

24/112

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



DIAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUÍMICA

ESTUDIO DE LA FILTRACIÓN DE LOS EFLUENTES SECUNDARIOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE C.U.

TESIS MANCOMUNADA  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUÍMICO  
PRESENTAN:  
GUSTAVO AVILA MARTÍNEZ  
JOSÉ DE JESÚS HUERTA DELGADILLO

1988

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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

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

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

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

## I N D I C E

	Pág
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	12
NOMENCLATURA	14
RESUMEN	18
INTRODUCCION	20
1. FUNDAMENTOS TEORICOS	21
1.1 <i>Diferentes clasificaciones del proceso de filtración</i>	21
1.1.1 Clasificación de acuerdo con el tratamiento previo que se le da al influente	21
1.1.2 Clasificación de acuerdo con la forma en que se retiene los sólidos	23
1.1.3 Clasificación dentro del campo de tratamien- to de agua	24
1.1.4 Clasificación de filtros utilizados en trata- miento de lodos	35
1.2 <i>Variables de filtración</i>	37
1.2.1 <i>Variables relacionadas con las característi-</i>	

	Págs
cas del medio filtrante	39
1.2.2 Variables que afectan las condiciones de operación en forma directa	39
1.3 <i>Mecanismos de filtración</i>	41
1.3.1 Descripción de los principales mecanismos de remoción	41
1.4 <i>Modelación matemática</i>	51
1.4.1 Solución al modelo matemático de Deb por el método de diferencias finitas	61
1.4.2 Programa de computadora para la solución del modelo	68
1.5 <i>Aplicación de la filtración al tratamiento de agua</i>	71
1.5.1 Potabilización	71
1.5.2 Aguas residuales	72
2. DESCRIPCION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE C.U.	77
2.1 <i>Antecedentes</i>	77
2.2 <i>Diagrama de flujo de la PTCU</i>	79
2.3 <i>Filtros de arena</i>	82
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	86
3.1 <i>Descripción del piloto</i>	86
3.1.1 Línea de alimentación	87
3.1.2 Columnas de filtración	87
3.1.3 Línea de lavado	88

	Pág
3.2 <i>Diseño de los experimentos</i>	93
3.2.1 <i>Corridas de filtración</i>	93
3.2.2 <i>Retrolavado de los filtros</i>	93
3.3 <i>Métodos analíticos empleados</i>	97
3.3.1 <i>Métodos para el seguimiento de la corrida</i>	97
3.4 <i>Caracterización de los influentes</i>	97
3.5 <i>Medio filtrante</i>	98
4. RESULTADOS Y ANALISIS	100
4.1 <i>Lodos activados</i>	100
4.1.1 <i>Análisis de los datos a 1 m c.a.</i>	101
4.1.2 <i>Análisis de los datos a 2 m c.a.</i>	102
4.1.3 <i>Análisis de los datos a 3 m c.a.</i>	105
4.1.4 <i>Análisis de los datos a 1 m c.a. con</i> <i>coagulante</i>	105
4.1.5 <i>Relación entre la concentración de</i> <i>sólidos suspendidos y la turbiedad</i>	107
4.1.6 <i>Relación entre la eficiencia de</i> <i>remoción y la duración de corrida</i>	107
4.1.7 <i>Relación entre la duración de corrida</i> <i>y la velocidad de filtración</i>	110
4.1.8 <i>Relación entre la altura del medio con</i> <i>respecto a la caída de presión y el tiempo</i>	112
4.1.9 <i>Relación entre la caída de presión y tur-</i>	

	Pág
biedad con respecto al tiempo	116
4.1.10 Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo	117
4.1.11 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente	118
4.2 <i>Biodisco</i>	120
4.2.1 Análisis de datos a 1 m c.a.	121
4.2.2 Análisis de datos a 2 m c.a.	123
4.2.3 Análisis de datos a 3 m c.a.	123
4.2.4 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad	123
4.2.5 Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida	125
4.2.6 Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración	127
4.2.7 Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo	128
4.2.8 Relación entre la caída de presión y tur- biedad con respecto al tiempo	128
4.2.9 Relación entre la altura del medio con res- pecto a la turbiedad y el tiempo	130
4.2.10 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente	131
4.3 <i>Filtro percolador</i>	132

	Pág
4.3.1 Análisis de datos a 1 m c.a.	133
4.3.2 Análisis de datos a 2 m c.a.	134
4.3.3 Análisis de datos a 3 m c.a.	134
4.3.4 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad	134
4.3.5 Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida	137
4.3.6 Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración	139
4.3.7 Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo	140
4.3.8 Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo	140
4.3.9 Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo	142
4.3.10 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente	143
4.4 <i>Aplicación del modelo matemático de Deb</i>	144
4.4.1 Lodos activados	146
4.4.2 Biodisco	149
4.4.3 Filtro percolador	153
4.4.4 Análisis general de los resultados	154
4.5 <i>Lavado de los filtros</i>	157
4.5.1 Resultados	157

	Pág
4.5.2 Análisis de resultados de lavado	159
5. APLICACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A LA OPERACION DE LA PTCU	162
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
7. BIBLIOGRAFIA	168
ANEXOS	172
1. DEDUCCION DE LA FORMULA PARA CALCULAR EL NUMERO DE PUNTOS DE CONTACTO ENTRE GRANOS	173
2. DIAGRAMA DE FLUJO Y PROGRAMA	176
3. DESCRIPCION DE LAS TECNICAS ANALITICAS EMPLEADAS	179
4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FILTRACION	187

## LISTA DE FIGURAS

No. de Figura		Pág
1	Clasificación de los filtros de tratamiento de agua	24
2	Filtro lento con flujo ascendente	27
3	Filtro lento con flujo descendente	28
4	Filtro lento con flujo horizontal	29
5	Filtro rápido ascendente	31
6	Filtro rápido descendente	31
7	Filtro rápido de flujo mixto	32
8	Filtro rápido con lavado por sifón	33
9	Esquema de un filtro a presión	34
10	Filtro de tambor rotatorio	36
11	Filtro de tambor rotatorio con sistema de transmisión	36
12	Filtro prensa	37
13	Remoción de partículas por cribado	45
14	Remoción por sedimentación	46
15	Contacto de partículas. Mecanismo de intercepción	47
16	Remoción por impacto inercial	48
17	Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van Der Walls	50
18	Esquema explicativo de la acción de los	

No. de Figura		Pág
	polímeros en un medio granular (Interac <u>ci</u> ón química)	51
19	Malla de diferencias finitas para fil- tración	63
20	Esquema de la numeración de la red para el programa de computadora	70
21	Distribución típica de tamaños de partí- culas encontrada en un efluente biológico sedimentado	75
22	Distribución de la PTCU	78
23	Diagrama de flujo de la PTCU	80
24	Filtro de arena de la PTCU. Planta	81
25	Filtro de arena de la PTCU. Corte	84
26	Filtros piloto. Vista General	89
27	Filtros piloto. Perspectiva	91
28	Filtros piloto. Vistas laterales	92
29	Difusores de aire	94
30	Diagrama de flujo sobre la metodología empleada durante la experimentación	95
31	Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad para L.A.	108
32	Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para L.A.	110
33	Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para L.A.	111
34	Relación entre la altura del medio con res- pecto a la caída de presión y el tiempo para L.A. (1 m c.a.) $v_f = 3.9 \text{ m/h}$	113

No. de Figura		Pág
35	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo para L.A. (1 m c.a.) $V_f = 13.9$ m/h	114
36	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo para L.A. (1 m c.a. con coagulante) $V_f = 12.7$ m/h	115
37	Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo para L.A.	117
38	Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo para L.A.	118
39	Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del influente para L.A.	119
40	Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad para Biodisco	125
41	Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para Biodisco	126
42	Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para Biodisco	127
43	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. Biodisco (1 m c.a.) $V_f = 7.05$ m/h	129
44	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. Biodisco (1 m c.a.) $V_f = 12.45$ m/h.	129
45	Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo. Biodisco.	130
46	Relación entre la altura del medio con respecto a la turbiedad y el tiempo. Biodisco.	131
47	Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del influente para Biodisco.	132
48	Relación entre la concentración de sólidos	

No. de Figura		Pág
	suspendidos y la turbiedad. F.P.	137
49	Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para F.P.	138
50	Relación entre la duración de la corrida y la velocidad de filtración. F.P.	139
51	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. F.P. (1 m c.a.) $V_f = 4.34$ m/h	141
52	Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. F.P. (1 m c.a.) $V_f = 11.64$ m/h	141
53	Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo. F.P.	142
54	Relación entre la altura del medio con respecto a la turbiedad y el tiempo. F.P.	143
55	Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del influente para F.P.	144
56	Relación de concentración teórica a lo largo de la corrida de filtración. L.A.	147
57	Relación de concentraciones experimentales a lo largo de la corrida de filtración. L.A.	148
58	Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. L.A.	148
59	Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. L.A.	149
60	Relaciones de concentración teóricas a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco	150
61	Relaciones de concentración experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco	151

No. de Figura		Pág
62	Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco	152
63	Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco	152
64	Relaciones de concentración experimentales a lo largo de la corrida de filtración. F.P.	154
65	Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. F.P.	155
66	Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. F.P.	156

## LISTA DE TABLAS

No. de Tabla		Pág
1	Clasificación y características de los filtros lentos	26
2	Características de los filtros rápidos	30
3	Principales variables de filtración	38
4	Clasificación y significado de las variables de filtración	42
5	Mecanismos de remoción	43
6	Condiciones de operación estudiadas	96
7	Caracterización del influente de los filtros	98
8	Características del medio filtrante	99
9	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de L.A. a 1 m c.a.	103
10	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de L.A. a 2 m c.a.	104
11	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de L.A. a 3 m c.a.	104
12	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de L.A. a 1 m c.a. con coagulante	106
13	Promedios de las eficiencias de remoción de UTN (n) con y sin coagulante	109
14	Relación entre la duración de corrida y velocidad de filtración para LA.	111
15	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de Biodisco a 1 m c.a.	122
16	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de Biodisco a 2 m c.a.	124

No. de  
Tabla

17	Resumen de la corrida efectuada para la filtración de Biodisco a 3 m c.a.	124
18	Promedios de la eficiencia de remoción de la turbiedad ( $\eta$ )	126
19	Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para Biodisco (1 m c.a.)	127
20	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de F.P. a 1 m c.a.	135
21	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de F.P. a 2 m c.a.	136
22	Resumen de las corridas efectuadas para la filtración de F.P. a 3 m c.a.	136
23	Promedios de la eficiencia de remoción de la turbiedad ( $\eta$ )	138
24	Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para F.P.	139
25	Constantes específicas de filtración	145
26	Resultado final de lavado del filtro uno	160
27	Resultado final de lavado del filtro dos	161

## NOMENCLATURA

- A : Peso del filtro más residuo (M)
- A' : Parámetro experimental de filtración (Modelo de Deb)
- a : Area del filtro perpendicular al flujo ( $L^2$ )
- a' : Exponente experimental del modelo de Deb
- B : Peso inicial del filtro (M)
- B' : Parámetro experimental de filtración (Modelo de Deb)
- b' : Exponente experimental del modelo de Deb
- C : Concentración de sólidos suspendidos (M,  $L^{-3}$ )
- $C_0$  : Concentración inicial (M,  $L^{-3}$ )
- $\underline{C}$  : Concentración adimensional =  $C/C_0$
- C.U.: Coeficiente de uniformidad
- C : Parámetro experimental de filtración (Modelo de Ives)
- C' : Exponente experimental del modelo de Deb
- D : Diámetro de grano del medio (L)
- d : Talla media de los granos limpios (L)
- $d_p$  : Diámetro de partícula (L)
- F : Coeficiente adimensional de depósito (Modelo de Deb)
- Fa : Fuerzas de Van Der Walls
- F.P.: Filtro percolador
- g : Aceleración de gravedad ( $L, T^{-2}$ )
- H : Altura del medio = L (L)
- $H_1$  : Altura de agua en cámara de filtración
- $H_2$  : Altura de agua en cámara de filtrado
- h : Operador. Intervalo de profundidad adimensional=  $\Delta l$

$h_0$  : Pérdidas de carga iniciales (L)  
 $J$  : Constante adimensional (Ecuación de Kozeny)  
 $K$  : Parámetro experimental de pérdida de carga (Modelo de Deb)  
 $K'$  : Constante de atracción de Van Der Walls  
 $k$  : Operador. Intervalo de tiempo adimensional =  $\Delta t$   
 $L$  : Altura del medio =  $H$  (L)  
 $L.A.$  : Lodos activados  
 $\ell$  : Altura parcial del medio (L)  
 $\underline{\ell}$  : Longitud adimensional =  $\ell/L$   
 $m.c.a.$  : Metros columna de agua (L)  
 $m_d$  : Material desprendido  
 $m_r$  : Material retenido  
 $N_p$  : Cantidad total de granos  
 $N_{p1}$  : Cantidad de partículas con arreglo de  $90^\circ$   
 $N_{p2}$  : Cantidad de partículas con arreglo de  $60^\circ$   
 $NLF$  : Número de intervalos de longitud  
 $NTF$  : Número de intervalos de tiempo  
 $\eta$  : Número de contactos entre granos  
 $P.A.$  : Peso de arena (M)  
 $P.E.$  : Peso específico (M, L<sup>-3</sup>)  
 $P.F.$  : Peso final (M)  
 $P.M.$  : Peso de matraz (M)  
 $PTCU$  : Planta de tratamiento de Ciudad Universitaria  
 $P_r$  : Probabilidad de remoción de una partícula por cribado  
 $p$  : Porosidad de lecho limpio

$p_{\delta}$  : Porosidad del material depositado  
 $p'$  : Porosidad macroscópica  
 $r$  : Distancia entre partículas y grano (L)  
 $S$  : Desviación estandar  
 $SST$  : Sólidos suspendidos totales ( $M, L^{-3}$ )  
 $T.E.$  : Tamaño específico (L)  
 $T_u$  : Turbiedad de la muestra  
 $T_{ue}$  : Turbiedad de efluente  
 $T_{ui}$  : Turbiedad de influente  
 $t$  : Duración de corrida (L)  
 $T_o$  : Tiempo inicial (T)  
 $t_n$  : Tiempo final (T)  
 $\underline{t}$  : Tiempo adimensional =  $vt/L$   
 $UTN$  : Unidades de turbiedad nefelométricas  
 $V$  : Velocidad local dentro del filtro en su dirección  $\ell(L, T^{-1})$   
 $V.A.$  : Volumen de agua ( $L^3$ )  
 $V_{\delta}$  : Velocidad de filtración ( $L, T^{-1}$ )  
 $V.M.$  : Volumen de muestra ( $L^3$ )  
 $V_{\delta}$  : Volumen seco de muestra ( $L^3$ )  
 $V_v$  : Volumen de vacíos ( $L^3$ )  
 $v$  : Velocidad de filtración en columna vacía ( $L, T^{-1}$ )  
 $w_{\delta}$  : Peso de la muestra seca (M)  
 $X$  : Relación del factor de forma de los granos con depósi  
to y los granos limpios  
 $\bar{X}$  : Media  
 $\Delta L$  : Intervalo de longitud (L)

- $\Delta p$  : Caída de presión (L)  
 $\Delta t$  : Intervalo de tiempo (L)  
 $\frac{\Delta d}{d}$  : Relación de crecimiento del tamaño de grano por el depósito  
 $\rho$  : Densidad de líquido (M, L<sup>-3</sup>)  
 $\rho_s$  : Densidad del material retenido o partículas en suspensión (M, L<sup>-3</sup>)  
 $\rho'_s$  : Densidad de muestra seca (M, L<sup>-3</sup>)  
 $\lambda$  : Coeficiente del filtro  
 $\lambda_0$  : Coeficiente inicial del filtro  
 $\lambda'$  : Coeficiente modificado de filtración (T<sup>-1</sup>)  
 $\underline{\lambda}$  : Coeficiente adimensional de filtración =  $\lambda' L/v$   
 $\psi$  : Factor de forma de los granos limpios  
 $\psi'$  : Factor de forma de las partículas en suspensión  
 $\sigma$  : Depósito específico  
 $\sigma_s$  : Tasa de material retenido en función del volumen de sólido depositado por unidad volumétrica de medio filtrante  
 $\frac{\partial H}{\partial z}$  : Pérdida de carga adimensional para cualquier tiempo  
 $\left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_0$  : Pérdida de carga adimensional al inicio  
 $\phi$  : Parámetro experimental de filtración (Modelo de Ives)  
 $\gamma$  : Viscosidad cinemática del líquido (L<sup>2</sup>, T<sup>-1</sup>)  
 $\eta$  : Eficiencia  
 $\beta_0$  : Coeficiente volumétrico de los granos  
 $\zeta$  : Parámetro experimental de pérdida de carga (Modelo de Deb)

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue obtener parámetros experimentales de diseño y operación para la filtración terciaria de los sistemas con que cuenta la PTCU: Lodos activados, Biodisco y Filtro percolador.

Para tal fin se construyeron dos filtros piloto para simular un proceso de cielo abierto y con un medio simple ( $T.E. = 0.55 \text{ mm}$ ,  $C.U. = 1.59$ ). El sistema contó con piezómetros y tomas de muestra a todo lo largo del medio. Se trabajó en filtración rápida (del orden de 5 a 20 m/h), manteniendo la carga constante (1, 2 y 3 m c.a.).

En total se efectuaron 29 corridas: 11 de Lodos activados, 10 de Biodisco y 8 de Filtro percolador. A 1 m c.a. en especial se efectuaron corridas a diferentes velocidades de

filtración. Se encontró que los parámetros de operación resultan diferentes para cada sistema. Así, comparativamente en el sistema de Lodos Activados se tuvo una duración de corrida de 17 h para una velocidad de filtración de 13.9 m/h (corrida 6); mientras que en Biodisco para una velocidad de filtración similar (12.45 m/h ) la duración de corrida fue de 1.25 h (corrida 7) y por último para Filtro Percolador a velocidad de (11.64 m/h ) la duración de corrida es de 4 h (corrida 5).

El lavado se efectuó según la técnica Europea, es decir, con aire y agua a velocidades de 25 m/h, y de 5 a 30 m/h respectivamente.

Se aplicó un modelo matemático (Deb, 1970) para simular el proceso, el cual proporcionó mejores resultados para el sistema de Lodos Activados.

Finalmente se propone varias recomendaciones para mejorar la operación del sistema de filtros de la PTCU.

## INTRODUCCION

Este trabajo se plantea como una pequeña aportación al campo de tratamiento de aguas residuales en un país con escasos recursos. En efecto, cada vez es más difícil emplear materiales y tecnología de importación como es el caso de la filtración con lechos de antracita. Ante el alto costo de este material (300 USD/m<sup>3</sup>) se ha optado por utilizar sólo arena, sin revisar los criterios de operación y diseño.

Ante la escasez de información bibliográfica al respecto se realizó este estudio experimental abarcando tres tipos de efluentes (lodos activados, filtro percolador y biodiscos), cuya existencia es un hecho en México. Se comenzó por seleccionar el tamaño de medio comúnmente empleado en la práctica para evaluar su funcionamiento.

## 1. FUNDAMENTOS TEORICOS

La filtración consiste en hacer pasar un fluido con materia en suspensión a través de un medio poroso que permita el paso del líquido pero no de las partículas sólidas.

Dada la diversidad de aplicaciones que se le puede dar a este proceso en la literatura se encuentran clasificaciones muy diferentes; por lo que, a continuación sólo se presenta las principales formas de clasificar los filtros.

### *1.1 Diferentes clasificaciones del proceso de filtración*

#### **1.1.1 Clasificación de acuerdo con el tratamiento previo que se le da al influente**

De acuerdo con este tipo de criterio existen dos tipos de

filtración: la directa y la convencional.

#### 1.1.1.1 Filtración directa

En ella se agregan directamente los coagulantes, puede o no tener un proceso previo de floculación. Su característica principal es que no existe sedimentación.

Los sólidos presentes en las aguas, así como los agregados a ella (alumbre, polímeros, carbón activado, etc.) son retidos en el medio filtrante. En este caso se recomienda tener un diámetro de grano muy grande para disminuir la pérda de carga así como añadir el coagulante al influente inmediatamente antes de entrar al filtro para lograr una mejor adhesión de las partículas a los granos del medio.

Específicamente se denomina al proceso "Floculación por contacto-Filtración" cuando la floculación ocurre durante el contacto de las partículas con el medio filtrante (Coronado, 1984).

#### 1.1.1.2 Filtración convencional

El agua debe recibir el esquema habitual de tratamiento, es decir: coagulación, floculación y sedimentación. Se puede utilizar un medio único de arena, medios duales (arena-antra

cita) o medios múltiples (arena-antracita-granate) (Coronado, 1984).

#### 1.1.2 Clasificación de acuerdo con la forma en que se retiene los sólidos.

Se distinguen dos tipos: la filtración superficial y la filtración en profundidad.

##### 1.1.2.1 Filtración superficial (sobre membrana)

En este caso el objetivo es retener en superficie las partículas y microorganismos, para ello se emplea un medio poroso poco profundo como soporte. Ejemplo de este tipo de filtros son los filtros de mallas de rejilla, de discos o tambores, los filtros prensa, el filtro a vacío, etc. (Dégremont, 1979).

##### 1.1.2.2 Filtración a profundidad

Este tipo de filtros se emplean comúnmente para el tratamiento de agua.

La retención de sólidos se realiza en todo el cuerpo del filtro el cual se compone de material granular.

### 1.1.3 Clasificación dentro del campo de tratamiento de agua

Como se mencionó para el tratamiento del agua los filtros empleados son con medio granular. En este caso su clasificación se realiza de acuerdo con la fuerza impulsora en: filtros a gravedad (o filtros a cielo abierto) y filtros a presión. Posteriormente los filtros se pueden subdividir tomando en cuenta el sentido del flujo. En la figura 1 se presenta la clasificación para los filtros de tratamiento de agua.

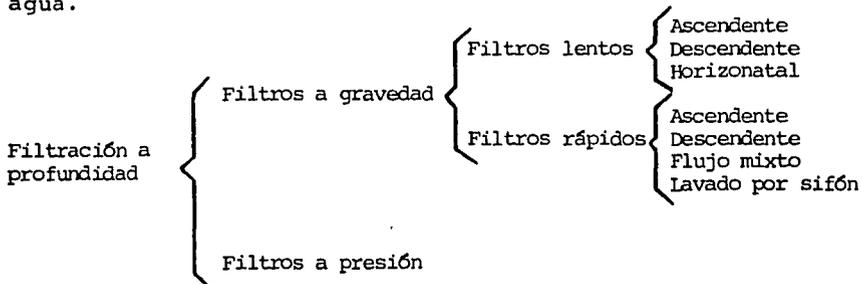


Figura 1. Clasificación de los filtros de tratamiento de agua.

