	12
BMTA	11:00	36						3	12
	12:00		100	453	34	93	409	3	12
	13:00							3	12
	14:00	90	94	490	38	62	341	3	12
	15:00							3	12
	16:00	52	87	409	34	48	287	3	12
	17:00							3	12
	17:30							3	12
	18:00	48	145	400				3	12
	18:30	56							
	19:00	56							
	19:30								
	20:00	54	144	508					
	21:00								
	22:00								
	23:00	52	137	503					
	0:00	48	166	622					
14/09/95	1:00	48							
	2:00								
	3:00								
	4:00	50	179	686					
	5:00	40							
	6:00								
	7:00								
	8:00	46	195	670					
	9:00								
	10:00	50	205	650					
DGCOH	11:00	50	151	542					
	12:00	54	126	532					
	13:00								
	13:45	58							
	14:00	56	205	720					
	15:00								
	15:30	72							
	16:00	58	214	754					
	16:15								
	17:00								
	18:00	66	226	680					
	19:00								
	20:00	56	228	380					
	21:00								
	22:00								
	23:00	56	214	704					
	0:00	54	229	702					
15/09/95	1:00	50	213	688					
	2:00								
	3:00								
	4:00	44	207	720					
	5:00	50	191	750					
	6:00								
	7:00								
	7:15								

FIN DE CARRERA

INICIO DE LA CARRERA 12 M/H					
46	86	486	1	224	12
34	124	474	1		12
26	86	455	1		12
			1		12
			1		12
			1		12
38	136	492	1		12
			1		12
			1		12
28	133	474	1		12
			1		12
			1		12
			1		12
22	133	468	1		12
			1		12
			1		12
26	124		1		12
			1		12
			1		12
34	73	361	1		12
			1		12
			1		12
40	116	497	1		12
			1		12
			1		12
36	113	500	1		12
			1		12
			1		12
FIN DE CARRERA					

INICIO DE CARRERA 12 M/H					
36	187	650	2		12
44	190	525	2		12
			2		12
			2		12
38	202		2	252	12
			2		12
			2		12
			2		12
36	194	632	2		12
			2		12
			2		12
32	196	600	2		12
			2		12
			2		12
28	177	624	2		12
			2		12
28	177	696	2		12
FIN DE CARRERA					



	2:00			
	3:00			
	4:00	58	188	590
	5:00			
	6:00			
	7:00			
	8:00	50	162	517
	9:00			
	10:00	66	123	590
II	11:00	58	128	550
	12:00		131	502
	12:30			
	12:40			
	13:00	56		

			2	12				1	12	
			2	12				1	12	
			2	12				1	12	
32	157	511	2	12			132	518	1	12
			2	12				1	12	
			2	12				1	12	
	144	462	2	12			130	513	1	12
			2	12				1	12	
28	112	491	2	12			112	504	1	12
			2	341	12			1	12	
			2	12				1	12	
			2	12			83	482	1	12
24	93		2	12						12
FIN DE CARRERA										

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

21/09/95	17:00																					
	17:30			101																		
II	18:00	76		115																		
	18:30																					
	19:00			99																		
III	20:00	48		133																		
	21:00																					
	22:00			134																		
	23:00	50		124																		
	0:00																					
22/09/95	1:00			138																		
	2:00																					
	3:00																					
	4:00	48		141																		
	5:00			127																		
	6:00																					
	7:00																					
DMTA	8:00			141																		
	9:00																					
	10:00			129																		
DGCOH	10:15																					
	11:00	68		120																		
	11:15	56																				
	12:00	52		101																		

INICIO DE CARRERA										
46	106									12
	106								215	12
										12
30	106									12
46	133	520								12
										12
34	134	516								12
										12
										12
	138	529								12
										12
										12
28	132	518								12
										12
30	130	513								12
										12
34										12
	112	504								12
										12
46	83	482								12

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

25/09/95	17:00																					
	17:30	54																				
	18:00	42		131																		
	18:30																					
	19:00																					
	20:00	38		115																		
	21:00																					
	22:00																					