#### 1.1.3.1 Filtros a gravedad

En estos filtros la acción de la gravedad es la fuerza impulsora. La columna del líquido acumulada sobre el medio provoca el paso del agua a través de él.

Los filtros a gravedad se emplean tanto en plantas de aguas residuales como en plantas de agua potable. Según donde se sitúe dentro del proceso su tratamiento puede ser primario, secundario o terciario. Estos filtros pueden trabajar a diferentes intervalos de velocidad por lo que existen filtros lentos y filtros rápidos.

- a) Filtros lentos. Estos filtros trabajan a velocidades de filtración entre 0.08 a 0.58 m/h (2 a 14  $\text{m}^3/\text{m}^2$  d). Se clasifican a su vez de acuerdo con el sentido del flujo en: de flujo ascendente, de flujo descendente y flujo horizontal. Las principales condiciones de operación para los filtros lentos son mencionadas en la Tabla 1. En las figuras 2, 3 y 4 se muestran los esquemas de este tipo de filtros.
- b) Filtros rápidos. En este caso la velocidad de filtración se sitúa dentro del intervalo de 2.0 a 25 m/h (48-600  $\text{m}^3/\text{m}^2$  d). Los filtros rápidos se clasifican de acuerdo con el sentido del flujo: en flujo ascendente, de flujo descendente, de flujo mixto y lavado por sifón. En la Tabla 2, se presentan las condiciones de operación y en las figuras 5, 6, 7 y 8 los esquemas respectivos.

TABLA 1. CLASIFICACION Y CARACTERISTICAS DE LOS FILTROS LENTOS

CONDICION DE OPERACION	ASCENDENTES (Fig 2)	DESCENDENTES (Fig 3)	HORIZONTAL (Fig 4)
- Tratamiento previo del agua	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL
- Velocidad de filtración (m/h)	0.11 - 0.15	0.25 - 0.58	0.08 - 0.58
- Carga Hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	2.7 - 3.6	6 - 14	2 - 14
- Profundidad del medio Arena (m) Grava (m)	0.9 - 1.1 0.3 - 0.45	0.9 - 1.2 0.4 - 0.45	0.9 - 1.1 0.4 - 0.45
- Características del medio Arena Talla efectiva (mm) Coeficiente de uniformidad	0.3 1.7 - 2	0.15 - 0.35 1.5 - 3	0.35 - 0.4 1.5 - 3
- Pérdida de carga hidrostática (m)	0.35 - 1.2	0.2 - 1.5	
- Forma del tanque de filtración	a) Rectangulares b) Circulares	a) Rectangulares b) Circulares con paredes verticales inclinadas	a) Se construyen por lo menos dos unidades con una capacidad del 65% cada una de las paredes con una altura de 0.9 a 1 m.
- Sistema de drenes	a) Tubería de arcilla perforada en posición lateral y central al filtro	a) Falso fondo con ladrillo tendido de canto b) Bloques de concreto c) Tuberías de drenaje perforadas con orificios	a) Ladrillos tendidos de canto

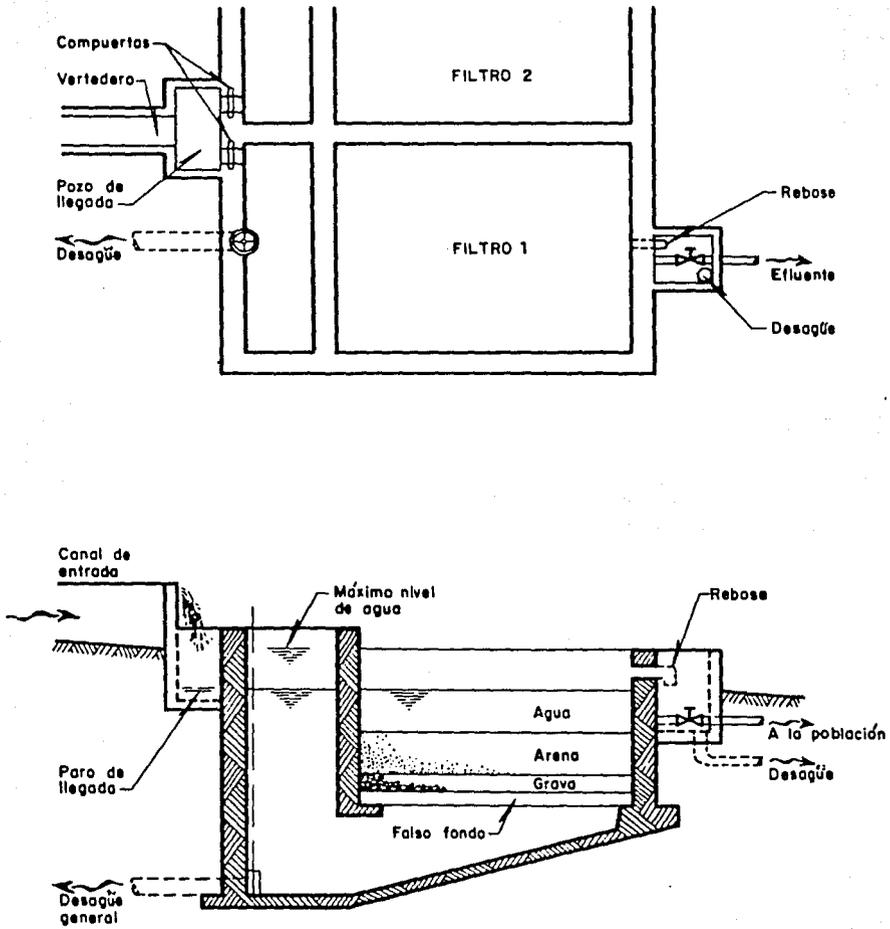


Figura 2. Filtro lento con flujo ascendente

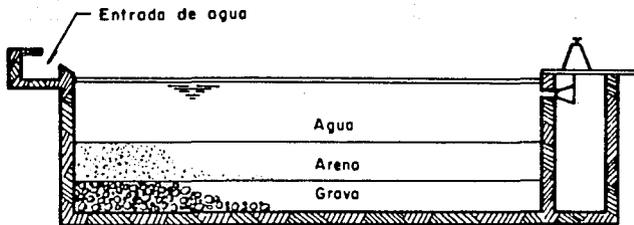
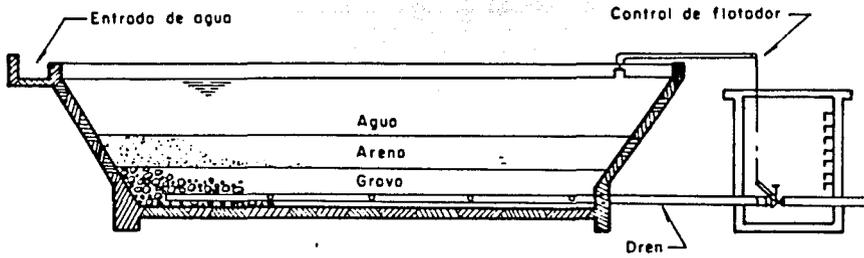
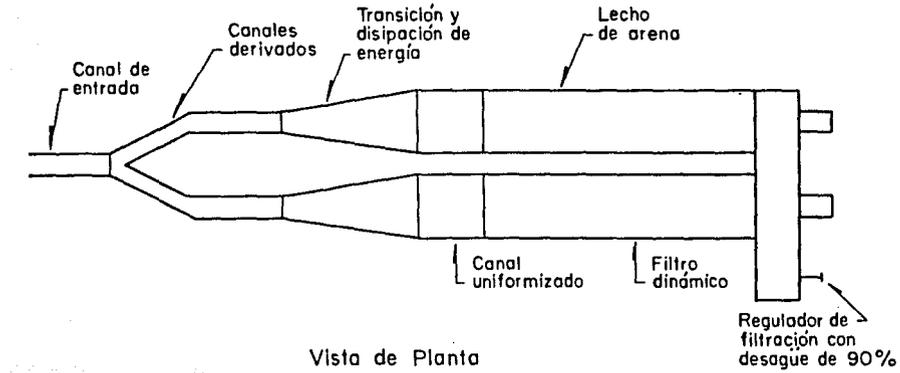
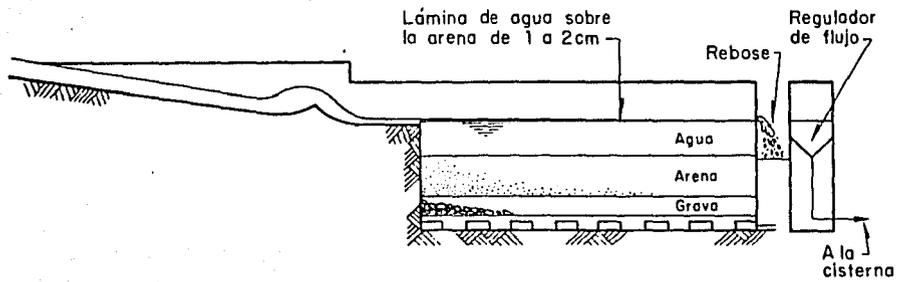


Figura 3. Filtro lento con flujo descendente



Vista de Planta



Corte longitudinal

Figura 4. Filtro lento con flujo horizontal

TABLA 2. CARACTERISTICAS DE LOS FILTROS RAPIDOS

CONDICION POR OPERACION	ASCENDENTES (Fig 5)	DESCENDIENTES Arena Antracita-Arena (Fig 6)		FLUJO MIXTO (Fig 7)	LAVADO POR SIFON (Fig 8)
- Tratamiento previo del agua	CONVENCIONAL DIRECTO	CONVENCIONAL, DIRECTO		CONVENCIONAL	CONVENCIONAL
- Velocidad de filtración (m/h)	4.8 - 7.2	2.0 - 6.7	10 - 25	4.8 - 19.4	10
- Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	114 - 172	90 - 160	240 - 600	114 - 465	240
- Profundidad del medio Antracita (m) Arena (m) Grava (m)	-- 0.25 - 2.0 0.35 - 0.40	- 0.6 - 0.075 0.3 - 0.45	0.45-0.60 0.15-0.30 0.30-0.45	0.45 - 0.80 0.30 - 0.45 0.07 - 0.075	0.6
- Características del medio Antracita Talla efectiva (mm) Coeficiente de uniformidad Arena Talla efectiva (mm) Coeficiente de uniformidad	-- -- 0.9 - 1.1 2.0 - 5.0	- - 0.35- 0.7 < 1.7	0.8 - 2 1.3 - 1.8 0.4 - 0.8 1.2 - 1.6	0.9 - 1.1  0.35 - 0.7 < 1.7	0.6-0.88  0.35-0.7 <1.7
- Pérdida de carga hidrostática (m)	1.8 - 6.09				
- Sistema de drenes	a) Falso fondo	a) Tubería perforadas b) Falso fondo c) Placas porosas d) Boquillas		a) Falso fondo con boqui- llas y asper- sores de aire	a) Falso fondo con coladeras de plásticos inser- tados.

FUENTE: ARBOLEDA, 1973.

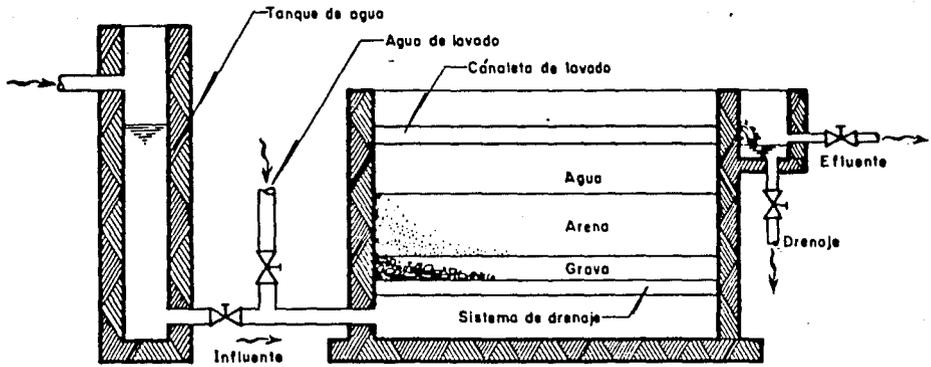


Figura 5. Filtro rápido ascendente

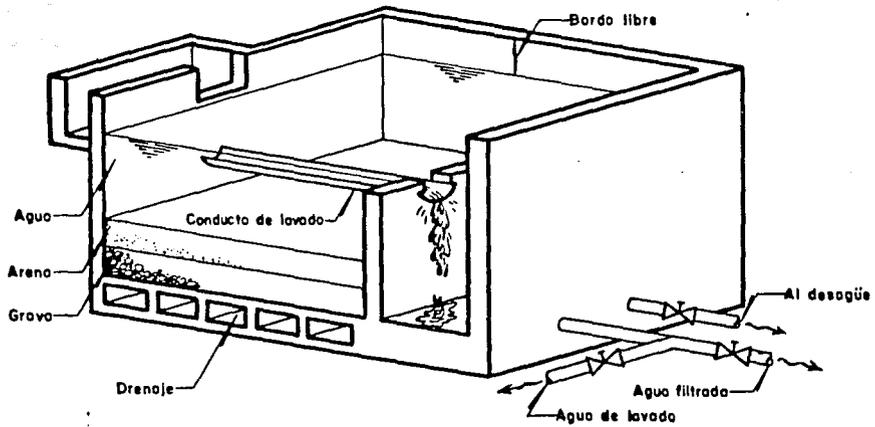


Figura 6. Filtro rápido descendente

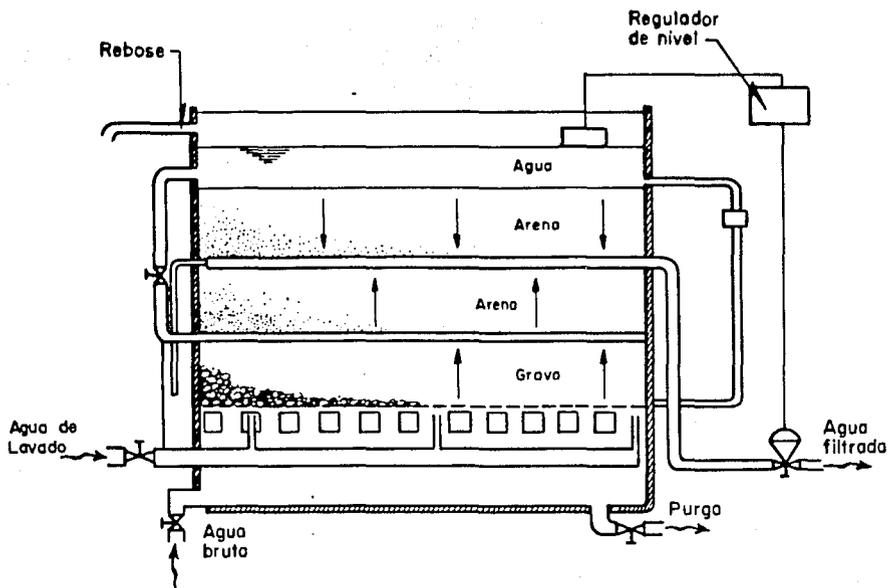
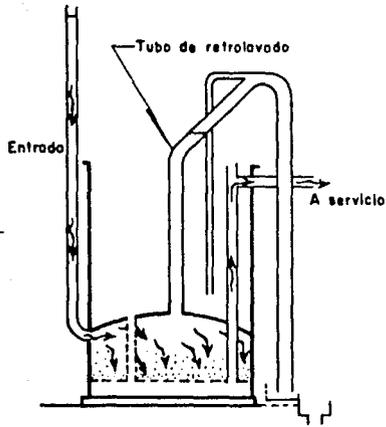
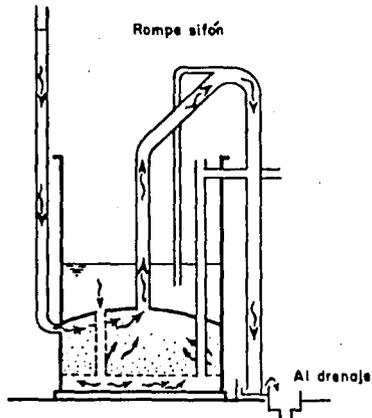


Figura 7. Filtro rápido de flujo mixto



a) En operación



b) Durante el retrolavado

Figura 8. Filtro rápido con lavado por sifón

### 1.1.3.2 Filtros a presión

Estos filtros se encuentran en tanques metálicos totalmente cerrados donde la fuerza impulsora es ejercida por la presión de bombeo. La selección de la talla efectiva del medio y su altura depende de la velocidad de filtración, de la pérdida de carga hidrostática y el tamaño de partícula que será filtrada.

Estos filtros trabajan con altas pérdidas de carga (entre 2 y 19 m c.a.) y velocidades de filtración de 5 a 50 m/h. La figura 9 muestra un filtro a presión clásico.

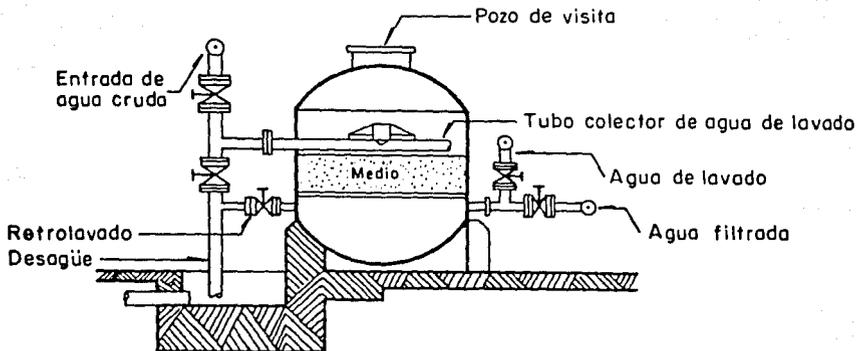


Figura 9. Esquema de un filtro a presión

#### 1.1.4 Clasificación de filtros utilizados en tratamiento de lodos

El tratamiento de los lodos producidos en una planta comprende los siguientes pasos: concentración de lodos, estabilización, condicionamiento, desinfectación, deshidratación, degradación y reducción térmica.

Los filtros tienen una amplia aplicación para la deshidratación ya que eliminan el grueso del agua contenida en los lodos. Los filtros más usados son filtros al vacío, o bien, filtro prensa. La selección de cada equipo depende de las características específicas del lodo producido en la planta.

##### 1.1.4.1 Filtro al vacío

Comúnmente son de dos tipos: de tambor rotatorio simple o de tambor rotatorio con sistemas de transmisión.

El medio filtrante es malla de alambre, resorte enrollado o tela. Su funcionamiento se basa en que, por el vacío, se hace que se adhieran los lodos al medio filtrante que se encuentra sobre un tambor giratorio. En las figuras 10 y 11 se muestran los esquemas típicos de estos filtros.

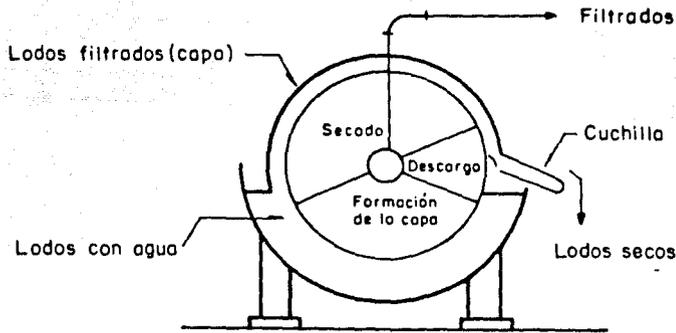


Figura 10. Filtro de tambor rotatorio

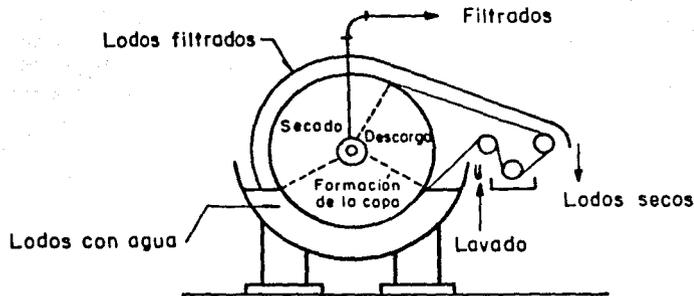


Figura 11. Filtro de tambor rotatorio con sistema de transmisión

#### 1.1.4.2 Filtro prensa

Este filtro utiliza un sistema de placas y marcos sobre los cuales se encuentra el medio filtrante (lona, tela sintética o malla de alambre).

El principio de operación se basa en ejercer una presión por medio de un tornillo manual o dispositivos de cierre hidráulico o eléctrico sobre las placas y los marcos cargados de

lodo húmedo. La presión fuerza a los lodos a adherirse sobre el medio y al agua a ser drenada. La figura 12 esquematiza un filtro prensa típico.

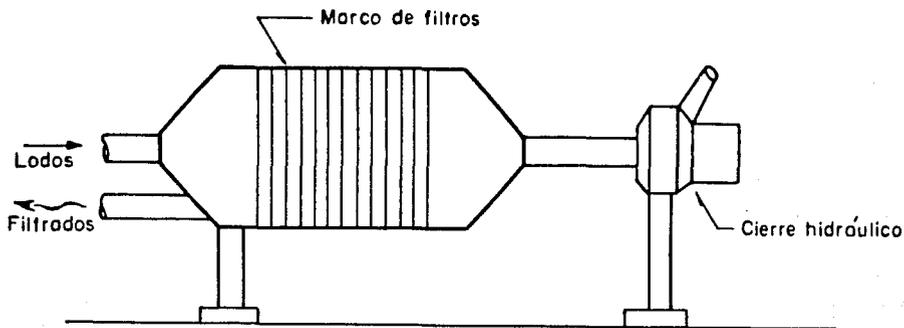


Figura 12. Filtro prensa

FUENTE: Reynolds, 1982.

### 1.2 Variables de filtración

Los principales parámetros que afectan el fenómeno de filtración se presentan en la Tabla 3. Estas variables tienen un papel importante dentro de la operación ya que si se logra un buen control de ellas, se obtendrán efluentes de buena calidad.

TABLA 3. PRINCIPALES VARIABLES DE FILTRACION

<p>1) Las relacionadas con el medio filtrante</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características del medio filtrante</li> <li>- Pérdida de carga del medio filtrante</li> </ul>						
<p>2) Las que afectan directamente la operación</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Características del influente</li> </ul> </td> <td style="width: 5%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <p style="font-size: 2em;">}</p> </td> <td style="width: 45%; vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de SS</li> <li>- Tamaños de partícula y distribución</li> <li>- Carga eléctrica</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor del medio filtrante</li> <li>- Velocidad de filtración</li> <li>- Pérdida de carga permisible</li> </ul> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <p style="font-size: 2em;">}</p> </td> <td style="vertical-align: middle;"> <p>Variables de proceso</p> </td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características del influente</li> </ul>	<p style="font-size: 2em;">}</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de SS</li> <li>- Tamaños de partícula y distribución</li> <li>- Carga eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor del medio filtrante</li> <li>- Velocidad de filtración</li> <li>- Pérdida de carga permisible</li> </ul>	<p style="font-size: 2em;">}</p>	<p>Variables de proceso</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características del influente</li> </ul>	<p style="font-size: 2em;">}</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de SS</li> <li>- Tamaños de partícula y distribución</li> <li>- Carga eléctrica</li> </ul>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesor del medio filtrante</li> <li>- Velocidad de filtración</li> <li>- Pérdida de carga permisible</li> </ul>	<p style="font-size: 2em;">}</p>	<p>Variables de proceso</p>					

### 1.2.1 Variables relacionadas con las características del medio filtrante

La principal característica del medio filtrante es la distribución del tamaño del grano ya que determina el rendimiento de operación de la filtración, la pérdida de carga del medio y su evolución a lo largo de la corrida del filtro. Si el medio filtrante es demasiado pequeño se empleará mucha fuerza para vencer la resistencia del medio; en caso contrario -si el tamaño del medio es demasiado grande- las partículas pequeñas del influente pasarán directamente a través del filtro.

### 1.2.2 Variables que afectan las condiciones de operación en forma directa

Estos parámetros son los que determinan la duración de las corridas y se describen brevemente a continuación.

#### 1.2.2.1 Características del influente

La principal característica del influente es la concentración de sólidos suspendidos. Esta es medida en peso o turbiedad como ejemplo se menciona que un influente de un proceso de filtración terciaria proveniente de lodos activados y filtros rociadores varía entre 6 y 30 mg/l.

Otros factores importantes son el tamaño de la partícula y su distribución (tema que se describirá en la sección 1.5) y la consistencia del flóculo. La calidad del flóculo varía en los procesos de tipo biológico, con la forma de operación y con el tiempo de retención celular.

El incremento en la consistencia de los aglomerados biológicos está relacionado con la producción de polímeros extracelulares así, a valores mayores del tiempo de retención celular aumenta su cohesión hasta un máximo (alrededor de 15 días), a partir del cual decrece (Metcalf & Eddy, 1979).

#### 1.2.2.2 Espesor del medio filtrante

En el caso de los medios simples se tienen los siguientes espesores: de 25 a 40 cm de grava, la cual sirve como soporte del medio y para una mejor distribución del flujo durante la operación de lavado y 60 a 75 cm de arena.

#### 1.2.2.3 Velocidad de filtración

La velocidad de filtración que se puede aplicar depende principalmente de la resistencia del flóculo. Si la consistencia es débil las velocidades de filtración altas tenderán a destrozarlo y sus fragmentos serán arrastrados a través del medio.

El intervalo de velocidades recomendado para filtros de alta tasa es de 5 a 20 m/h ya que el floculo biológico no se desintegra bajo tales condiciones (Metcalf y Eddy, 1979).

Es importante señalar que al utilizar velocidades altas la pérdida de carga a través del medio será mayor y en consecuencia la duración de las corridas será menor.

De manera complementaria en la Tabla 4 se presenta en forma esquemática la clasificación de cada variable así como su significado.

### 1.3 Mecanismos de 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 5 se presentan los principales mecanismos identificados en la literatura.

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

TABLA 4. CLASIFICACION Y SIGNIFICADO DE LAS VARIABLES DE FILTRACION

VARIABLE	SIGNIFICADO
1. Características del medio filtrante - Tamaño de grano - Distribución del tamaño de grano - Forma, densidad y composición del grano	Influyen en la eficiencia de remoción de partículas y determina la pérdida de carga inicial.
- Porosidad del medio filtrante	Determina la cantidad de sólidos a retener
- Espesor del medio filtrante	Influye sobre la pérdida de carga permisible y la duración de corrida
2. Condiciones de operación - Velocidad de filtración	Afecta con 1 y 3 directamente la duración de corrida
- Pérdida de carga permisible	Variable de diseño
3. Características del influente - Concentración de sólidos suspendidos - Tamaño de partícula y su distribución - Carga de partícula - Consistencia de flóculo - Características del fluido	La concentración influye directamente sobre la duración de la corrida.  El tamaño, distribución, carga y consistencia del flóculo que va a ser filtrado influye sobre la eficiencia de remoción.

ADAPTADO DE: TCHOBANOGLOUS (1970) Y METCALF & EDDY (1979).

TABLA 5. MECANISMOS DE REMOCION

1. Cribado\*
  - a) mecánico
  - b) por contacto casual
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.

ADAPTADO DE: Tchobanoglous (1970).

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 partí

cula, 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. En el caso de la filtración de efluentes biológicos de agua residual existen ambos.

### 1.3.1 Descripción de los principales mecanismos de remoción

#### 1.3.1.1 Cribado.

Para este mecanismo existen dos tipos de retención de partículas.

- a) Mecánica
- b) Por contacto casual

Son cribadas mecánicamente las partículas más grandes que los poros del medio filtrante. Mientras que las más pequeñas son atrapadas dentro del medio por contacto casual (figura 13).

Basado en consideraciones geométricas, Hall (Arboleda, 1973) considera que la probabilidad de remoción de una partícula por cribado ( $P_h$ ) 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:

$$P_A \approx \left(\frac{d_p}{D}\right)^{3/2} \quad (1)$$

donde

$d_p$ : diámetro de partículas

$D$ : diámetro de grano del medio

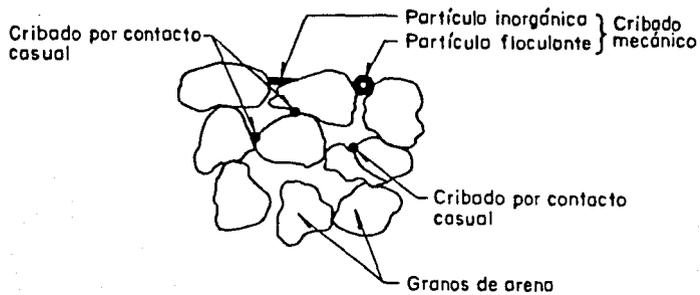


Figura 13. Remoción de partículas por cribado

#### 1.3.1.2 Sedimentación

Hazen 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 de 0.5 mm de diámetro que hay en 1 m<sup>3</sup> de arena con un 40% de espacios vacíos se tendrá un área de 7 200 m<sup>2</sup>.

Suponiendo que un 1/6 del área es horizontal, 3/6 están en contacto con los otros granos de arena y 2/6 bañados por el agua, el área efectiva resulta de  $1/6 \times 2/6 = 1/18$  del área total, o sea 400 m<sup>2</sup>. Por lo que se estima que la superficie aprovechable para la sedimentación es de 5.56% del total. Así, un m<sup>3</sup> de arena actúa como un sedimentador de 400 m<sup>2</sup> 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 es baja (figura 14):

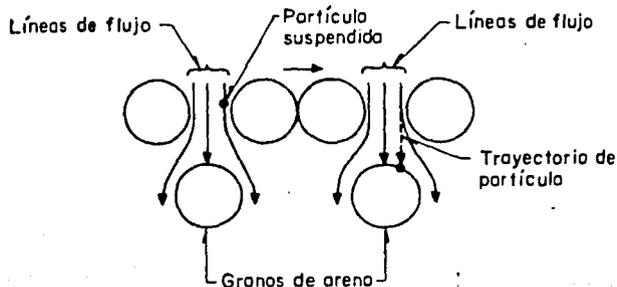


Figura 14. Remoción por sedimentación

### 1.3.1.3 Intercepción

Camp y Stein (Arboleda, 1973) llegaron a la conclusión 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 figura 15 esquematiza esta idea. Si suponemos 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 sí y con el medio filtrante quedando interceptadas.

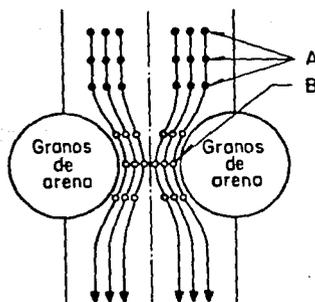


Figura 15. Contacto de partículas. Mecanismo de intercepción.

#### 1.3.1.4 Impacto inercial

Cuando la velocidad del flujo es alta y la partícula es gran de 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 continúan 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 (figura 16).

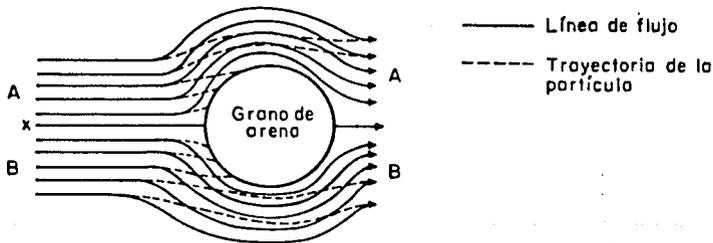


Figura 16. Remoción por impacto inercial

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.

#### 1.3.1.5 Fuerzas de Van Der Walls

V. Mackrle y S. Mackrle (Arboleda, 1973) sugirieron que las fuerzas de Van Der Walls son 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 flujo al quedar adheridas en la superficie de los granos (figura 17). La acción es análoga a un sedimentador, en el cual, la fuerza de gravitación es reemplazada por las fuerzas de Van Der Walls. Cuando actúan a muy corta distancia y el diámetro de partículas es mucho menor del diámetro de grano las fuerzas de Van Der Walls se determinan mediante la fórmula:

$$F_a = \frac{K' d_p}{12 \lambda^2} \quad (2)$$

donde

$K'$ : constante de atracción de Van Der Walls

$d_p$ : diámetro de la partícula

$\lambda$ : distancia entre partícula y grano.

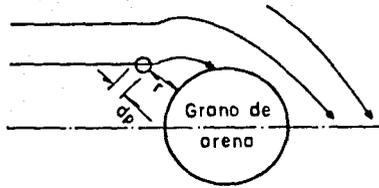


Figura 17. Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van Der Walls.

El valor de la constante de Van Der Walls se incrementa con la densidad de las partículas, de manera que el flóculo más denso se adhiere con mayor fuerza al medio filtrante.

#### 1.3.1.6 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 o 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 éste caso ya que aumenta la adhesión de las partículas pequeñas al medio filtrante (figura 18).

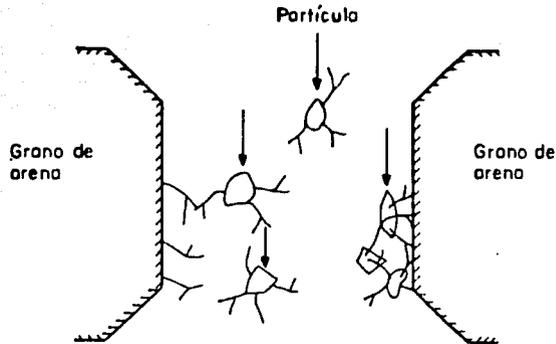


Figura 18. Esquema explicativo de la acción de los polímeros en un medio granular (Interacción química).

#### 1.4 Modelación matemática

El primero en formular una ecuación para representar al fenómeno de filtración fue Iwasaki en 1937. En su primer modelo expresó el cambio de la concentración de sólidos a lo largo de un filtro en función de una concentración instantánea de sólidos ( $C$ ) de la manera:

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

donde:

$C$  : concentración de sólidos suspendidos

$l$  : profundidad del filtro medida desde el inicio del medio

$\lambda$  : coeficiente del filtro

Iwasaki complementó la ecuación anterior con otra que representa la remoción de los sólidos suspendidos en una capa de filtro tomando en cuenta la evolución de la retención en el medio

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1}{v} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (4)$$

donde:

$\sigma$  : depósito específico definido por la cantidad de material depositado por unidad de volumen de filtro

$t$  : tiempo de filtración

$v$  : velocidad de filtración en columna vacía

En este caso la ecuación 3 es también utilizada al generalizar  $\lambda$  de la manera:

$$\lambda = \lambda_0 + c\sigma \quad (5)$$

donde:

$\lambda_0$  : coeficiente inicial del filtro

$c$  : parámetro experimental

El sistema anterior de ecuaciones fue resuelto al suponer que  $\lambda$  es constante al final de la operación. Este primer in

tento de modelación fue aplicado en muchos trabajos sin embargo, siempre varía con cada autor la forma de calcular  $\lambda$ . Entre las expresiones más empleadas se encuentra la de Ives (1960). Ives supone que la remoción del material suspendido depende de:

- 1) La disponibilidad de área en los granos para retener material
- 2) Lo intrincado del camino seguido por el flujo en los poros, y
- 3) La velocidad intersticial.

Demostró además que en el inicio de la filtración  $\lambda$  varía en relación lineal con  $\sigma$ , es decir de acuerdo con la ecuación 5, pero, debido al aumento de velocidad intersticial y a la disminución del área en la cual los sólidos pueden ser retenidos el coeficiente  $\lambda$  disminuye por lo que:

$$\lambda = \lambda_0 + c\sigma - \frac{\phi\sigma^2}{p-\sigma} \quad (6)$$

donde:

$p$  : porosidad del lecho limpio

$c$  y  $\phi$ : parámetros experimentales de filtración

Deb (1969) estableció que la concentración de sólidos suspendidos  $C$  en cualquier punto del filtro es una función de  $l$  y de  $t$

$$C = F(l, t) \quad (7)$$

cuya derivada en el tiempo es

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} \quad (8)$$

o bien

$$\frac{dC}{dt} = v \frac{\partial C}{\partial l} + \frac{\partial C}{\partial t} \quad (9)$$

donde:

$v$  : velocidad local dentro del filtro en su dirección  $l$ .

Al igual que Ives e Iwasaki, el autor considera que la tasa de remoción de partículas del líquido es proporcional a la concentración de partículas presentes. Por lo que:

$$\frac{dC}{dt} = - \lambda' C \quad (10)$$

donde

$\lambda'$ : coeficiente modificado de filtración en ( $T^{-1}$ ).

Como la porosidad macroscópica de un filtro con un depósito específico  $\sigma$  puede expresarse por  $p' = p - \sigma$  la velocidad intersticial en función de la velocidad en ducto vacío ( $v$ ) será:

$$V = \frac{v}{(p - \sigma)} \quad (11)$$

Por lo que de 9, 10 y 11

$$\frac{dC}{dt} = \frac{v}{(p - \sigma)} \frac{\partial C}{\partial l} + \frac{\partial C}{\partial t} = - \lambda' C \quad (12)$$

Ecuación que representa una versión más general de la ecuación 3 del modelo de Iwasaki.

Deb desarrolló la segunda ecuación de su modelo a partir de un balance de masa para una capa del filtro de espesor  $\delta l$ .

La cantidad de materia que entra está dada por:

$$\rho_s C v a = \text{material que entra} \quad (13)$$

donde:

$\rho_s$ : densidad del material retenido

$a$ : área del filtro perpendicular al flujo

y el material que sale por:

$$\rho_{\delta} \left( C + \frac{\partial C}{\partial \ell} \ell \right) v a = \text{material que sale} \quad (14)$$

Por otra parte, la tasa de material retenido en función del volumen de sólido depositado por unidad volumétrica de medio filtrante ( $\sigma_{\delta}$ ) es:

$$\frac{\partial \sigma_{\delta}}{\partial t} \rho_{\delta} a \partial \ell + (p - \sigma) \frac{\partial C}{\partial t} \rho_{\delta} a \partial \ell \quad (15)$$

Al combinar las ecuaciones 13, 14 y 15 y reducir términos para un flujo continuo se tiene:

$$v \frac{\partial C}{\partial \ell} + \frac{\partial \sigma_{\delta}}{\partial t} + (p - \sigma) \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

si se considera la porosidad del material depositado  $p_{\delta}$ ,  $\sigma_{\delta}$  puede sustituirse por:

$$\sigma_{\delta} = \sigma (1 - p_{\delta}) \quad (17)$$

por lo que la ecuación 16 toma la forma:

$$v \frac{\partial C}{\partial \ell} + (1 - p_{\delta}) \frac{\partial \sigma}{\partial t} + (p - \sigma) \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (18)$$

La expresión 18 equivale a la segunda ecuación del modelo de Iwasaki (4) sólo que ésta considera el cambio de la concentración de la suspensión adentro de los poros.

Para resolver el sistema anterior las ecuaciones 12 y 18 fueron expresadas en función de parámetros adimensionales

$$(\underline{x} = \frac{v}{L} t, \underline{\ell} = \frac{\ell}{L}, \underline{C} = \frac{C}{C_0}):$$

$$\frac{1}{(p - \sigma)} \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{\ell}} + \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{x}} = - \underline{\lambda} \underline{C} \quad (19)$$

y

$$F \frac{\partial \sigma}{\partial \underline{x}} + \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{\ell}} + (p - \sigma) \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{x}} = 0 \quad (20)$$

donde:

$p$  : porosidad de un filtro limpio. Es constante para un filtro homogéneo

$\underline{C}$  : relación de la concentración de la suspensión en cualquier profundidad y la concentración inicial, esto es,

$$\underline{C} = \frac{C}{C_0}$$

$\underline{\ell}$  : profundidad adimensional,  $\underline{\ell} = \ell/L$

$\underline{x}$  : tiempo adimensional,  $\underline{x} = (tv/L)$

$\underline{\lambda}$  : coeficiente adimensional de filtración,  $\underline{\lambda} = \lambda' L/v$

no es constante para una corrida sino es función de  $\underline{\ell}$  y  $\underline{x}$

$F$  : coeficiente adimensional de relación de sólidos,  $F = \frac{1-p_\delta}{C_0}$   
su valor es constante para  $C_0$  y  $p_\delta$  constantes.

Si se combinan las ecuaciones 19 y 20 se tiene que:

$$\frac{F}{p - \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} = \frac{\lambda}{C} \quad (21)$$

A través del análisis dimensional, Deb estableció que  $\lambda$  está dado por:

$$\lambda = pL \frac{v}{v} \left[ \frac{v(p-\sigma)d}{v\psi(1-p)} \right] \frac{1}{X} \left[ \frac{\rho_\Delta}{\rho} \right]^{a'} \left[ \frac{v}{v} \frac{p_\Delta d_\Delta}{\psi'(1-p_\Delta)} \right]^{b'} C' \quad (22)$$

donde:

$p$  : porosidad

$\rho$  : densidad del líquido que se esta filtrando

$v$  : viscosidad cinemática del líquido

$d$  : talla media de los granos limpios

$\psi$  : factor de forma de los granos limpios

$\rho_\Delta$  : densidad de las partículas en suspensión

$\psi'$  : factor de forma de las partículas en suspensión

$a'$ ,  $b'$  y  $C'$ : exponentes experimentales.

En la ecuación 22,  $X'$  representa la relación del factor de forma de los granos con depósito y la de los granos limpios.

Su valor es obtenido en función del número de contactos,  $n$ ,

de cada grano con los otros y del incremento en la talla

comparada con el tamaño original,  $\Delta d/d$ .

$$X = 1 + \left(2 - \frac{n}{2}\right) \frac{\Delta d}{d} + \left(1 - \frac{n}{2}\right) \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 \quad (23)$$

En la ecuación 23,  $\Delta d/d$  se calcula por:

$$\frac{\Delta d}{d} = \left( \frac{12}{n\psi - 24} \right) - \left[ \frac{144}{(n\psi - 24)^2} - \frac{24}{(n\psi - 24)} \frac{\sigma}{3(1-p)} \right]^{1/2} \quad (24)$$

El valor de  $n$  es, a su vez, calculado a partir de la porosidad del lecho: La relación propuesta por Deb y cuya deducción se presenta en el anexo 1 es:

$$n = \frac{15.7714 - 26.5109 p}{1 - p} \quad (25)$$

Para el caso especial de temperatura constante, talla uniforme de granos y de sólidos a filtrar y tasa de filtración constante la ecuación 22 se simplifica en:

$$\lambda = B' \left( \frac{X}{P - \sigma} \right)^{A'} \quad (26)$$

donde:

$A'$  y  $B'$ : parámetros experimentales supuestos constantes para una corrida de filtración.

El comportamiento de un filtro podría ser predeterminado al resolver las ecuaciones anteriores (19, 20 y 26) pero, son ecuaciones en derivadas parciales no lineales sin solución analítica conocida.

Por otra parte Deb estableció a partir de la ecuación de Ko-

zeny de pérdidas de carga la siguiente fórmula que se aplica a medios homogéneos de granos uniformes:

$$\frac{\partial H}{\partial \underline{L}} = \frac{\partial H}{\partial \underline{L}} \Big|_0 \left[ 1 + \zeta (1 - 10^{-K\sigma}) \right] \left[ \frac{p}{p-\sigma} \right]^3 \quad (27)$$

donde:

$\frac{\partial H}{\partial \underline{L}}$  : pérdida de carga adimensional para cualquier tiempo

$\frac{\partial H}{\partial \underline{L}} \Big|_0$  : pérdida de carga adimensional al inicio

$\zeta$  y  $K$ : coeficientes de pérdida de carga para filtración.

A partir de un ensayo experimental se determina  $\zeta$  y  $K$ , la pérdida de carga a diferentes alturas se puede obtener para varios valores de  $\sigma$ .

En la ecuación 27 el valor de la pérdida de carga inicial se obtiene a partir de la ecuación de Kozeny:

$$\frac{\partial H}{\partial \underline{L}} \Big|_0 = J \psi^2 \frac{v}{g} \frac{(1-p)^2}{p^3} \frac{v}{d^2} L \quad (28)$$

donde:

$J$  : constante adimensional

$v$  : viscosidad cinemática del agua

$\psi$  : factor de forma de los granos

### 1.4.1 Solución al modelo matemático de Deb por el método de diferencias finitas.

El modelo de Deb se basa en:

$$\frac{1}{(P-\sigma)} \frac{\partial C}{\partial \underline{\ell}} + \frac{\partial C}{\partial \underline{t}} = - \lambda \underline{C} \quad (29)$$

y

$$F \frac{\partial \sigma}{\partial \underline{t}} + \frac{\partial C}{\partial \underline{\ell}} + (P - \sigma) \frac{\partial C}{\partial \underline{t}} = 0 \quad (30)$$

Como se mencionó estas ecuaciones son no lineales por lo que es posible encontrar una solución particular que cumpla con ciertas condiciones de frontera.