INICIO DE CARRERA 12 M/H.										
32	138	483	2							12
42	134	484	2							12
			2							12
32	126	480	2							12
26	125	423	2							12
			2							12
22	119	423	2							12

44  
34  
30  
22



FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3				FILTRO 2						
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DOCN	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DOCN
4/10/95	16:00				INICIO DE CARRERA 12 M/H.				INICIO DE CARRERA 12 M/H.						
	16:30	68	151	832	62	162	648	3	12	54	159	736	2		12
	17:00	72	157	686	58	160	668	3	12	54	158	690	2		12
	18:00	68	168	678	58	165	666	3	12	56	160	690	2		12
	18:30							3	12				2		12
	19:00							3	12				2		12
	20:00	70	179	184	52	169	666	3	12	58	163		2		12
	21:00							3	12				2		12
	22:00							3	12				2		12
	23:00	66	165	682	52	172	792	3	12	32	172	720	2		12
	0:00	72	150	698				3	12				2		12
5/10/95	1:00							3	12				2		12
	2:00				52	159	407	3	12	54	162	714	2		12
	3:00							3	12				2		12
	4:00	72	167	644				3	12				2		12
	5:00				48	142	604	3	12	54	154	592	2		12
	6:00							3	12				2		12
	7:00							3	12				2		12
	8:00	54	209	718	42	168	339	3	12	44	146	540	2		12
	8:15							3	12	FIN DE CARRERA					
	8:00							3	12						
	9:00							3	12						
	11:00	74	215	754	48	133	537	3	12						
	12:00	72	221	756				3	12						
	13:00							3	12						
	14:00				46	93	447	3	12						
	15:00							3	12						
	16:00	50	210	758				3	12	INICIO DE CARRERA 10 M/H					
	16:30	56						3	12		189	712	2		10
	17:00	72	182		30	98	484	3	12	52	185	704	2		10
	18:00	68	209	704	40			3	271	48	188	712	2	268	10
	18:30							3	12				2		10
	19:00							3	12				2		10
	20:00	62	192	710	36	73	414	3	12	44	161	640	2		10
	20:15				FIN DE CARRERA								2		10
	21:00												2		10
	22:00												2		10
	23:00	66	131	994						42	100	451	2	289	10
	0:00	68	140	522									2		10
6/10/95	1:00												2		10
	2:00									42	107	423	2		10
	3:00												2		10
	4:00	72											2		10
	5:00	70								36	93	383	2		10
	6:00												2		10
	7:00												2		10
	8:00	52	176	616						38	78	343	2		10
	9:00	54								46			2		10
	10:00	60	179	644						48			2		10
DGCOH	10:30	60											2		10
	11:00	56	182	674						50	37	234	2		10





6:00							3		15
7:00							3		15
8:00	72	117	495	32	96	419	3		15
9:00							3		15
9:30				52	49	314	3		15
9:45									
FIN DE CARRERA									

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

16/10/95		INICIO DE CARRERA 15 M/HR.										INICIO DE CARRERA 15 M/H									
17:00	68	94	473	60	108	654	3		15	52	130	549	2		15						
17:30	64	90	410	58	108	614	3		15	58	106	680	2		15						
18:00	78						3		15				2		15						
18:30	74	90	425	56	103	471	3		15	52	95	490	2		15						
19:00							3		15				2		15						
20:00	84	133	517	54	137	540	3		15	58	131	530	2		15						
21:00							3		15				2		15						
22:00							3		15				2		15						
23:00	78	154	517	56	145	684	3		15	60	160	702	2		15						
0:00	72	143	664				3		15				2		15						
17/10/95																					
1:00							3		15				2		15						
2:00				58	168	726	3		15	54	162	730	2		15						
3:00							3		15				2		15						
4:00	70	167	746	48																	
FIN DE CARRERA										FIN DE CARRERA											

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

17/10/95		INICIO DE CARRERA 15 M/HR.										INICIO DE CARRERA 15 M/HR.									
16:30	52	95	439	40	112	560	3		15			113	628	2		15					
17:00	58	102	462	46	110	598	3		15	38	109	584	2		15						
18:00	60	112	400	50	112	549	3		15	36	104	606	2		15						
18:30							3		15				2		15						
19:00							3		15				2		15						
20:00	62	114	536	46	103	505	3		15	40	110	524	2		15						
21:00							3		15				2		15						
22:00							3		15				2		15						
23:00	54	110	500	42	128	548	3		15	36	131	736	2		15						
0:00	54	120	508				3		15				2		15						
18/10/95																					
1:00							3		15				2		15						
2:00				36	127	514	3		15	36	126	523	2		15						
3:00							3		15				2		15						
4:00	58	111	498				3		15				2		15						
5:00		117	508	34	124	499	3		15	34	125	507	2		15						
6:00							3		15				2		15						
7:00							3		15				2		15						
8:00	52	131	507	32	115	471	3		15												
DGCOH	9:00	50			32																
FIN DE CARRERA										FIN DE CARRERA											

FECHA	HORA	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3					FILTRO 2					FILTRO 1					
		SST	TURB	COLOR	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO	DQO	TASA	SST	TURB	COLOR	FILTRO

18/10/95		INICIO DE CARRERA 10 M/HR.										INICIO DE CARRERA 12 M/HR.									
16:00	64	84	418																		





	11:00	50	67	340	46	39	228	3	10
	12:00	58	68	319				3	10
	13:00							3	10
	14:00	76	87	449	50	37	248	3	10
	14:15								
<b>FIN DE CARRERA</b>									

**Anexo F**









OPC	EST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TASA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8								
0000	92	121	308	32	45					1	3	3	13	21	7					56,5	71	82	85	98		130	
0000		113																									
0000	68			66	85	1,5		5	7,5	10	13	36	66	7						107	116	120	127	136		172	
0000	82	151	376		110	1	1,5	3	3,5	6	8	10,5	17	7						109	110	109	112	117		110	
0000		102																									
0000	30			34	36	1		5	8	10,5	14	43	76	7						73	75	74	80	84		118	
0000		116	432																								
0000	46	108	356																								
0000	44			34	34	0,5		5	6	9	15	64	96	7						68	69	76	77	92		175	
0000		77,6																									
0000																											
0000	46			18	36	13	-33	17	18,3	3	27	81	126	7						42	47	54	64	87		89	
0000																											
0000	1:00	40	62,7	441																							
0000	2:00																										
0000	3:00		75,1																								
0000	4:00	30		30	42	0,5	1,5	5,5	9	13,5	20	99	146	7						59	56	61	68	98		101	
0000	5:00	64	86,2	341																							
0000	6:00																										
0000	8:00	54	90,4		30	48,8	1	2,5	6	10	14,5	31,5	110	162	7					74	73	106	117	116		128	
0000	8:30																										

FIN DE CARRERA

OPC	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3																							
	EST	UTN	COLON	EFLUENTE		PERDIDA DE CARGA								TASA	TURBIDIDAD												
				SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8					
0000	30	93																									
0000		101	515			123	1,5	2	4	5,5	7	9	11,5	12						109	107	109	112	106		103	
0000	54																										
0000		104		38	113																						
0000	30	84	376																								
0000	82			40																							
0000		85																									
0000	30																										
0000	48	86	341	64,7		1	2	4	5,5	7,5	12									82,9	71,2	81,1	103	89,4		100	
0000	46	71	325	28	56			2	3	5	8	15	28							71,5	80,9	86	89,5	96		106	
0000	1:00																										
0000	2:00		103																								
0000	3:00	42																									
0000	4:00	40	103	404	22	32,2		2		5	9	25	50							44,9	59,1	66,9	69,6	70,7		82,2	
0000	5:00		95,3																								
0000	6:00																										
0000	7:00		89,2																								
0000	7:30																										
0000	8:00	44		344	28	30		0,5	2,5	4	6	10	35							42,8	52,6	69,4	70,8	72,4		84,1	
0000	9:00		92																								
0000		121																									
0000	30	94	435	22	33	3	2	6	6	8	12,5	45	82							61	72	83	92	96		164	
0000																											