#### 1.4.1.1 Condiciones de frontera

Para un proceso de filtración la concentración adimensional de una suspensión  $\underline{C}(\underline{\ell}, \underline{t})$  y el depósito específico  $\sigma(\underline{\ell}, \underline{t})$  debe satisfacer las siguientes condiciones para cualquier tiempo y longitud adimensionales:

$$\underline{C}(0, \underline{t}) = f(\underline{t}) \quad (31)$$

esto es,  $\underline{C} = f(\underline{t})$  para  $\underline{\ell} = 0$  para  $\underline{t} > 0$

Para la condición inicial:

$$\underline{c}(\underline{\ell}, 0) = \delta_1(\underline{\ell}) \quad (32)$$

así

$$\underline{c} = \delta_1(\underline{\ell}) \text{ para } \underline{t} = 0. \text{ para cualquier valor de } \underline{\ell}$$

En este caso  $t_0$  se considera cuando la suspensión desplaza el agua limpia contenida en los poros.

Además:

$$\sigma(\underline{\ell}, 0) = 0 \quad (33)$$

La ecuación 31 para un influente de concentración constante se reduce a:

$$\underline{c}(0, \underline{t}) = 1.0 \quad (34)$$

De esta forma el problema se limita a obtener  $\underline{c}(\underline{\ell}, \underline{t})$  y  $\sigma(\underline{\ell}, \underline{t})$  y esto se logra a través de un método numérico para puntos discretos dentro del filtro a un tiempo  $\underline{t} > 0$  determinado.

#### 1.4.1.2 Solución explícita por diferencias centrales

En primer lugar Deb estableció una malla para el plano  $\ell-t$  como la presentada en la figura 19. En ella  $\Delta \ell$  es  $h$  y  $\Delta t$  es

k. La concentración y el depósito adimensional es entonces representada para cualquier posición y en cualquier tiempo por  $\underline{c}_{i,j}$  y  $\sigma_{i,j}$  para los valores  $\underline{l} = \underline{l}_i$  y  $\underline{t} = \underline{t}_j$ .

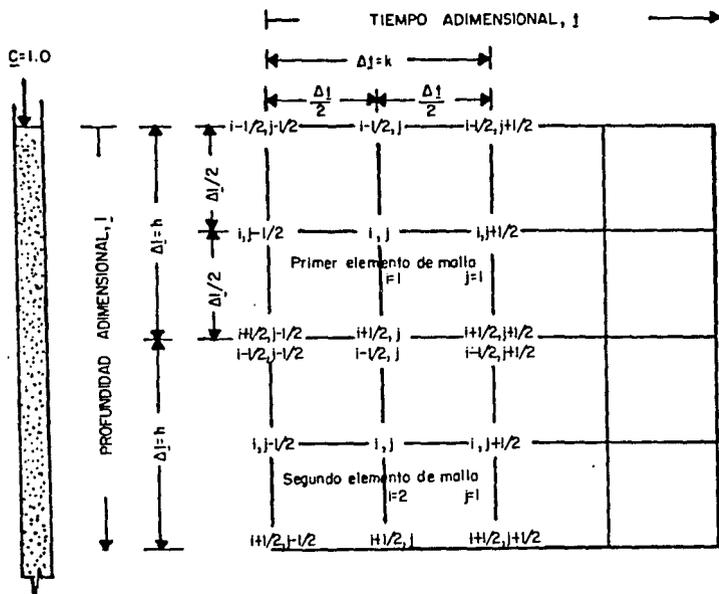


Figura 19. Malla de diferencias finitas para filtración

Usando las diferencias centrales con operadores del orden  $h$  y  $k$  para el punto  $(i, j)$  se tiene:

$$\frac{\partial C}{\partial \ell} = \frac{C_{i+1/2, j} - C_{i-1/2, j}}{h} = \frac{\left( \frac{C_{i+1/2, j+1/2} + C_{i+1/2, j-1/2}}{2} - \frac{C_{i-1/2, j+1/2} + C_{i-1/2, j-1/2}}{2} \right)}{h} \quad (35)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{i, j+1/2} - C_{i, j-1/2}}{k} = \frac{\left( \frac{C_{i+1/2, j+1/2} + C_{i-1/2, j+1/2}}{2} - \frac{C_{i+1/2, j-1/2} + C_{i-1/2, j-1/2}}{2} \right)}{k} \quad (36)$$

y

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\sigma_{i, j+1/2} - \sigma_{i, j-1/2}}{k} \quad (37)$$

Los valores promedio del depósito específico y de la concentración adimensional para el intervalo  $\Delta t$  están dados por:

$$\sigma_{i, j} = \frac{\sigma_{i, j+1/2} + \sigma_{i, j-1/2}}{2} \quad (38)$$

y

$$C_{i-1/2, j} = \frac{C_{i-1/2, j+1/2} + C_{i-1/2, j-1/2}}{2} \quad (39)$$

Al sustituir (37), (38) y (39) en (21) se tiene:

$$\left( \frac{F}{p - \frac{\sigma_{i, j+1/2} + \sigma_{i, j-1/2}}{2}} \right) \left( \frac{\sigma_{i, j+1/2} - \sigma_{i, j-1/2}}{k} \right) = -\lambda \left( \frac{C_{i-1/2, j+1/2} + C_{i-1/2, j-1/2}}{2} \right)$$

(40)

de 40 se tiene:

$$\sigma_{i,j+1/2} = \frac{\frac{p\lambda k}{F} \left( \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2} \right)}{1 + \frac{\lambda k}{2F} \left( \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2} \right)} - \frac{\frac{\lambda k \sigma_{i,j-1/2}}{2F} \left( \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2} \right) + \sigma_{i,j-1/2}}{1 + \frac{\lambda k}{2F} \left( \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2} \right)}$$

(41)

De (39) y (41):

$$\sigma_{i,j+1/2} = \frac{\left( \frac{\lambda C_{i-1/2,jk}}{F} \right) \left( p - \frac{\sigma_{i,j-1/2}}{2} \right) + \sigma_{i,j-1/2}}{\left( 1 + \frac{\lambda C_{i-1/2,jk}}{2F} \right)}$$

(42)

Pero, si  $\frac{\lambda k}{F} C_{i-1/2,j} = R$  entonces la ecuación (42):

$$\sigma_{i,j+1/2} = \frac{R \left( p - \frac{\sigma_{i,j-1/2}}{2} \right) + \sigma_{i,j-1/2}}{(1 + R/2)}$$

(43)

Mediante un razonamiento análogo la ecuación 20 en términos de diferencias finitas (35, 36 y 37) es:

$$\begin{aligned}
& F\left(\frac{\sigma_{i,j+1/2} - \sigma_{i,j-1/2}}{k}\right) + \left(\frac{C_{i+1/2,j+1/2} + C_{i+1/2,j-1/2}}{2h} - \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2h}\right) + \\
& + \left(p - \frac{\sigma_{i,j+1/2} - \sigma_{i,j-1/2}}{2}\right) \left(\frac{C_{i+1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j+1/2}}{2k} - \frac{C_{i+1/2,j-1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2k}\right) = \\
& = 0 \tag{44}
\end{aligned}$$

que al ordenar queda:

$$\begin{aligned}
\frac{C_{i+1/2,j+1/2}}{2h} &= \frac{-F\left(\frac{\sigma_{i,j+1/2} - \sigma_{i,j-1/2}}{k}\right) + \left(p - \frac{\sigma_{i,j+1/2} - \sigma_{i,j-1/2}}{2}\right)}{\frac{1}{2h} + \left(\frac{p}{2k} - \frac{\sigma_{i,j+1/2} + \sigma_{i,j-1/2}}{4k}\right)} \\
& \frac{\left(\frac{C_{i+1/2,j-1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2k}\right) + \frac{C_{i-1/2,j+1/2} + C_{i-1/2,j-1/2}}{2h}}{\frac{1}{2h} + \left(\frac{p}{2k} - \frac{\sigma_{i,j+1/2} + \sigma_{i,j-1/2}}{4k}\right)} - \\
& - \frac{\frac{C_{i+1/2,j-1/2}}{2h} - \left(\frac{C_{i-1/2,j+1/2}}{2k}\right) \left(p - \frac{\sigma_{i,j+1/2} + \sigma_{i,j-1/2}}{2}\right)}{\frac{1}{2h} + \left(\frac{p}{2k} - \frac{\sigma_{i,j+1/2} + \sigma_{i,j-1/2}}{4k}\right)} \tag{45}
\end{aligned}$$

#### 1.4.1.3 Ecuación para las pérdidas de carga

Para resolver la ecuación de las pérdidas de carga (ecua-

ción 27) es necesario fijar las siguientes condiciones de frontera.

$$\text{Para} \quad H(\underline{\ell}, 0) = F(\underline{\ell}) \quad (46)$$

$$\text{Y} \quad H(0, \underline{t}) = F_1(\underline{t}) \quad (47)$$

En el principio del lecho siempre se tendrá que:

$$H(0, \underline{t}) = 0$$

En términos de diferencias finitas  $\frac{\partial H}{\partial \underline{\ell}}$  se representa por:

$$\frac{\partial H}{\partial \underline{\ell}} = \frac{H_{i+1/2, j+1/2} - H_{i-1/2, j+1/2}}{h} \quad (48)$$

De (27) y (48) se tiene que:

$$\frac{H_{i+1/2, j+1/2} - H_{i-1/2, j+1/2}}{h} = \frac{\partial H}{\partial \underline{\ell}} \bigg|_0 \left[ 1 + \zeta(1-10^{-K\sigma_{i, j+1/2}}) \right] \left[ \frac{P}{(P-\sigma_{i, j+1/2})} \right]^3 \quad (49)$$

De la cual

$$H_{i+1/2, j+1/2} = H_{i-1/2, j+1/2} + \frac{\partial H}{\partial \underline{\ell}} \bigg|_0 \left[ 1 + \zeta(1-10^{-K\sigma_{i, j+1/2}}) \right] \left[ \frac{P}{(P-\sigma_{i, j+1/2})} \right]^3 \quad (50)$$

#### 1.4.2 Programa de computadora para la solución del modelo

En la figura 19 se mostró la malla de diferencias finitas utilizada en la solución de las ecuaciones 29 y 30. Los valores  $\underline{C}$ ,  $\sigma$  y  $H$  a  $\underline{t} = 0$  se obtienen a partir de las condiciones iniciales de la sección 1.4.1.1. El cálculo se inicia en el primer elemento de la malla esto es,  $i = 1$ ,  $j = 1$  y se continua a través de la profundidad del lecho, para lo cual se incrementa el valor de  $i$  en cada tiempo. Para el primer elemento de la malla, definido por  $\Delta \underline{\ell}$  y  $\Delta \underline{t}$ , las concentraciones de la suspensión que entran -al principio y final del intervalo  $\Delta \underline{t}$ - son:  $\underline{C}_{i-1/2, j-1/2}$  y  $\underline{C}_{i-1/2, j+1/2}$  respectivamente, y las concentraciones que salen del elemento al correspondiente intervalo de tiempo son  $\underline{C}_{i+1/2, j-1/2}$  y  $\underline{C}_{i+1/2, j+1/2}$ . Durante este intervalo de tiempo el depósito específico promedio debe incrementarse de  $\sigma_{i, j-1/2}$  a  $\sigma_{i, j+1/2}$ .

El valor de  $\sigma_{i, j+1/2}$  al final de  $\Delta \underline{t}$  en la primera capa del filtro se calcula con la ecuación 42 para lo cual se conoce los valores de  $k$  y  $F$  para una corrida particular; el valor de  $\underline{C}_{i-1/2, j}$  se define por la condición de frontera  $\underline{C}(0, \underline{t}) = 1.0$  y  $\sigma_{i, j-1/2}$  mediante la condición inicial  $\sigma(\underline{\ell}, 0) = 0$ . El coeficiente  $\underline{\lambda}$  de la ecuación 42 es función de  $\sigma_{i, j+1/2}$  y se conoce a partir de las ecuaciones 23, 24 y 26. Por lo tanto la ecuación 42 se puede resolver para

$\sigma_{i,j+1/2}$  por iteraciones.

En la iteración siguiente el valor de  $\underline{\lambda}$  se calcula con  $\sigma_{i,j-1/2}$ . Así, el lado derecho de la ecuación 42 se calcula para obtener el primer valor de prueba de  $\sigma_{i,j+1/2}$ . La operación se repite hasta que  $\sigma_{i,j+1/2}$  converge con el valor actual.

Los valores de  $\underline{C}_{i-1/2,j-1/2}$  y  $\underline{C}_{i-1/2,j+1/2}$  de la ecuación 45 se conocen por la condición de frontera [ $\underline{C}(0, \underline{t}) = 1.0$ ] y los valores  $\underline{C}_{i+1/2,j-1/2}$  y  $\sigma_{i,j-1/2}$  de las condiciones iniciales dadas por las ecuaciones 32 y 33. El valor de  $\sigma_{i,j+1/2}$  se obtiene al usar la ecuación 42. Así la única incógnita es  $\underline{C}_{i+1/2,j+1/2}$  que se calcula con la ecuación 45.

Por otra parte para obtener la pérdida de carga en la primera capa del filtro al final del intervalo de tiempo  $\Delta \underline{t}$  se utiliza la ecuación 50. En esta ecuación, el valor de  $H_{i-1/2,j+1/2}$  se obtiene de la condición de frontera  $H(0, \underline{t}) = 0$ , el valor de  $\partial H / \partial \underline{\lambda} |_0$  se calcula con la ecuación 28 y  $\sigma_{i,j+1/2}$  con la ecuación 42.

De esta forma todos los valores de la suspensión (concentración, depósito específico y pérdidas de carga) del primer elemento de la malla limitada por  $\Delta \underline{t}$  y  $\Delta \underline{\lambda}$  se obtienen. Para resolver el segundo elemento de la malla ( $i = 2$  y  $j = 1$ ) los va-

lores de  $\underline{C}_{i+1/2, j-1/2}$  y  $\sigma_{i, j-1/2}$  se obtienen de las condiciones iniciales. Los valores de  $\underline{C}_{i-1/2, j+1/2}$  y  $H_{i-1/2, j+1/2}$  se toman de la primera malla resuelta. Así,  $\underline{C}_{i+1/2, j+1/2}$ ,  $\sigma_{i, j+1/2}$  y  $H_{i+1/2, j+1/2}$  son incógnitas que se calculan con el procedimiento antes descrito (ecuaciones 42, 45 y 50). De manera similar se obtienen todos los valores de  $\underline{C}$ ,  $\sigma$  y  $H$  para todas las profundidades del lecho e intervalos de tiempo.

Para la codificación del programa se utilizó el esquema de la figura 20 equivalente a la figura 19.

En el anexo 2 se muestra tanto el diagrama de flujo como el listado del programa empleado.

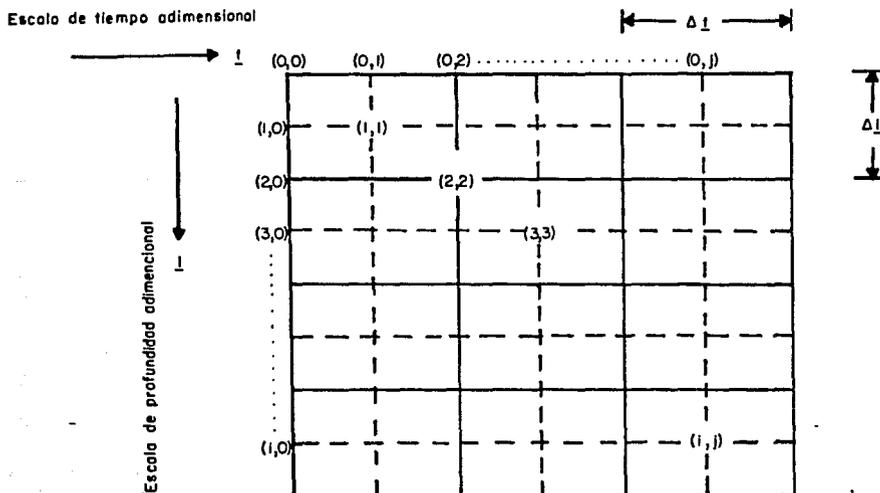


Figura 20. Esquema de la numeración de la red para el programa de computadora.

## 1.5 Aplicación de la filtración al tratamiento de agua

### 1.5.1 Potabilización

La filtración es uno de los procesos de tratamiento más antiguo ;en un inicio tuvo un carácter puramente doméstico al colocar piedras porosas en tinajas y hacer fluir el agua a través de ellas. Posteriormente, se construyeron los primeros filtros industriales cuyo filtrado era envasado para su venta. De esta forma, surgieron en Europa las primeras compañías de agua de carácter privado.

La primera planta de filtros lentos de arena se construyó en Londres en 1829, por "The Chelsea Water Work Co.". En 1856 en Francia aparecieron los filtros a presión (Fonvielle y Scuchon) cuyo objetivo era el de colar los sedimentos del agua.

El mejor conocimiento del proceso condujo al diseño de los filtros rápidos, que aparecieron en Norteamérica a mediados del siglo pasado. A estos filtros se les llamó "mecánicos" o "americanos" y su principal innovación radicaba en que la limpieza del medio filtrante se hacía por inversión del sentido del flujo, mientras que en los filtros lentos "filtros ingleses" se realizaba por raspado de la superficie del medio.

El sistema de retrolavado facilitó la operación continua del filtro y permitió el uso de cargas superficiales mayores que la de los filtros lentos. Posteriormente en Bélgica, Alemania y Francia el sistema de coagulación-filtración fue adaptado pero resultó que los filtros se tapaban con demasiada frecuencia (por la falta de un sistema de sedimentación adecuado) sobretodo, cuando la concentración de sólidos en el influente era muy alta. Lo anterior obligaba a gastar mucha agua tratada para el lavado. Fue entonces que en 1880 en Holanda B. Salbach construyó como pretratamiento un sistema de sedimentadores (coagulación con sulfato de aluminio). Con esta idea en 1898, en Estados Unidos, se introdujo un sistema de coagulación y sedimentación en tanques separados para remover la mayoría de las partículas sedimentables antes de llegar a los filtros rápidos. Aparece así la concepción de las plantas de potabilización modernas, en las que todos los tratamientos son preparativos o complementarios a la filtración y cuyos principios se han aplicado al tratamiento del agua residual.

#### 1.5.2 Aguas residuales

La filtración de aguas residuales se puede realizar tanto con efluentes primarios (Matsumoto, 1982) como secundarios, en éste último caso se denomina también filtración terciaria.

Aunque los principales diseños de filtración terciaria son similares a los sistemas de filtración de agua potable existen ciertas diferencias que requieren especial atención:

- . La concentración del influente para instalaciones de tratamiento terciario no es constante y depende de la operación del proceso anterior.
  
- . La naturaleza de las partículas a remover difiere. En agua potable las partículas son coloidales y contienen material inorgánico, en tanto que, en la filtración terciaria son principalmente de origen orgánico.
  
- . La confiabilidad del sistema y la calidad del efluente tratado es más baja que en los sistemas de agua potable.
  
- . Una especial consideración debe de darse a la formación de aglomerados con grasa y microorganismos 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 carreras y la baja relación filtrado-lavado (R.C. Siemack, 1984).

### 1.5.2.1 Filtración de efluentes primarios

Aunque la filtración de agua residual se ha limitado al tratamiento de efluentes secundarios, el desarrollo de filtros de lecho pulsante ha sido la causa de que la filtración de efluentes primarios se comience a practicar.

El problema principal de la filtración de efluentes primarios sedimentados es la alta concentración de sólidos suspendidos (del orden de 100 mg/l), causa principal del desarrollo de las pérdidas de carga; además la presencia de lama biológica y grasa formadora de bolas de lodo han favorecido este problema.

Los filtros de lecho pulsante especialmente concebidos para este caso cuentan con las características siguientes:

- Pulsación periódica de aire sobre el medio para separar y redistribuir los sólidos retenidos en las capas superiores del filtro. La rapidez del desarrollo de la pérdida de carga decrece de esta forma logrando que la duración de la carrera se incremente en más de cuatro veces, como resultado.
- Introducción de un ciclo de limpiado químico como parte de un programa rutinario de mantenimiento para evitar la

formación de aglomerados. El medio pulsante es inundado con blanqueador y detergente en solución. Después de 30 min el filtro es lavado, la grasa y lama biológica acumulada dentro del medio filtrante son eliminadas (Matsumoto, 1982).

#### 1.5.2.2 Filtración de efluentes secundarios

La distribución y tamaño de partículas observado en un efluente sedimentado de una planta a escala piloto de lodos activados con tiempo de retención celular de 10 días se muestra en la figura 21.

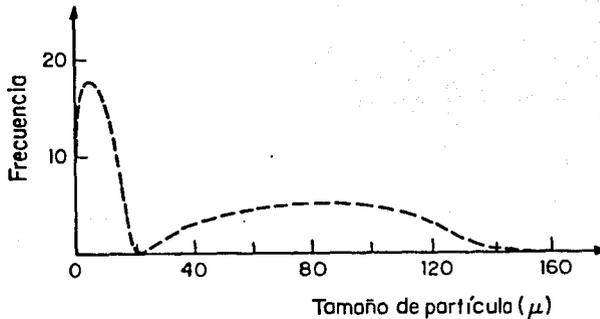


Figura 21. Distribución típica de tamaños de partícula encontrada en un efluente biológico sedimentado (Metcalf & Eddy, 1979).

En la figura se observa que las partículas se agrupan en dos intervalos caracterizados por un diámetro equivalente. El intervalo de partículas pequeñas va de 1 a  $15\mu$  (con tamaño promedio de 3 a  $5\mu$ ) y el de partículas grandes de 50 a  $160\mu$  (con tamaño promedio de 80 a  $90\mu$ ). Metcalf y Eddy (1979) señalan que existen pocas partículas cercanas a  $500\mu$  y que estas además se caracterizan por ser ligeras.

En peso, la fracción de las partículas pequeñas corresponde al 40 y 60% del total. Este porcentaje varía dependiendo de las condiciones de operación de los procesos biológicos y el grado de floculación logrado en el sedimentador secundario.

El hecho de tener una distribución bimodal implica que el mecanismo de remoción de partículas de  $1\mu$  será diferente de las de  $80\mu$ .

## 2. DESCRIPCION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE C.U.

### 2.1 Antecedentes

La planta de tratamiento de C.U. empezó a operar en septiembre de 1982. El agua que se recolecta es una mezcla de las aguas residuales de C.U., y de la colonia Copilco El Alto. La planta se diseñó para tratar 40 l/s (3456 m<sup>3</sup>/día) pero, por diversos problemas no se ha alcanzado este gasto. Actualmente trata sólo 23 l/s (1987 m<sup>3</sup>/día).

Los tres procesos de descontaminación empleados son de tipo biológico. El agua tratada sirve para riego de las zonas verdes de C.U.

La figura 22 presenta un esquema general de la planta.

ZONA RESIDENCIAL

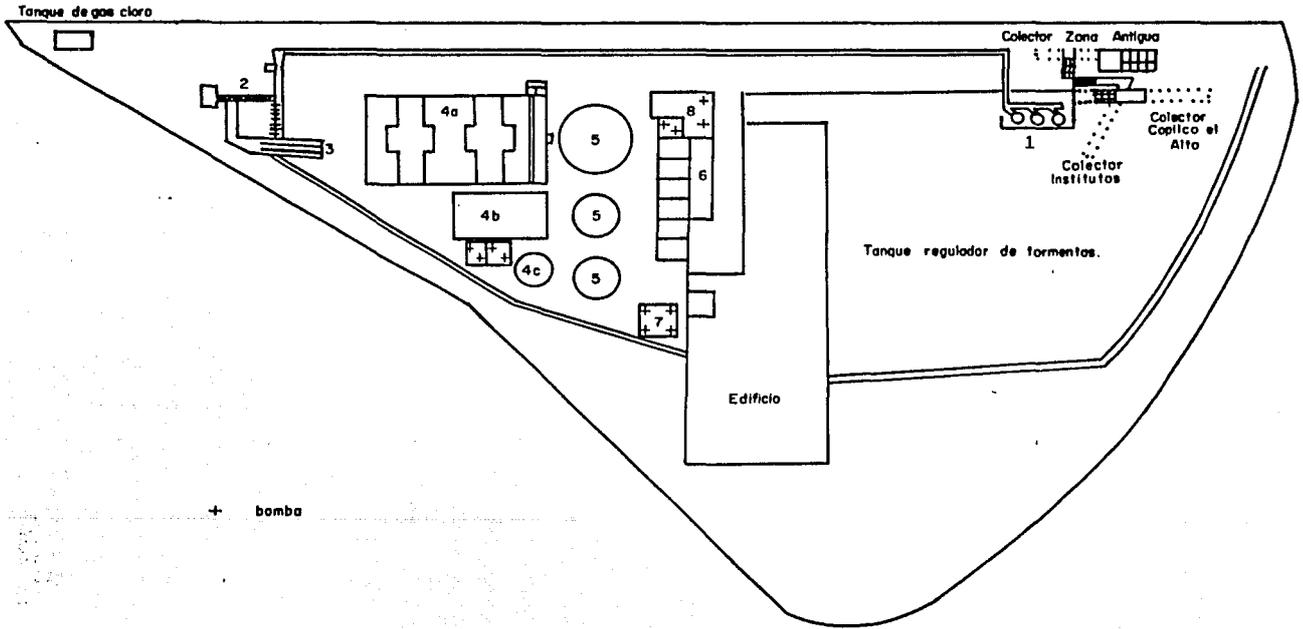


Figura 22. Distribución de la FTCU

Los componentes del proceso son:

1. Sistema de bombeo
2. Desarenador
3. Sistemas de medición del gasto
4. Reactores biológicos (colocados en paralelo)
  - a) Lodos activados
  - b) Biodiscos
  - c) Filtro percolador
5. Sedimentadores secundarios
6. Filtros de arena
7. Cárcamo de cloración y de aguas tratadas
8. Cárcamo de lavado y pluviales

## 2.2 Diagrama de flujo de la PTCU

Por medio de dos colectores que conducen el agua de desecho de la UNAM (colector Humanidades o zona antigua y colector de institutos) y un tercero con agua de Copilco El Alto se recaba toda el agua que llega a la PTCU.

La figura 23 muestra el diagrama de flujo del sistema. En dicho diagrama destaca el agua que es consumida por el proceso (purgas de lodos y lavado de filtros).

Actualmente el problema más drástico de la PTCU, debido en

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

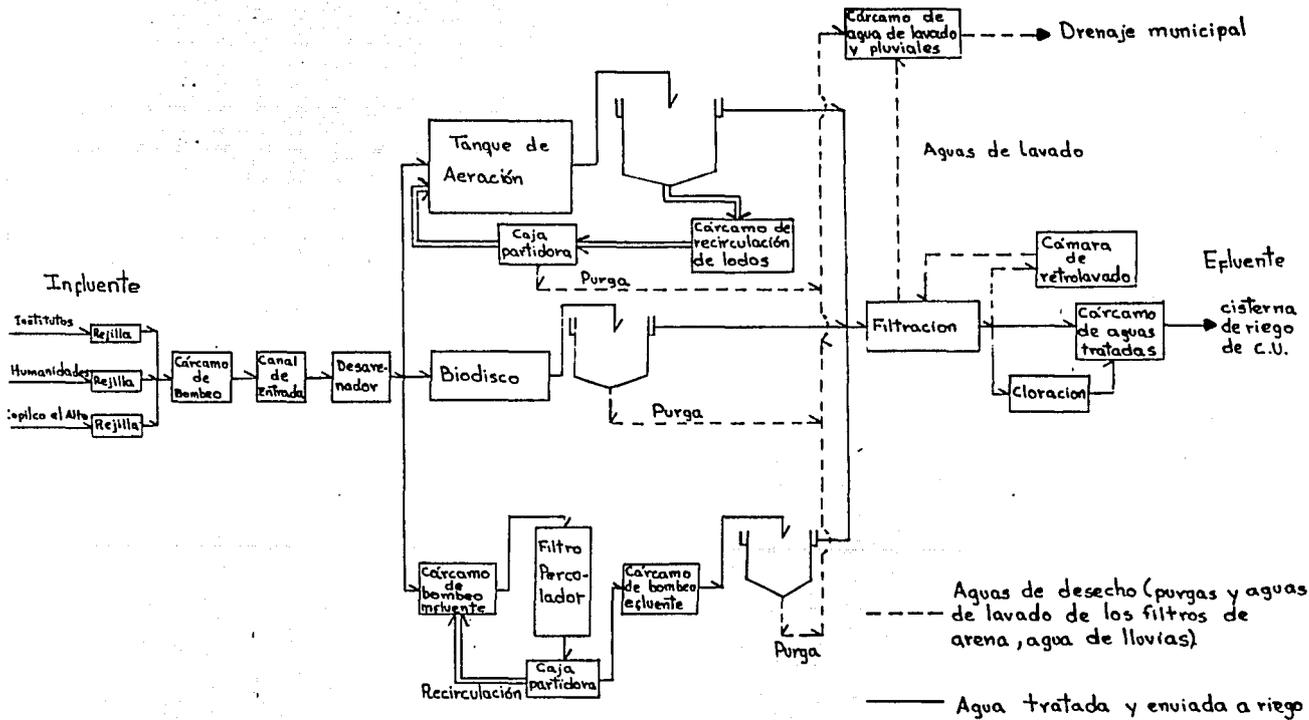


Figura 23. Diagrama de flujo de la PTCU

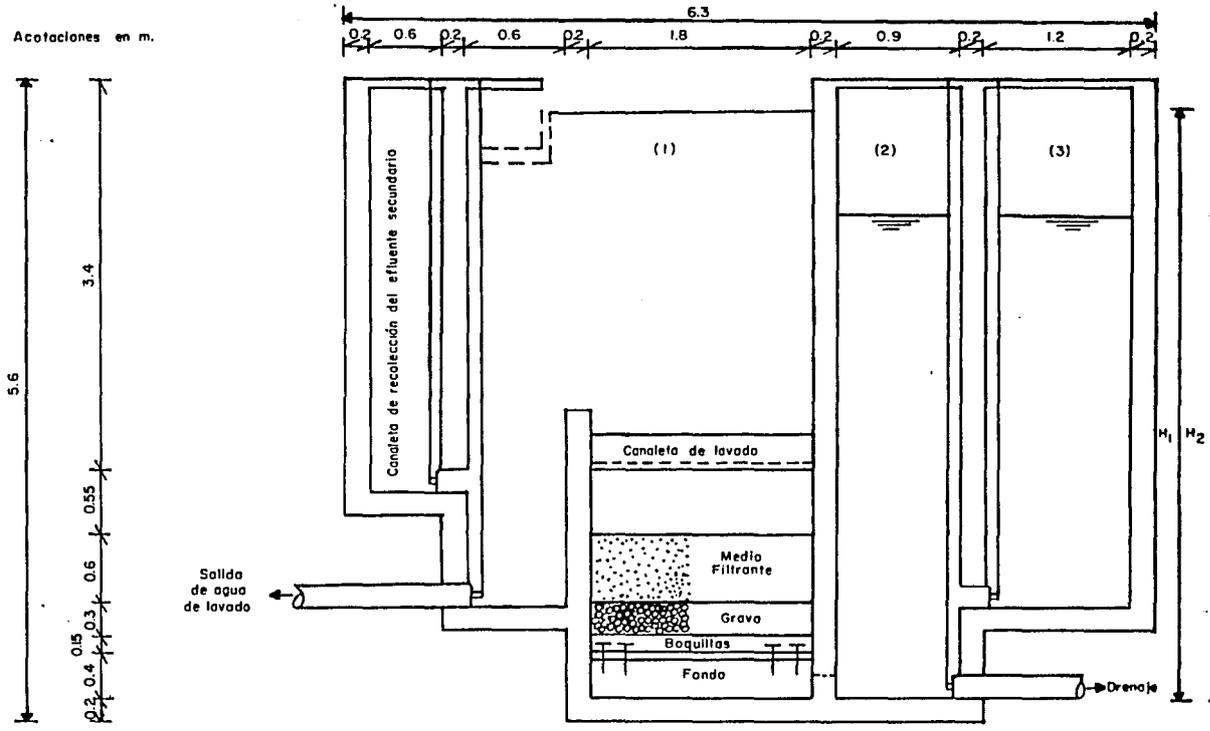


Figura 24. Filtro de arena de la PTCU. Corte

La duración de las corridas de filtración es determinada cuando el operador considera que no hay producción de agua ( $H_2$  constante), en lugar de considerar las caídas de presión ( $\Delta P$ ) o el deterioro del efluente observado por las lecturas de turbiedad.

Las condiciones de lavado se fijan en forma subjetiva: hasta que el agua de lavado "se ve clara" se termina el lavado. Se desconoce con exactitud el gasto de lavado y el tiempo adecuado para ello.

Así, por medio de este trabajo se pretende dar, a partir de ensayos a escala piloto, recomendaciones para la operación de los filtros de manera a aumentar la cantidad de agua tratada.

### 2.3 Filtros de arena

La filtración de efluentes secundarios en la PTCU se realiza mediante seis filtros a gravedad situados en un tanque de 1.8 m de ancho, 12.2 m de largo y 5.6 m de alto. (Figura 25).

En un principio el medio era dual (50 cm de antracita y 25 cm de arena). En la actualidad es prácticamente un medio sencillo compuesto de arena con 60 cm de altura.

gran parte a los filtros de arena, es el de la producción de agua tratada (del orden de 50%) (Jiménez, 1986).

Entre las fallas detectadas en los filtros de la PTCU se pueden citar las siguientes:

- . Falta de un equipo de medición de gasto para el influente y efluente que impide determinar con exactitud la velocidad de filtración.
- . No existen medidores de nivel (piezómetros) a lo largo del medio para analizar la distribución de las caídas de presión ( $\Delta P$ )
- . No se revisa periódicamente el medio filtrante con el fin de verificar su granulometría y espesor del lecho.
- . Las cámaras de filtración (1) figura 24 al estar al mismo nivel que la de filtrado (2) no favorecen la existencia de un gradiente. De hecho las cámaras funcionan como vasos comunicantes resultando que la carga disponible para efectuar la filtración (diferencia de niveles  $H_1$  y  $H_2$ ) disminuye conforme progresa la filtración. Lo anterior no sucedería si el cárcamo de agua filtrada estuviera enterrado, o bien, si se extrajera continuamente el efluente.

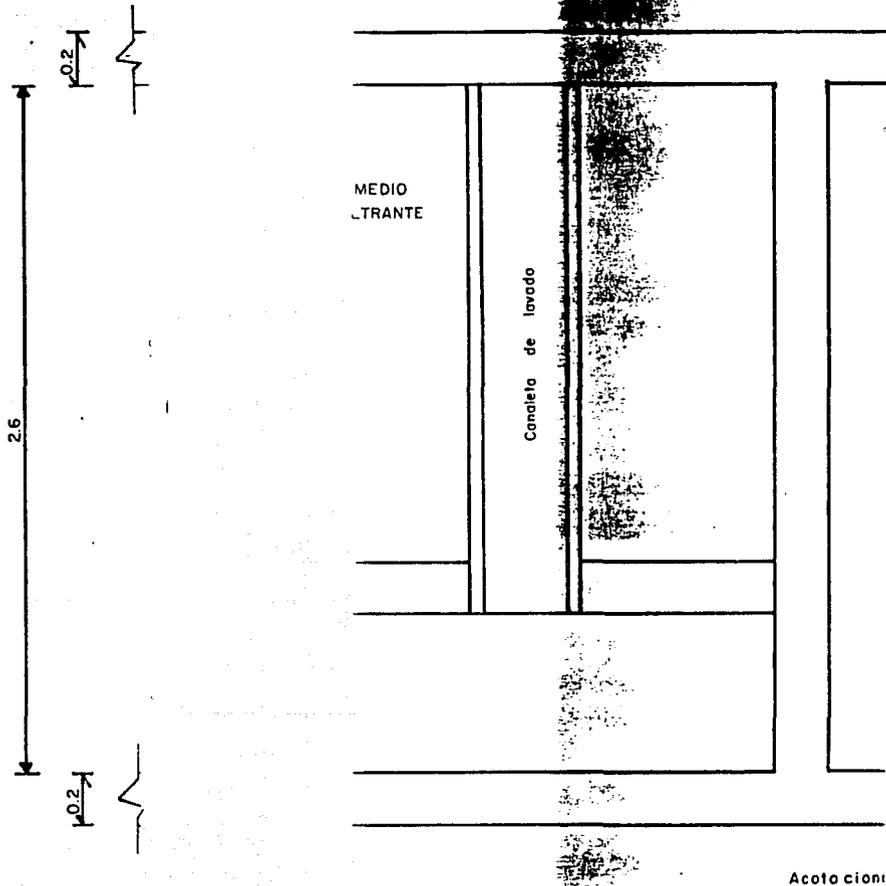


Figura: Plan de arena de la PTCU. Planta

El lecho filtrante tiene 1.8 m de ancho y 1.8 m de largo, por lo que se tiene una superficie total de filtración de 19.44 m<sup>2</sup>. El funcionamiento de los filtros 1 al 4 (figura 24) es de la forma siguiente: el agua llega a la cámara de filtración (1) proveniente de las canaletas de recolección de los efluentes secundarios atraviesa el medio pasando por un falso fondo y se dirige hacia la cámara contigua (2). Cuando se llena esta cámara se abre la compuerta que comunica con una tercera cámara (3) (común a los 4 filtros) de ahí el agua pasa, por vasos comunicantes, al cárcamo de aguas tratadas.

La operación de los filtros 5 y 6 difiere en que su efluente es directamente enviado a la cámara (3).

El lavado de los filtros se realiza a contracorriente con el agua contenida en la tercera cámara. Se envía para ello el agua de las cámaras 2 y 1 al drenaje, con el objeto de que el agua contenida en el cárcamo 3 pueda fluir hacia la cámara 1 (Jiménez, 1986).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 *Descripción del piloto*

El trabajo experimental se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales de C.U. con el objeto de emplear influentes reales de lodos activados, biodisco y filtro percolador.

Se contruyeron dos filtros para obtener una mayor cantidad de datos en menos tiempo. Los filtros piloto simulan un proceso de filtración de alta tasa a cielo abierto con carga constante y medio simple. El método de lavado seleccionado es del tipo europeo (agua y aire). Cada unidad, desde el punto de vista funcional, está compuesta de:

- Una línea de alimentación

- Una columna de filtración
- Una línea de lavado

### 3.1.1 Línea de alimentación

Por medio de esta línea se condujo el agua del sedimentador secundario deseado hacia los filtros piloto. La línea se compone de un cárcamo de alimentación, tubería de una pulgada (1"  $\varnothing$ ), una bomba de medio caballo de potencia (1/2 Hp), un sistema de recirculación al cárcamo y un par de válvulas de compuesta (figura 27). La función del sistema de recirculación es la de mantener la altura de agua constante sobre el medio filtrante. En la figura 26 se puede observar el sistema y en la figura 27 una perspectiva de él.

### 3.1.2 Columnas de filtración

Cada estructura está fabricada en lámina negra (3 mm de espesor) y cuentan con una placa de acrílico transparente en la parte frontal de 18 mm de espesor (figura 28). Los filtros son de sección cuadrada de 0.5 m x 0.5 m y una altura total de 5.05 m. Las dimensiones fueron determinadas con base en los criterios de diseño señalados por Metcalf y Eddy (1979).

En un costado de los filtros (vista lateral izquierda) se efectuaron 6 perforaciones de 1.25" de  $\varnothing$  (1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m y 4 m) arriba del medio, con el fin de controlar

el nivel de la carga hidrostática. En el costado lateral de recho se cuenta con 7 barrenos de medio pulgada de diámetro (0.5"  $\emptyset$ ) colocados a lo largo del medio donde se adaptaron válvulas de doble salida que permiten la toma de muestras y la conexión de mangueras para los piezómetros.

### 3.1.3 Línea de lavado

Mediante este sistema se efectuaba la limpieza del medio. En la operación se utilizó agua y aire simultáneos seguidos de un ejuague con una corriente de agua (las condiciones se detallan en la sección 3.2.2). El sistema de agua de lavado cuenta con un tanque de almacenamiento de 1 m<sup>3</sup> de donde se toma el agua (figura 26). La introducción del gasto se hace por medio de una bomba de 0,5 Hp (figura 26) y a 25 cm arriba del medio filtrante se localiza la canaleta de lavado por medio del cual se dirige el agua sucia hacia el drenaje (figura 28). El control del gasto de lavado se efectuó por aforos volumétricos a la salida de la canaleta.

Se cuenta con una compresora marca Murguía-Kellogs con capacidad de 350 l a una presión regulada de 0.25 kg/cm<sup>2</sup> para su ministro de aire. La cuantificación del gasto se efectuó mediante una placa de orificio diseñada de acuerdo con Ludwig (1960).

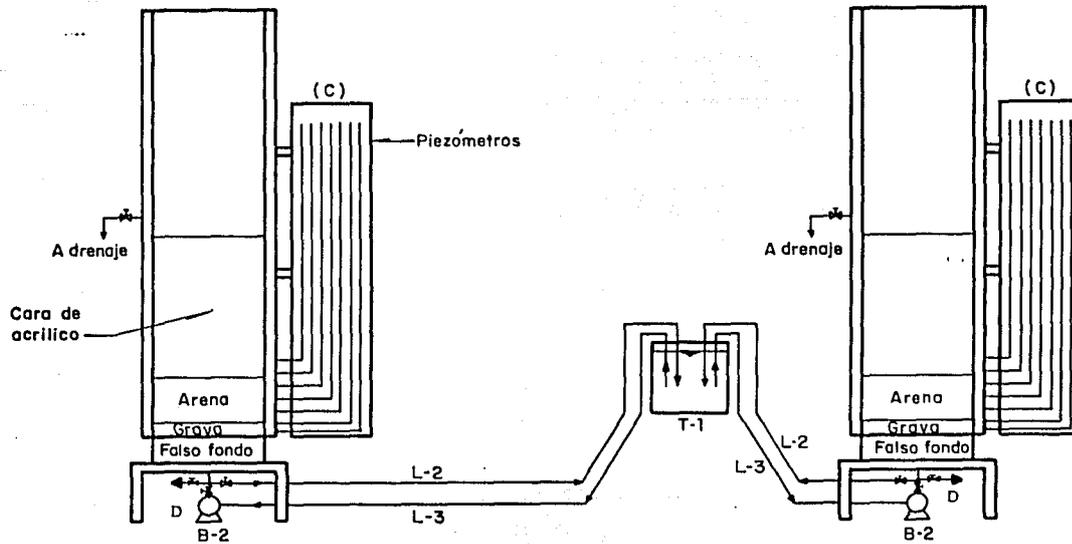


Figura 26. Filtros piloto. Vista general

## ESPECIFICACIONES DE FILTROS PILOTO

- L-1 Tubería de alimentación a filtros
- B-1 Bomba de alimentación a filtros
- L-2 Tubería para agua filtrada
- L-5 Tubería de recirculación del influente
- L-3 Tubería para agua de lavado de filtros
- D-3 Compresora de aire
- L-4 Tubería para aire de lavado de filtros
- T-1 Tanque de almacenamiento de agua filtrada y agua para lavado
- V-1 Válvulas de control del influente
- V-P Válvula reguladora de presión y control de paso de aire
- V-R Válvula de recirculación
- V-2 Válvula de paso para aire
- C Piezómetros
- D Desagüe