FIN DE CARRERA

OPC	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3																								
	EST	UTN	COLON	EFLUENTE		PERDIDA DE CARGA								TASA	TURBIDIDAD													
				SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8						
0000																												
0000				28	36																							
0000																												
0000	60			34	44				0,5	1,5	2,5	3									62,4	69,3	76,8	80	76,2		93,5	
0000																												
0000	1:00																											
0000	2:00																											
0000	3:00																											
0000	4:00	42		36	40,5			1	1,5	2,5											57	72	77	88	92		104	
0000	5:00																											
0000	6:00																											
0000	7:00	40																										
0000	8:00	44		24	54	7	7,5	10	10,5	12	13	15	19								64	81	83	87	86		106	
0000	9:00																											
0000																												
0000																												

0000			36	48	6	5	8	9	10.5	11.5	13	23.5	7		56	60	66	74	73		116	
0000																						
0000	80		38																			
0000	80		42	47		1	3	4	6.5	8	10	33.5	7		60	74	79	83	84		107	
0000																						
0000	48		36				5	6	5.5	7	9.5	51	7									
0000																						
0000	48		44				2	4	5	6.5	9.5	61	7									
0000																						
0000	58																					
0000	60		32				2	3.5	5	7	11	72	7									
0000	1:00																					
0000	2:00																					
0000	3:00	68																				
0000	4:00	54					1	2.5	4	6	13	90	7									
0000	5:00																					
0000	6:00																					
0000	7:00																					
0000	8:00	50		24			1	2	4	6	16	95	7									
0000	9:00																					

FIN DE CARRERA

PEC	HOR	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3																		
		EST	FUEB	COLOR	EFLUENTE		PERDIDA DE CARGA							TURBIDAD									
					EST	UYN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15		
0000	0000																						
0000	62				38		1		3		4	5	6	7									
0000		154	680		34	44			1	2.5	4	5	6	7									
0000	72																						
0000		134																					
0000	58	131	524		46	64				0.5	1	2	3	5	7								
0000	1:00																						
0000	2:00		128																				
0000	3:00																						
0000	4:00	68	154	680	34						0.5	1.5	4	7									
0000	5:00																						
0000	6:00		143																				
0000	7:00																						
0000	8:00	88	154	630	88							0.5	1.5	3	7								
0000	9:00																						
0000		115			58								0.5	10.5	7								
0000	76	139			46	225	2		5	7	9.5	11.5	15	35	7			263	276	234	268	278	
0000	64	119																					
0000	68	123			52	205	2		5	5	8	12	15.5	34	7			190	198	210	205		
0000	64	117			46	145	4		7	9.5	12	14	20	49	7			141	155	165	171	200	
0000		122																					
0000	94	135	604		40	132	1.5		5	7.5	10	13	20	55	7			141	142	168	166	183	
0000		151																					
0000	80	154	680		40	105	2		5	8	10.5	13.5	22	63	7			125	131	137	141	174	
0000		161			42	114																	
0000	72	134			64																		
0000																							
0000		137																					
0000	76	126	487		42	67	1.5		5.5	4	9.5	14.5	29.5	86	7								
0000	1:00																						
0000	2:00		112																				
0000	3:00	106	154	680																			
0000	4:00	86	141	540	34	68	1.2		5.5	6	11.5	17	41.5	119	7								
0000	5:00																						
0000	6:00		146																				
0000	7:00																						
0000	8:00	88	154	630	38	61	0.3		14	18	22	26.5	60.5	148	7			53	108	113	264	174	
0000	9:00		120																				
0000	78	108			44	65	1.5		6	10	14.5	20	58	155	7			113	115	124	156	183	
0000	84	122	603																				

FIN DE CARRERA

PEC	HOR	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3												
-----	-----	-------------------	--	--	----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

PUNTO	EFLUENTE			PÉRDIDA DE CARGA								PASA	TURBIDAD									
	SST	TURB	COLOR	SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6		P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0000	76	139		38	122	4.5			8	10	11.5	13.5	17	15				128	138	140	146	137
0000				46	136	3			5	7	6	9	11.5	11.5				135	137	128	125	137
0000				46	136	0.5			2.5	3	3	4	8	9				131	123		125	
0000	68	123		34	124	0.5			2.5	3	4	5	6	9				128	134	124	124	
0000				34	108	2.5			2	3	4	5	7	9				128	128	127	118	
0000	62	151	1208	38	105	2			4	3	4	5	7.5	9				120	118	128	130	
0000	70	183	674	30	148				3		3	4.5	7	9								
0000				42	116				2.5		2.5	4.1	7	9								
0000				42	116																	
0000	52	128	974	42	67				2.2		2.5	4.5	8.3	9								
0000	1:00																					
0000	2:00	150																				
0000	3:00																					
0000	4:00	42	141	1080	22	34					3	4	9	9								
0000	5:00																					
0000	6:00	150																				
0000	7:00																					
0000	8:00	60	161	780	38	51					5	8	9	11	39			71	108	113	96	100
0000	9:00																					
0000	78	108		40	37				0.5	1.3	2	3.5	10	35				76	103	121	98	135
0000	84	122	808	38	31				0.5	1.3	2.5	3.5	11.5	27.5				75	108	112	109	164
0000	82	144		30	32				0.5	1.3	2.5	3.5	13.5	48.5				75	78	103	98	182
0000																						
0000	80	117	320	34	34				0.5	1.3	2	2.5	18	57				30	59	72	78	157
0000				143																		
0000	90	164		28	34				0.5	1.3	0.5	4	20	62				55	58	79	79	147
0000				136																		
0000	80	103	220	24	31				0.5	1.3	2.5	4.5	25	72				34	70	72		150
0000				44																		
0000	74	137	924	24	44				4	3	4	4	23	34				69	51		69	144
0000																						
0000				122																		
0000	64	156	1480	32	22								3	30	95							
0000	1:00																					
0000	2:00	118																				
0000	3:00																					
0000	4:00	86	150	980	34	22						1.5	4.3	110								
0000	5:00																					
0000	6:00	119																				
0000	7:00																					
0000	8:00	70	124	215	34	28				8	9	11	30	124				47	64	67	110	143
0000	9:00																					
0000	94	147	784	34	24					7			5	12	133			49	75	70	109	148
0000	84	129	441	48	35					5			11.5	57	174			47	70	88	104	151
0000																						

PUNTO DE CABEZA

PUNTO	EFLUENTE			PÉRDIDA DE CARGA								PASA	TURBIDAD										
	SST	TURB	COLOR	SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6		P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
0000				44	37				15	20	19	26.5	30	32	41.5	15		56	59	71	110	113	70
0000	64	56		40	62				15	17	21.5	23	29	34	42	15		75	74	78	69	78	74
0000	30	30		42	64				16	18.5	19	24	20.5	35	46	15		38	44	40	59	54	50
0000	64	64		34	72				15	18	23	24	30	35	46	15		63	68	62	84	80	66
0000	72	60		32	74				15	24	22	30	34	34	59	15		72	67	65	74	71	75
0000	80	94		42	82				19	20.5	22	30	33	37	49	15		71	73	78	80	84	88
0000	52	58		42	92				16	21	27	27	32	38	47	15		56	57	61	62	80	92
0000				117																			
0000	80																						
0000	52	52	415	34	74				20	28	30	31	33	41	61	15							
0000	64																						
0000				72																			
0000	60	40	344	28	74				13	17.5	22.5	27.5	34.5	44	74.5	15							
0000	2:00																						
0000	3:00																						