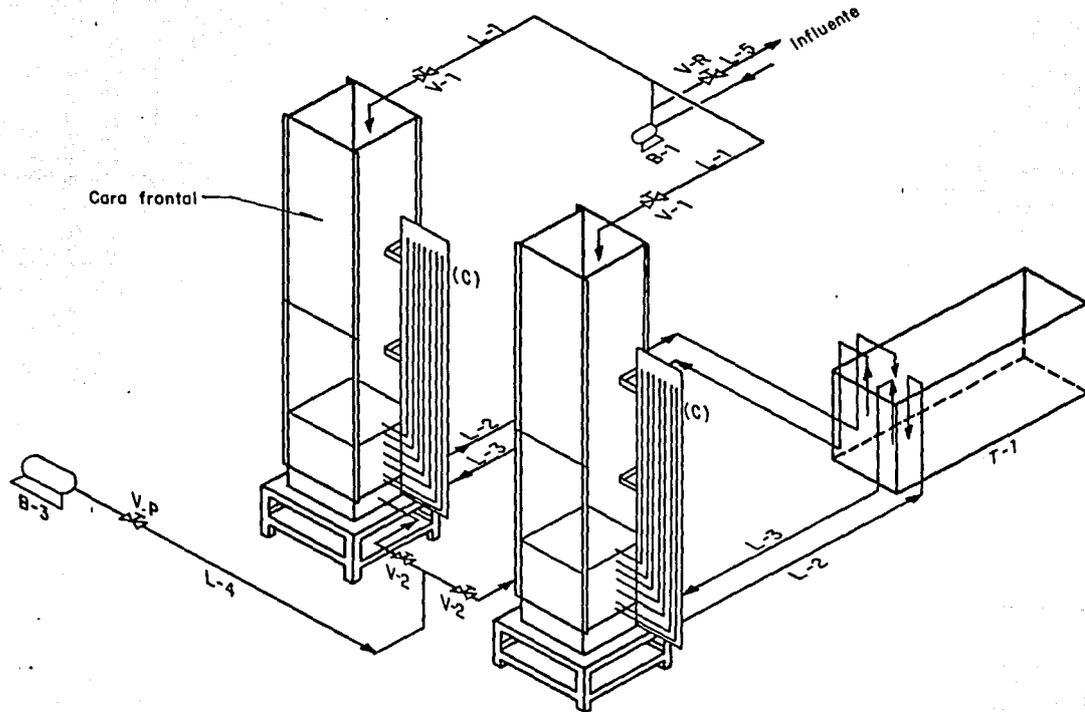


Figura 27. Filtros piloto. Perspectiva

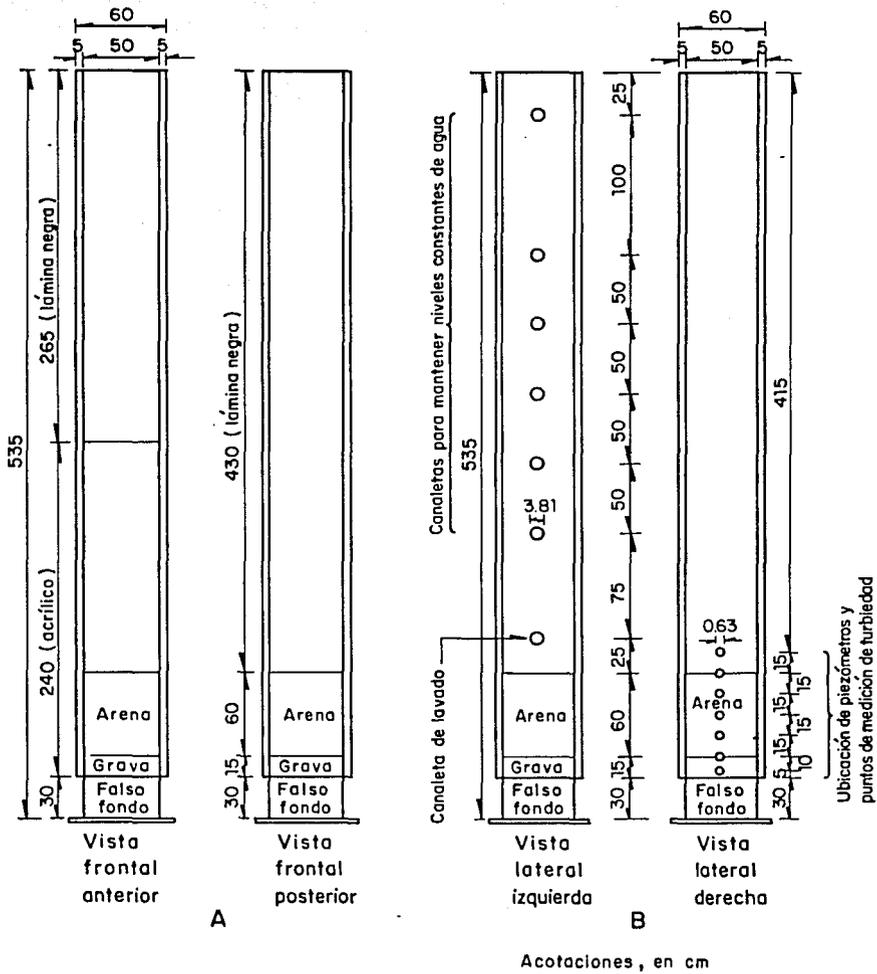


Figura 28. Filtros piloto. Vistas laterales

Para distribuir el aire en el medio se emplearan difusores en forma de estrella (figura 29).

### 3.2 *Diseño de los experimentos*

#### 3.2.1 *Corridas de filtración*

Para conocer el efecto de la carga hidrostática se estudiaron tres columnas de agua sobre los filtros diferentes: 1 m, 2 m y 3 m. En cada caso se varió también la velocidad de filtración. El diagrama de flujo de la figura 30 y la tabla 6 describen en forma general la metodología de trabajo y las condiciones de experimentación. En cada corrida se tomaron muestras del influente, efluente y a lo largo del medio. A todas las muestras se les midió la turbiedad y en el caso del influente y efluente se evaluó, además, los sólidos suspendidos (SST).

#### 3.2.2. *Retrolavado de los filtros*

En el lavado los gastos de agua y aire así como su duración dependieron de la magnitud de atascamiento del medio, y, se encontraron dentro de los intervalos propuestos por Arbolada, 1973; Tchobanoglous, 1970 y Qureshi, 1982. La velocidad de agua fue de 5 a 20 m/h durante 15 a 20 min, mientras que la del aire fue de 25 m/h durante 3 a 5 min. Estas

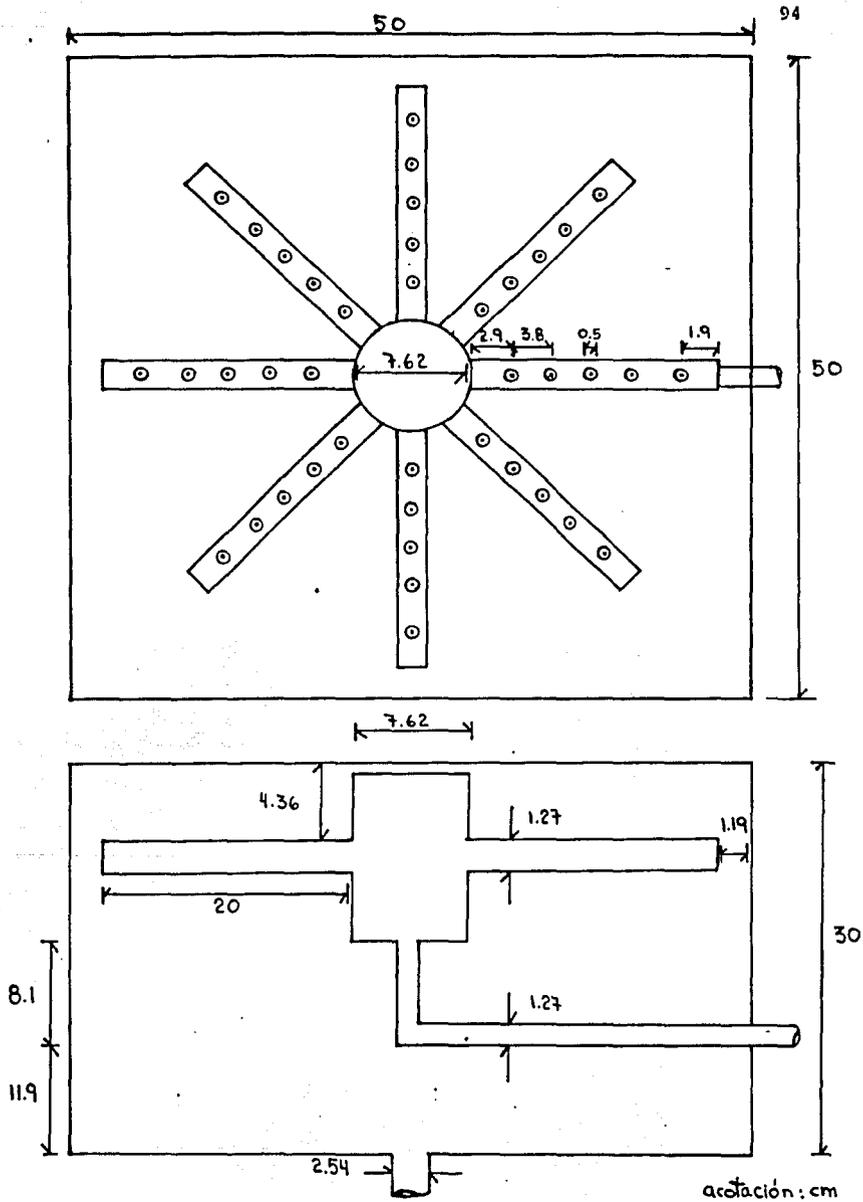


Figura 29. Difusores de aire

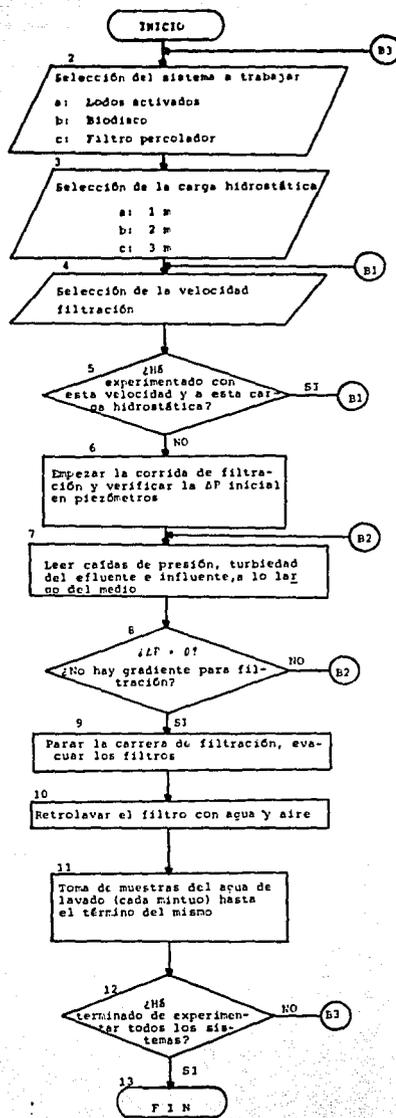


Figura 30. Diagrama de flujo sobre la metodología empleada durante la experimentación.

Condiciones expandieron la arena en un 10%.

TABLA 6. CONDICIONES DE OPERACION ESTUDIADAS

S I S T E M A B I O L O G I C O								
Lodos Activados			Biodisco			Filtro Percolador		
1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m	1 m	2 m	3 m
m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h
3.9	13.3	16.1	7.1	14.1	15.6	4.3	12.2	14.6
5.0	13.4		8.7	14.5		8.8	13.7	
6.4			9.2			9.1		
13.2			10.9			11.5		
13.9			11.0			11.6		
			11.3					
			12.5					

La secuencia de lavado fue la siguiente: flujo de agua ascendente, bombeado a través del falso fondo, hasta inundar el medio y en ese momento, sin dejar de bombear agua, se abrió la válvula del aire a una presión de  $0.25 \text{ kg/cm}^2$  durante intervalos de tiempo de 1 min. La operación se repitió de 3 a 5 veces para lograr el mismo número de pulsaciones en la arena.

Durante el estudio de las condiciones de lavado se tomaron muestras a la salida de la canaleta a cada minuto, y se les determinó la turbiedad a cada una. Después se formó una muestra compuesta para análisis de sólidos.

### 3.3 Métodos analíticos empleados

#### 3.3.1 Métodos para el seguimiento de la corrida

Se establecieron cuatro parámetros básicos para describir las corridas de filtración. Estos fueron: sólidos suspendidos, turbiedad, lecturas de caídas de presión y gastos de filtración.

Para los sólidos suspendidos se utilizaron los métodos estándar, 1980 (Anexo 3). La turbiedad se determinó con un nefelómetro marca Turner con exactitud de centésimas. Las caídas de presión mediante piezómetros instalados a través del medio filtrante y por último los gastos por aforos volumen-tiempo.

#### 3.4 Caracterización de los Influentes

En la Tabla 7 se presenta un promedio de concentraciones de sólidos suspendidos del influente de los filtros durante la experimentación. Se puede observar que existe un intervalo de variación en la concentración de los sólidos característico para cada sistema debido al tipo de tratamiento biológico aplicado al agua; lo que le da a los sólidos remanentes una forma, tamaño y consistencia característicos (Tchobanoglous, 1970; Baumann, 1974; Matsumoto, 1982). Es de suponerse que dicha particularidad afecte a la filtración granular

en la penetración del flóculo (ya sea en las primeras capas o a lo largo del mismo) y particularmente a la duración de la corrida de filtración.

TABLA 7. CARACTERIZACION DEL INFLUENTE DE LOS FILTROS

Sistema	Fecha (1987)	Solidos Suspendedos (mg/l)		Turbiedad (UTN)	
		X	S	X	S
Lodos activados	28/IV	14.4	12.3	1.8	0.3
	5/V	21.0	7.9	2.1	0.2
	7/V	8.3	2.5	2.4	0.3
	9/V	10.7	4.7	2.1	0.1
	21/V	6.0	2	1.7	0.2
Biodisco	2/VI	10.5	6.4	2.3	0.6
	3/VI	10.3	3.2	2.4	0.5
	4/VI	13.5	0.7	3.0	0.4
	8/VI	13.0	8.0	3.2	0.4
Filtro percolador	10/VI	27.0	5.6	6.7	1.2
	11/VI	21.7	8.0	5.3	1.0
	12/VI	19.0	1.7	5.3	0.8

### 3.5 Medio filtrante

Puesto que para nuestro estudio se deseaba una talla específica (T.E) de entre 0.5 y 0.6 mm y un coeficiente de uniformidad (C.U) de 1.5 a 1.6 se procedió a preparar el medio por

cribado a partir de una arena comercial. El detalle de la operación se encuentra en el anexo 3 así como la descripción de los análisis efectuados.

En la Tabla 8 se presentan las características medias de la arena empleada.

TABLA 8. CARACTERISTICAS DEL MEDIO FILTRANTE

Parámetro	$\bar{X}$	S
Tamaño efectivo (mm)	0.55	0.00
Coefficiente de uniformidad	1.59	0.006
Peso específico (g/ml)	2.52	0.02
Porosidad	0.435	

#### 4. RESULTADOS Y ANALISIS

##### 4.1 Lodos activados

El estudio de la filtración de lodos activados se efectuó a diferentes alturas de agua (1,2 y 3 m c.a.). En total se realizaron 11 corridas: 6 a 1 m c.a., 2 a 2 m c.a., 2 a 1 m c.a. con coagulante y sólo una a 3 m c.a.. Se trató de efectuar por duplicado los estudios pero, debido a la variabilidad del influente no siempre resultó en la práctica. El mayor problema fue la determinación de la concentración de los sólidos suspendidos totales ya que la reproducibilidad del método que se utilizó no alcanza a detectar cantidades pequeñas de sólidos. En promedio, la eficiencia de remoción de la turbiedad ( $\eta$ ) de las corridas sin coagulante fue de 60% y con coagulante de 40% este hecho será analizado posteriormente.

Se realizó una sola corrida a 3 m c.a. ya que se obtuvieron resultados semejantes que cuando se operó a 2 m c.a. por lo que no se consideró necesario efectuar más análisis. Asimismo, el estudio con coagulante se efectuó bajo una condición (1 m c.a.) ya que la relación filtrado-lavado resultó inapropiada (las caídas de presión fueron mayores y provocaron que las corridas se acortaran); además como ya se mencionó, el rendimiento promedio en eliminación de sólidos resultó inferior que en las corridas sin coagulante.

Se debe hacer notar que se tomó como criterio para determinar el fin de las corridas cuando la caída de presión ( $\Delta P$ ) del medio era igual a la columna estática de agua. Los incisos (4.1.1 a 4.1.4) muestran los análisis de datos y las Tablas (9 a 12) de los parámetros de operación a diferente altura.

La totalidad de los datos se encuentran en el Anexo 4 (Tablas A.4.1 a A.4.11).

#### 4.1.1 Análisis de los datos a 1 m c.a.

En la Tabla 9 se encuentra el resumen de los datos recabados para la filtración del efluente de lodos activados a 1 m c.a.

En estos datos se encuentran las corridas que sirvieron como

pruebas preliminares para los dos filtros piloto (1 y 5) y se consideran; por tanto, de baja representatividad.

Las corridas 1 y 2 se pueden considerar como buenas ya que rebasaron las 24 h de operación y sus eficiencias ( $\eta$ ) de filtrado fueron de las más altas. La menor duración de la corrida 1 se explica por el mejor rendimiento obtenido (83% contra 40% en remoción de sólidos).

Al comparar las corridas 3 y 4 se debe hacer notar que debido a la mayor turbiedad del influente para la corrida 3 (2.3) se tuvo una marcada reducción de las carreras (9.5 h contra 13 h).

Nótese que en la corrida 5 la duración de la carrera es mucho menor que la de la corrida 6. Basándose en los datos de turbiedad y de sólidos en el influente no es posible encontrar una explicación por lo que se atribuyó la anomalía a errores de experimentación. Por tal motivo la corrida 5 fue excluida del análisis global de resultados.

#### 4.1.2 Análisis de los datos a 2 m c.a.

En la Tabla 10 se observa una diferencia en la duración de la carrera para turbiedades similares (del orden de 38%). Sin embargo, resultó notorio que la duración fue siempre menor a

TABLA 9. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DE LODOS ACTIVADOS A 1 m c.a.

Corrida	$V_f$ m/h	Duración h	SST, mg/l				$\eta$ %	Turbiedad, UTM				$\eta$ %
			Influyente		Efluente			Influyente		Efluente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	3.9	27	14.7	11.1	2.5	2.4	83	1.4	0.3	0.6	0.2	57
2	3.9	36.5	15.0	0.0	9.0	0.0	40	1.3	0.3	0.6	0.2	54
3	5.0	9.5	-	-	-	-	-	2.3	0.1	1.0	0.2	57
4	6.4	13.0	7.3	0.6	3.0	2.7	59	1.8	0.2	0.7	0.2	61
5	13.2	6.0	17.3	15.7	9.8	10.2	43	1.8	0.3	1.0	0.1	44
6	13.9	17.0	18.0	0.0	17.0	0.0	6	1.3	0.2	0.7	0.2	46
PROMEDIOS:			13.8	4.6	7.9	6.8	43	1.6	0.4	0.7	0.2	56

$\bar{X}$  : Promedio por corrida

S : Desviación estándar

Nota: La eficiencia del último renglón se calculó con base en los promedios del influente y del efluente tanto para esta tabla como las subsecuentes.

TABLA 10. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DE LODOS ACTIVADOS A 2 m c.a.

Corrida	$V_f$ m/h	Duración h	SST, mg/l				$n$ %	Turbiedad, UTN				$n$ %
			Influyente		Efluyente			Influyente		Efluyente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	13.3	13	21.0	7.9	3.0	1.7	86	2.1	0.2	0.8	0.2	62
2	13.4	8	6.0	0	2.0	0.0	33	2.4	0.3	0.9	0.1	63
PROMEDIOS:			13.5	10.6	2.5	0.7	60	2.3	0.2	0.9	0.1	61

TABLA 11. RESUMEN DE LA CORRIDA EFECTUADA PARA LA FILTRACION DE LODOS ACTIVADOS A 3 m c.a.

Corrida	$V_f$ m/h	Duración h	SST, mg/l				$n$ %	Turbiedad, UTN				$n$ %
			Influyente		Efluyente			Influyente		Efluyente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	16.1	16.5	10.7	4.7	2.7	2.1	75	2.1	0.1	0.8	0.1	62

24 h ; límite considerado como rentable.

#### 4.1.3 Análisis de los datos a 3 m c.a.

Se efectuó una sola corrida por la similitud de resultados con la condición de 2 m c.a. (Tabla 11), su duración fue mayor (16.5 h contra 13 y 8 h ) ya que la evolución de la pérdida de carga ( $\Delta P$ ) fue más lenta.

A esta altura, la presión que se ejerce sobre la superficie del medio es considerable lo cual probablemente provoque que el flóculo se rompa y sea arrastrado a través del lecho.

Lo anterior se puede comprobar en las lecturas de turbiedad en el primer nivel las cuales, resultaron mucho más altas que las normales (5.5 contra 1.4 UTN, datos máximo y mínimo).

#### 4.1.4 Análisis de los datos a 1 m c.a. con coagulante

Los datos que se obtuvieron en esta condición se encuentran en la (Tabla 12).

La corrida 2 trabajó a una velocidad de filtración mayor lo que redujo la duración de la corrida de (11 h contra 8.5 h ). Las caídas de presión ( $\Delta P$ ) iniciales en el medio fueron más altas y la retención de sólidos resultó en este caso corri-

TABLA 12. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DE LODOS ACTIVADOS A 1 m c.a. CON COAGULANTE.

Corrida	$V_0$ m/h	Duración h	SST, mg/l				n %	Turbiedad, UTN				n %
			Influente		Efluente			Influente		Efluente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	8.5	11	10.0	4.2	5.0	5.7	50	1.6	0.4	1.0	0.2	38
2	12.7	8.5	8.0	0.0	1.0	0.0	88	1.7	0.2	1.0	0.2	41
PROMEDIOS:			9	1.4	3	2.8	67	1.7	0.1	1	0	40

da 2- mejor (38 contra 41% en UTN).

#### 4.1.5 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad, $SST = f(UTN)$

Con el fin de establecer si existía una relación entre las lecturas de turbiedad y el contenido de sólidos suspendidos se trazó la gráfica de SST en función de UTN (figura 31) con los datos del anexo 4 (Tabla A.4.30). El coeficiente de correlación calculado demuestra que no existe relación entre estos parámetros aunque ha habido autores que lo señalan (Tchobanoglous, 1970). Lo anterior se explica porque es difícil medir concentraciones de sólidos suspendidos (SST) con buena precisión para los valores tan bajos que se presentaron. En los Standard Methods (1980) se señala que para una concentración de sólidos suspendidos de 15 mg/l la desviación estándar es de 33%.

#### 4.1.6 Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida $\eta = f(t)$

Es importante señalar que siempre que se lavaron los filtros la eficiencia de operación, era aún buena. Como ejemplo se muestra la gráfica (figura 32). En ella se encuentra que la evolución de la eficiencia es lenta.

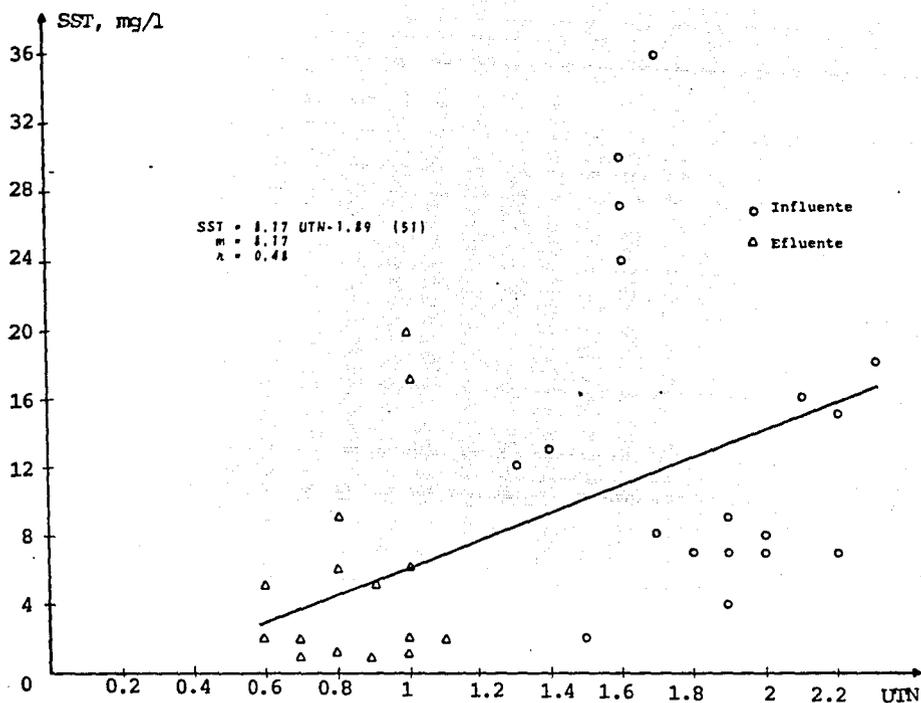


Figura 31. Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad para L.A.

Se constató además que la disminución en la eficiencia obtenida en algunos puntos (Ej.  $t = 22 \text{ h}$ ) se debió a la disminución de la turbiedad del influente, ya que la turbiedad del efluente resultó prácticamente constante ( $0.8 \text{ UTK} \pm 0.2$ ).

Es necesario aclarar que los promedios de la eficiencia (Tabla 13) para las corridas de 1 m c.a. son aparentemente mejores en las corridas sin coagulante que teniéndolo presente. Esta situación es interesante de señalar ya que la capacidad

TABLA 13. PROMEDIOS DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCION DE LA TURBIEDAD ( $\eta$ ) CON Y SIN COAGULANTE

13.a CORRIDAS SIN COAGULANTE				
Condición	Promedio (%)		Turbiedad influente (UTN)	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
1 m c.a.	55	5.6	1.6	0.4
2 m c.a.	63	0.7	2.3	0.2
3 m c.a.	62	-	2.1	0.1
13.b CORRIDAS CON COAGULANTE				
Condición	Promedio (%)		Turbiedad influente (UTN)	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
1 m c.a.	40	2.1	1.7	0.1

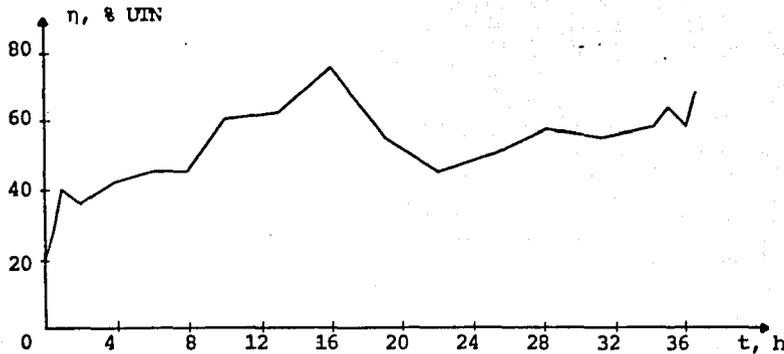


Figura 32. Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para L.A.

de retención de sólidos en un filtro mejora con el tiempo, en tal forma que la influencia de los rendimientos obtenidos durante la etapa de maduración disminuye. De la Tabla 13 se puede observar que la eficiencia aumentó a medida que se aplicó una mayor carga de agua. Sin embargo, esto se debe al incremento en la turbiedad en el influente más que a una mejora de las condiciones de operación.

#### 4.1.7 Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración $t = f(V_f)$

En la figura 33 correspondiente a 1 m.c.a. con y sin coagu-

TABLA 14. RELACION ENTRE LA DURACION DE CORRIDA Y LA VELOCIDAD DE FILTRACION PARA L.A

1 m c.a. sin coagulante		1 m c.a. con coagulante	
$V_f, m/h$	$t, h$	$V_f, m/h$	$t, h$
3.9	27	12.7	8.5
3.9	36.5	8.5	11
5	9.5		
6.4	13		
13.9	17		

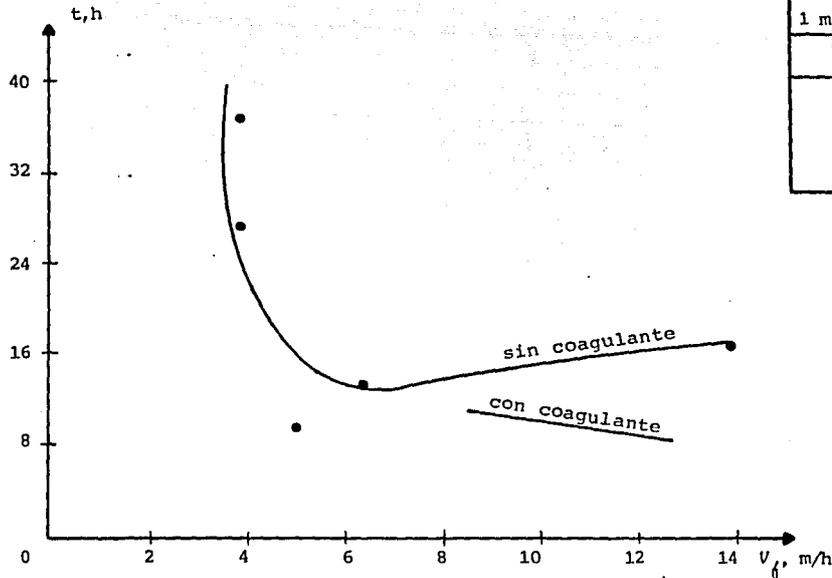


Figura 33. Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para L.A.

lante se muestra la dependencia de la duración de corrida en relación con la velocidad de filtración aplicada.

La curva desciende al aumentar la velocidad de paso del agua, hecho que concuerda con lo establecido por Bauman, 1974.

En las corridas con coagulante, aunque se cuenta sólo con dos puntos, se observa el mismo efecto. Se encuentra además que en las corridas con coagulante la duración es menor ya que los flóculos formados oponen mayor resistencia al paso del agua y provocan caídas de presión ( $\Delta P$ ) mayores que acortan las corridas (11 y 8.5 h contra ~ 16 h).

4.1.8 Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo  $H = f(\Delta P)$  y  $f(t)$

4.1.8.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la misma condición de trabajo

En las figuras 34 y 35 se nota que al inicio de la corrida la velocidad es la causa principal de las pérdidas de carga (línea 1); por lo que la curva trazada es una recta.

En el transcurso del tiempo la remoción de los sólidos se realiza en su mayoría en los primeros 15 cm del medio (Dégremont, 1979). Nótese que en la figura 34 la pérdida de carga

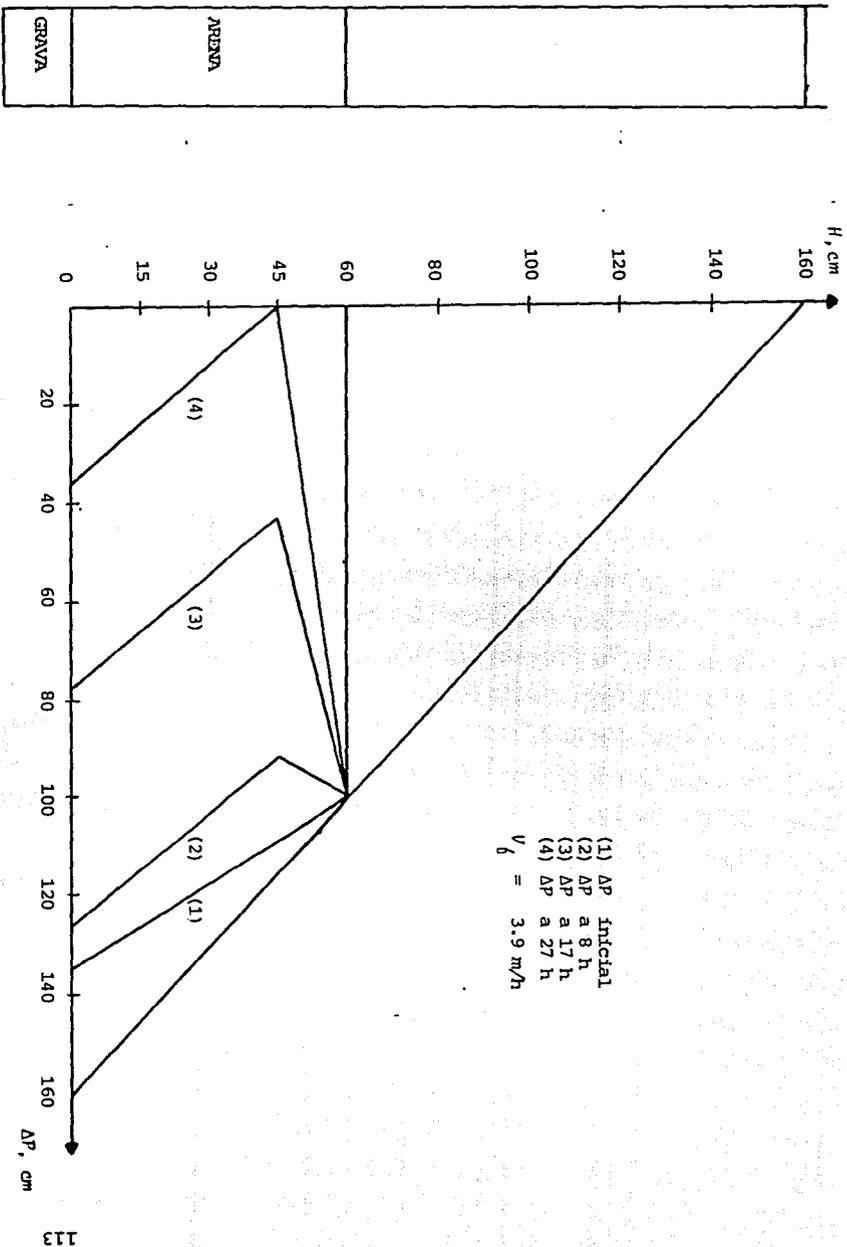


Figura 34. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo L.A. (1 m c.a.)  $V_f = 3.9 \text{ m/h}$

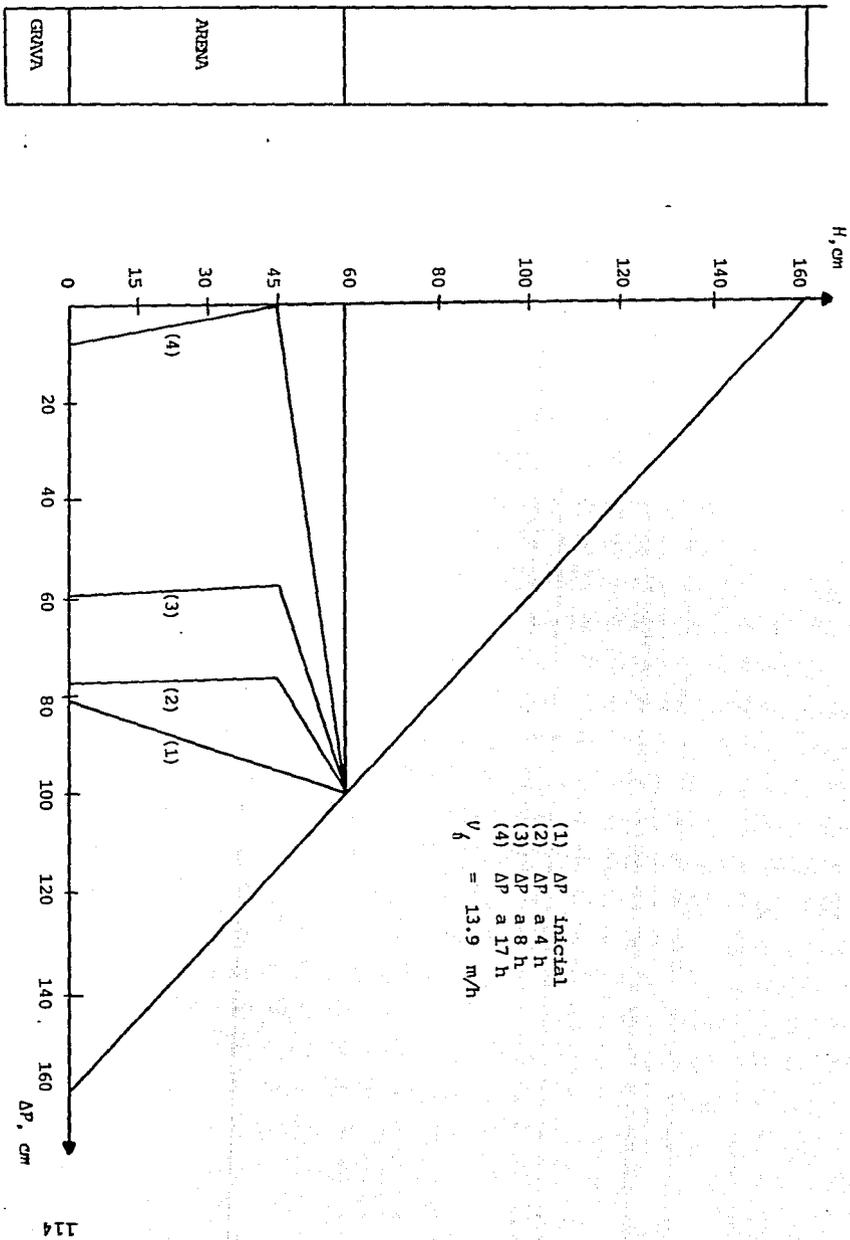
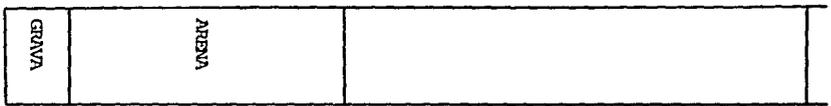


Figura 35. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo L.V.A. (1 m c.a.)  $V_g = 13.9 \text{ m/h}$



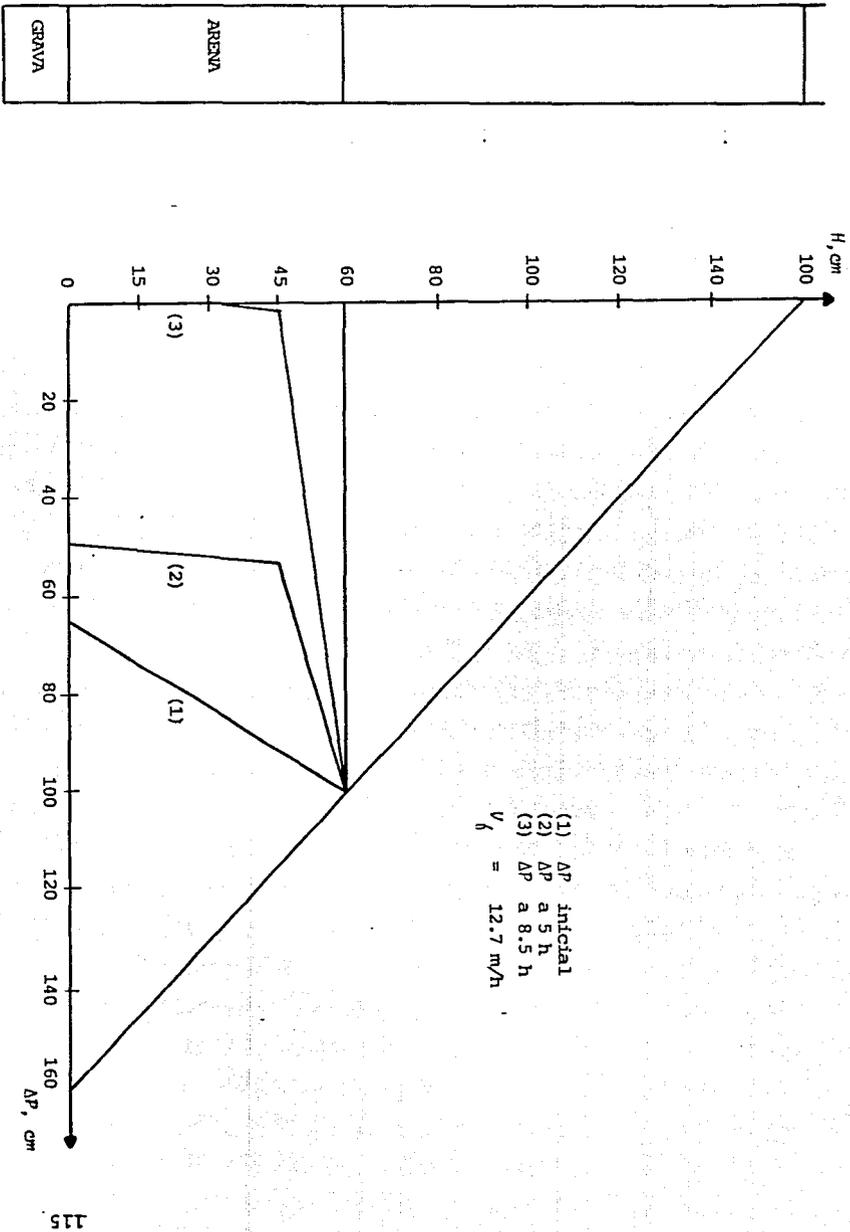


Figura 36. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo (1 m.c.a. con coagulante)  $V_d = 12.7 \text{ m/h}$

es menor (160 - 135 cm) que en el segundo caso (160 - 81 cm) figura 35; como resultado de la menor velocidad de paso del agua.

#### 4.1.8.2 Comparación de 1 m c.a. con y sin coagulante bajo velocidad de filtración semejante. ( $C_{\text{coag}} = 3 \text{ mg/l}$ )

Las figuras 35 y 36 muestran el efecto de coagulante. Obsérvese que al usar coagulante se provoca una mayor retención de flóculos en la superficie. El efecto se puede ver en la curva 3 de estas gráficas (a una misma hora de corrida, 8 y 8.5 h). Esta retención se traduce en mayores caídas de presión ( $\Delta P$ ) por lo que se acortan las corridas con coagulante. Además en éstas figuras se encuentra que existe arrastre de sólidos a través del medio el cual origina curvas como la línea 2 en el transcurso de corrida.

#### 4.1.9 Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo $\Delta P$ y $UTN = f(t)$

De la figura 37 (Parte A) se encontró que existe una relación entre la turbiedad del influente con la turbiedad del efluente. Es necesario recordar que la aglomeración de sólidos en la superficie del medio favorece el mecanismo de remoción por cribado y se obtiene a lo largo del tiempo un efluente de mejor calidad (Segall, 1966).

En general a lo largo del medio existe un crecimiento proporcional de las caídas de presión ( $\Delta P$ ) Parte B (Bauman, 1974).

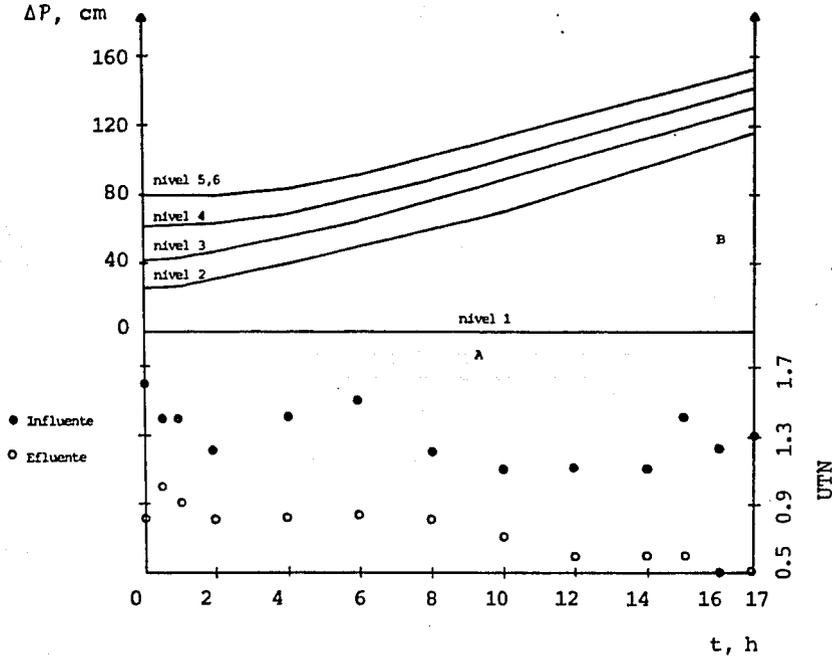


Figura 37. Relación entre la caída de presión y la turbiedad con respecto al tiempo para L.A.

4.1.10 Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo  $H = f(UTN)$  y  $f(t)$

En general, cuando la duración de corrida es mayor se encuen-

tra que hay mejor remoción de sólidos a través del medio sin importar la condición de operación. En la figura 38 se observa este efecto.

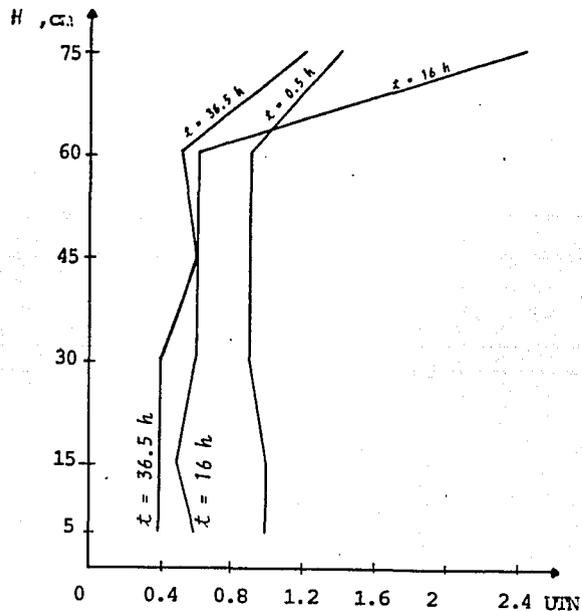


Figura 38. Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo para L.A.