PCC	NOM	EPLIENTE	PREMIO	SST	UTN	COLOR	EPLIENTE		PUNDA DE CARGA								TASA		TURBIDAD							
							P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8				
							UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN	UTN			
									INICIO DE CARRERA 12 M/HR.																	
0000	0000			191	812		62	165	4	5		11	9	14	17	17	12	163	160		163	141	166	166	170	
0000	0000			157	888		58	168	5	6,5		10,5	13	18	20	12	12	163	160		164	165	170	173	165	
0000	0000			68			58	165	4	5,5		10	9	14	17	15	12	164	164		167	165	174	171	168	
0000	0000			70			52	166	4	5,5		9,5	8	14	15,5	15	12	169	167		174		175	172	172	
0000	0000			64			52	172	3	4,5		9	9	14	13,5	20,5	12				174		175	172	172	
0000	0000			72													12									
0000	1:00																12									
0000	2:00						52	158	3	5		9,5	9,5	13,5	19	28	12									
0000	3:00																12									
0000	4:00						72										12									
0000	5:00																12									
0000	6:00																12									
0000	7:00																12									
0000	8:00																12									
0000	9:00						34	166	1,5	2,5		6,5	7,5	11	21,5	34	12									
0000	0:00						68										12									
DGC	0000						74	132	1,5	2,5		6	11	11	28	80	12	137	144		155		176	180	219	
DGC	0000						74										12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																12									
0000	0000																									

FE	NO	SST	TURB	COLO	EF	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TASA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0000					48	115	10	12.5		18.5		27	28	33.5	15	117	118		132		132	129	127
0000	68																						
0000	82	128	728		54	133	10	14.5		21		29	31	40	15								
0000																							
0000	66	110	463		120	10	15		24		33.5	37.5	37.5	15									
0:00	72	126	510																				
0000	1:00																						
2:00					48	120	8.5	13		22		33.5	34	62.5	15								
3:00																							
4:00	64	133	510		42																		
5:00					60	140	7	10.3		20		32.5	39.5	80	15								
6:00																							
7:00																							
8:00	54	170	738		32	142	6.5	10.3		21		37	46.5	110.5	15								
0000	9:00	54																					
0000	72	128	497																				
0000	68	98	434		52	66	6	10		22		43	68	170	15	77	78		92		96	104	96
0000																							

FIN DE CARRERA

FE	NO	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3								TURBEDAD											
		SST	TURB	COLO	SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TASA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
0000	0000														INICIO DE CARRERA 15 M/HR.									
0000	72	83	408																					
0000	68	77	416		40	98	9.5	13		20		24.5	27	30.5	15	97	93		122		122	112	121	
0000	64	82	362		44	90	12.5	15		18.5		24	25	30	15	93	95		92		102	100	109	
0000	78	80	399		54	92	10	14		19.5		25	28	34	15	94	97		92		95		104	
0000																								
0000																								
0000																								
0000																								
0000	78	101	448		101	9	13.5		20.5		29	31	44	15										
0:00	80	89	444																					
0000	1:00																							
2:00	66	116	497		48	110	9	11.5		19		29.5	34.5	39.5	15									
3:00	62																							
4:00	78																							
5:00	72	117	498		42	96	7.5	11.5		19		31.5	39.5	86.5	15									
6:00																								
7:00																								
8:00	72	117	495		32	96	4	9.5		18		31.5	47	131	15									
0000	9:00																							
0:30					52	46	13	16.5		23		40	43	165	15	71	73		124		98	147	94	
0:45																								

FIN DE CARRERA

FE	NO	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3								TURBEDAD										
		SST	TURB	COLO	SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TASA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0000	0000														INICIO DE CARRERA 15 M/HR.								
0000	68	94	473		60	108	13.5	15		20		24	29	17	15	122	108		112		115	87	
0000	64	90	410		58	108	13	15		20		24.5	26.5	15	110	112		118		120	137		
0000	78	90	425		56	103	10	12.5		19		26	28	15	108	106		114		121	128		
0000																							
0000																							
0000																							
0000	84	133	517		54	137	9.5	12.5		19		26	28.5	15									
0000																							
0000																							
0000																							
0000	78	154	517		56	145	9	12.5		20		35.5	37	15									
0:00	72	143	464																				
0000	1:00																						
2:00					50	140	8.5	15.5		23		35.5	34.5	56	15								
3:00																							
4:00	70	167	748		48																		

FIN DE CARRERA

FE	NO	EFLUENTE PRIMARIO			FILTRO 3								TURBEDAD										
		SST	TURB	COLO	SST	UTN	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TASA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0000	0000														INICIO DE CARRERA 15 M/HR.								
0000	60	112	549		40	112	11	10.3		18		23	27	15	114	114		126		121			