#### 4.1.11 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente $\eta = f(\text{UTN influente})$

La curva que se obtiene de estos dos parámetros (figura 39) muestra que la eficiencia tiende a 75% y que el valor promedio es del orden de 60%.

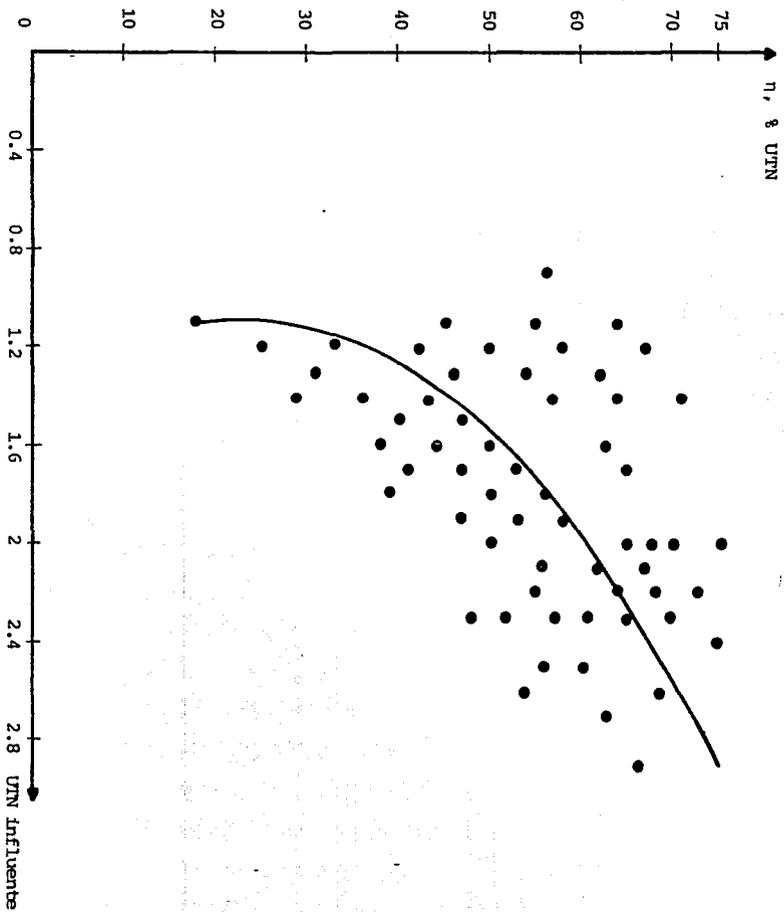


Figura 39. Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del Influyente.  
L.A.

Para favorecer el mecanismo de remoción por intercepción es necesario tener una concentración mínima de partículas. Por lo que a bajas turbiedades este fenómeno no se presenta. A medida que la concentración de sólidos aumenta este mecanismo opera y aumenta la eficiencia (Tchobanoglous, 1970).

#### 4.2 Biodisco

En general estas corridas tuvieron las duraciones más cortas de los tres sistemas. El promedio de la eficiencia de remoción de la turbiedad fue de 49% hecho que se analiza en la sección 4.2.10.

Por los mismos motivos que en lodos activados se realizó una corrida a 3 m c.a. con resultados semejantes a 2 m c.a. En estas corridas la relación velocidad de filtración-duración de corrida fue buena. Además se observa mejor el fenómeno de filtración debido a que los análisis de SST -por su concentración-fueron mejores.

Una vez más, se trató de efectuar por duplicado los estudios y se adoptó el mismo criterio para el término de las corridas. El estudio de la filtración del sistema de biodisco se realizó a 1,2 y 3 m c.a. con un total de 10 corridas: 7 a 1 m c.a., 2 a 2 m c.a. y una a 3 m c.a.

La totalidad de los datos para biodisco se encuentra en el anexo 4 (Tablas A.4.12 a A.4.21).

#### 4.2.1 Análisis de datos a 1 m c.a.

Los resultados de esta condición se presentan en la Tabla 15. La corrida 1 tiene la menor concentración de SST y la menor velocidad por lo que la duración de corrida es mayor.

Si comparamos la corrida 2 y 3 se debe hacer notar que la cantidad de sólidos presentes en el influente (24 contra 13.5 mg/l) provoca se acorte -anormalmente- la corrida de menor velocidad. En este caso los sólidos retenidos por el filtro fueron 607 contra 427 g/m<sup>3</sup>.

La corrida 5 a pesar de ser similar a la 4 presenta mejores resultados en cuanto a retención de sólidos (el porcentaje de remoción de SST 74 contra 29%).

La duración de corrida 6 es más corta que la 5 por el incremento de la velocidad de filtración y la concentración de SST en el influente.

La corrida 7 dura un poco más que la 6 ya que la cantidad de sólidos retenidos por el filtro son menores.

TABLA 15. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE BIODISCO  
A 1 m c.a.

Corrida	V <sub>6</sub> m/h	Duración h	SST, mg/l				n %	Turbiedad, UTN				n % UTN
			Influyente		Efluyente			Influyente		Efluyente		
			X	S	X	S		X	S	X	S	
1	7.1	4	10.5	6.4	3.5	2.1	67	2.3	0.6	1.3	0.3	43
2	8.7	1.5	24	2.8	11.5	2.1	52	5	0.9	2.1	0.2	58
3	9.2	3	13.5	0.7	6	1.4	54	3	0.4	1.4	0.2	53
4	10.9	2	12	1.4	8.5	0.7	29	2.6	0.2	1.3	0.2	50
5	11	2	19	4.2	5	4.2	74	4.1	0.2	1.9	0.3	54
6	11.3	1	19.5	0.7	7	4.2	64	4.7	0.1	2	0.1	57
7	12.5	1.25	16	1.4	6.5	3.5	59	3.3	0.3	1.5	0.1	55
PROMEDIOS:			16.4	4.8	6.9	2.6	58	3.6	1	1.6	0.3	56

#### 4.2.2 Análisis de datos a 2 m c.a.

La Tabla 16 muestra que la corrida 1 es la menor debido a la concentración de sólidos aunque esta diferencia de tiempo no es considerable.

Lo que resulta importante en ambas corridas es que a esa velocidad de filtración la duración de la carrera es muy pequeña (4 a 4.8 h).

#### 4.2.3 Análisis de datos a 3 m c.a.

A pesar de que se aumentó la carga disponible (3 m c.a., Tabla 17) se encontró que para velocidades semejantes a las de 2 m c.a., no se obtenían carreras más largas.

#### 4.2.4 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad SST = $\{UTN\}$

Los datos del anexo 4 (Tabla A.4.31) demuestran que para el sistema de biodisco si existe relación entre estos parámetros.

En la figura 40 se muestran los datos obtenidos así como los valores resultantes del ajuste lineal.

TABLA 16. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE BIODISCO  
A 2 m c.a.

Corrida	$V_6$ m/h	Duración h	SST, mg/l				$n$ %	Turbiedad, UTN				$n$ % UTN
			Influente		Efluente			Influente		Efluente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	14.1	4	14.5	6.4	7	1.4	52	2.3	0.6	1.6	0.3	30
2	14.5	4.8	10.3	3.2	3.3	1.5	68	2.4	0.5	1.2	0.2	50
PROMEDIOS			12.4	3	5.2	2.6	58	2.4	0.1	1.4	0.3	42

TABLA 17. RESUMEN DE LAS CORRIDA EFECTUADA PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE BIODISCO  
A 3 m c.a.

Corrida	$V_6$ m/h	Duración h	SST, mg/l				$n$ %	Turbiedad, UTN				$n$ % UTN
			Influente		Efluente			Influente		Efluente		
			$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S		$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	
1	15.6	5.5	13	8	5.7	4.5	56	3.2	0.4	1.5	0.3	53

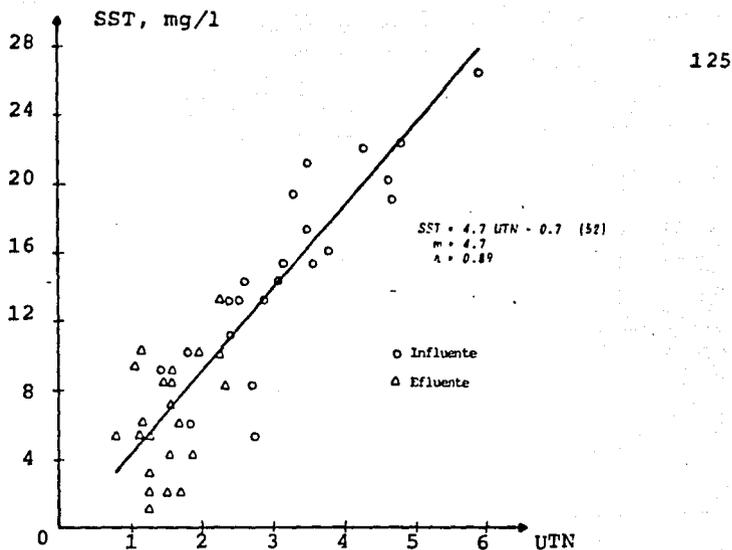


Figura 40. Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad para Bio-disc.

#### 4.2.5 Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida $\eta = f(t)$

La figura 41 muestra la relación entre estos parámetros. La eficiencia al inicio de corrida es buena (37%) y desciende a las 0.5 h hasta 33% debido a la disminución del valor de la turbiedad del influente.

A partir de 0.5 h hasta 1.5 h el crecimiento de la eficiencia es notorio (33 a 42% UTN), a partir de este punto el desarrollo es lento. En la Tabla 18 se encuentran los promedios de la eficiencia. En la condición de 2 m c.a. el promedio fue el más bajo debido a el bajo valor de la turbiedad

del influente y a la variable del efluente.

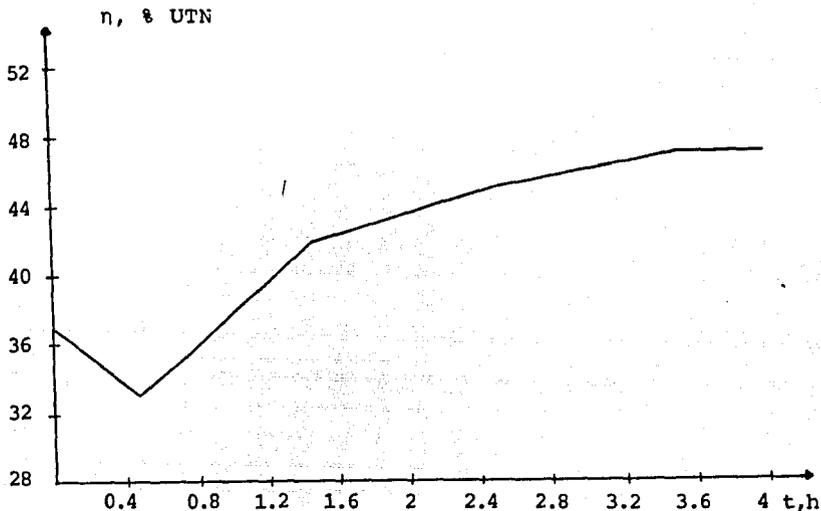


Figura 41. Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para Eiodisco.

TABLA 18. PROMEDIOS DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE LA TURBIEDAD ( $\eta$ )

Condición	Promedio (%)		Turbiedad influente (UTN)	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
1 m c.a.	53	5.1	3.6	1
2 m c.a.	40	14	2.4	0.1
3 m c.a.	53	-	3.2	0.4

#### 4.2.6 Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración $t = f(v_f)$

En la figura 42 se observa una relación similar a la encontrada para lodos activados. La duración de la corrida disminuye conforme aumenta la velocidad de filtración, aún en este caso cuyas carreras son muy cortas (1 a 4 h).

TABLA 19. RELACION ENTRE LA DURACION DE CORRIDA Y LA VELOCIDAD DE FILTRACION PARA BIO DISCO A 1 m c.a.

$v_f, m/h$	$t, h$
7.05	4
8.7	1.5
9.16	3
10.87	2
10.98	2
11.3	1
12.45	1.25

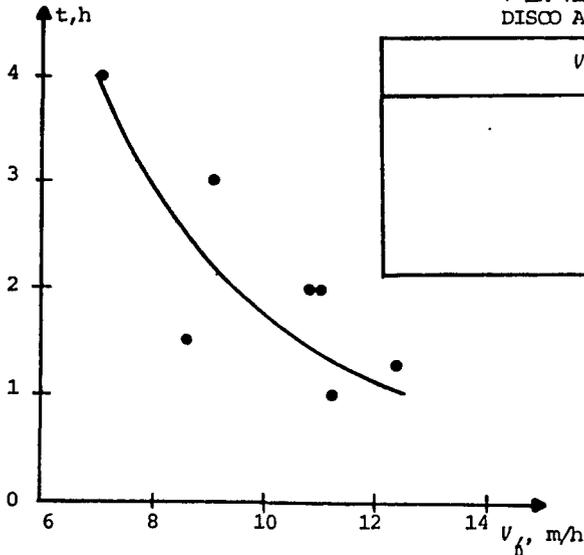


Figura 42. Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración para Biodisco.

#### 4.2.7 Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo $H = f(\Delta P)$ y $f(t)$

##### 4.2.7.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la misma condición de trabajo (1 m c.a.).

En las figuras 43 y 44 se encuentra que la velocidad de filtración es la causa inicial de las caídas de presión (línea 1). Como ejemplo, para el primer caso (figura 43) se tiene que la  $\Delta P$  es (160-97 cm = 63 cm); mientras que en el segundo caso (160-79 cm = 81 cm) es mayor debido a la velocidad de paso de agua.

Se observa además que la velocidad afecta sensiblemente la duración de corrida. Cuando la corrida 1 tiene aun carga disponible para la filtración a 1.5 h (línea 2), la corrida 7 (figura 44) ya concluyó, (línea 5 a 1.25 h).

Otro hecho se observa en la figura 43, ya que hay arrastre de sólidos a través del medio y las líneas cambian de forma.

#### 4.2.8 Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo $\Delta P$ y $UTN = f(t)$

Al igual que los demás sistemas, se encuentra que existe (figura 45, Parte A) una relación entre influente y efluente

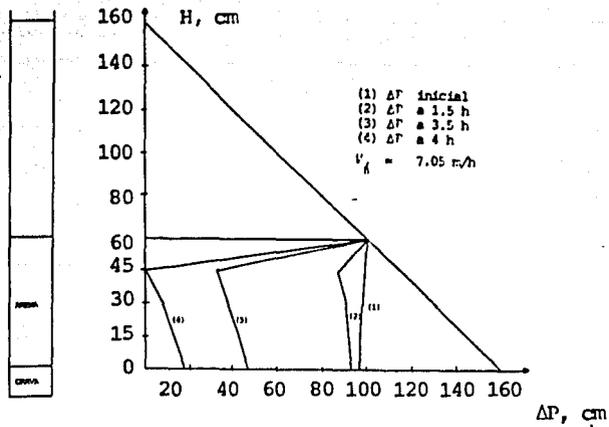


Figura 43. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. Biodisco (1 m c.a.)  $V_g = 7.05 \text{ m/h}$

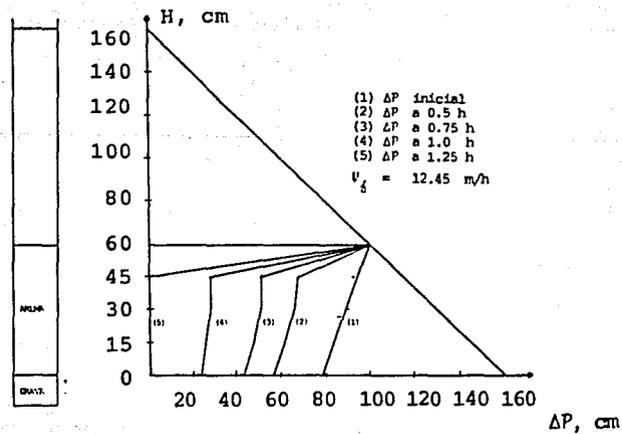


Figura 44. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. Biodisco (1 m c.a.)  $V_g = 12.45 \text{ m/h}$ .

(Burton, 1966). Por otra parte, las caídas de presión (Parte B) llevan un crecimiento proporcional aún cuando la duración de corrida es pequeña.

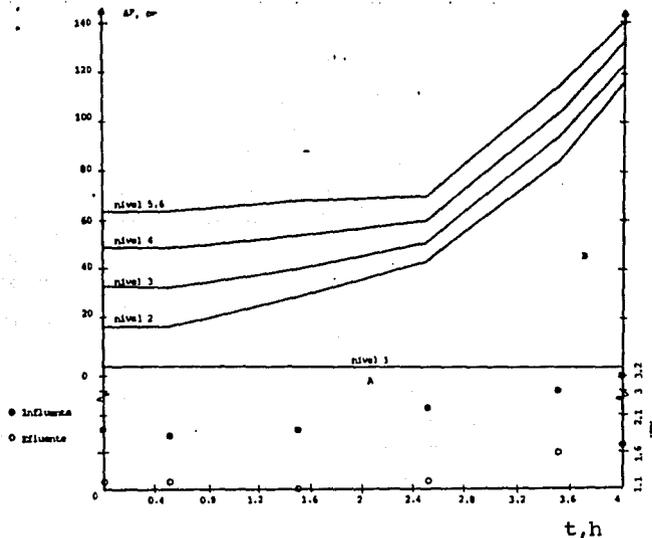


Figura 45. Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo. Biodisco.

#### 4.2.9 Relación entre la altura del medio con respecto a la turbiedad y el tiempo $H = f(UTN)$ y $f(t)$

En estas corridas se nota el mismo efecto que en lodos activados. En la figura 46 se ve que a un mayor tiempo existe una mejoría de la remoción de sólidos a través del medio.

A corridas tan pequeñas (2 h) con un valor de la turbiedad

del influente prácticamente constante se espera que la remoción en UTN sea similar en todo tiempo.

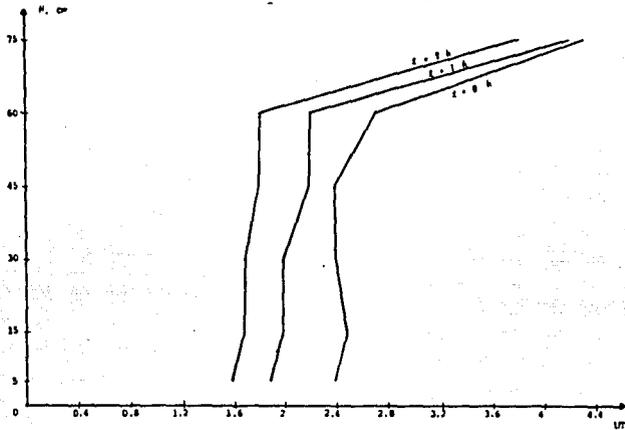


Figura 46. Relación entre la altura del medio con respecto a la turbiedad y el tiempo. Biodisco.

#### 4.2.10 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente $\eta = f(UTN \text{ influente})$

En la figura 47 se observa que a bajas UTN resultan bajas eficiencias. Al aumentar la concentración se ocluye el medio disminuyendo la porosidad y aumentando el rendimiento.

La curva tiende a un 61% de eficiencia y a un promedio del orden de 50%. Estos resultados son inferiores a los de lodos activados (75% y promedio de 60%) ya que por las corridas cortas, los filtros se encuentran en la etapa de madura

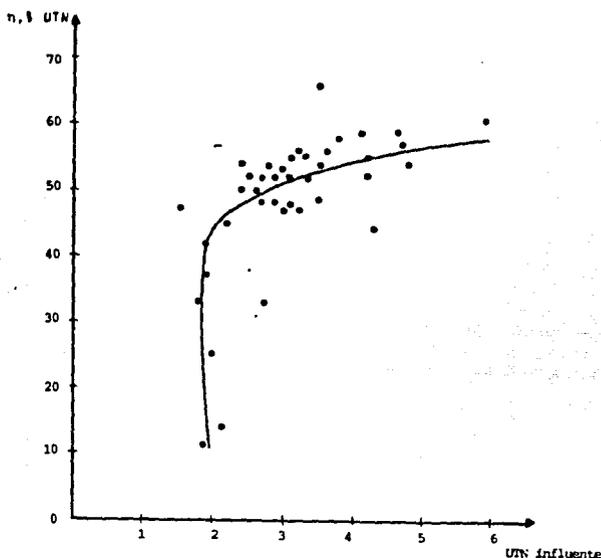


Figura 47. Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del influente para Biodisco.

#### 4.3 Filtro percolador

El estudio de la filtración del sistema de filtro percolador se realizó a las mismas condiciones de operación (1, 2 y 3 m c.a.). Se efectuaron en total 8 corridas: 5 a 1 m c.a., 2 a 2 m c.a. y una a 3 m c.a.

La duración de las corridas se encuentra entre los dos sistemas anteriores: más baja que lodos activados y más alta que biodisco. El promedio de la eficiencia de remoción fue de 65%.

En general, los datos de estas corridas son más homogéneos que los sistemas anteriores sobretodo porque la cantidad de sólidos suspendidos (SST) permite mayor precisión en el método gravimétrico.

Como en los sistemas anteriores sólo se realizó una corrida a 3 m c.a. ya que los resultados fueron semejantes que a 2 m c.a.

El conjunto de datos se localiza en el anexo 4 (Tablas A.4.22 a A.4.29).

#### 4.3.1 Análisis de datos a 1 m c.a.

La Tabla 20 muestra el resumen de datos a esta condición. En general todas estas corridas presentan una buena relación entre la velocidad de filtración y la duración de corrida.

La cantidad y el tipo de sólidos presentes en la corrida 1 provoca que su duración sea inferior a 24 h , cosa que no ocurre con el sistema de lodos activados.

Las corridas 2 y 3 muestran una aproximación muy cercana en los resultados debido a la semejanza de las condiciones de operación.

La corrida 5 tiene una velocidad de filtración ligeramente mayor que la 4, lo cual acorta la corrida en un 20%.

#### 4.3.2 Análisis de datos a 2 m c.a.

En la Tabla 21 se encuentra que no hay relación entre la velocidad y la duración de corrida. Esto se explica porque son muy pocos datos y la cantidad de SST en el influente para la primer corrida es mucho mayor (27 contra 19 mg/l).

#### 4.3.3 Análisis de datos a 3 m c.a.

En la Tabla 22 se observa que los resultados son similares que a 2 m c.a., por lo que sólo se realizó esta corrida.

#### 4.3.4 Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad SST = $f$ (UTN)

De igual forma que en el biodisco (Anexo 4, Tabla A.4.32) este sistema tiene un coeficiente de correlación aceptable ( $r = 0.96$ ) y el intervalo de turbiedad (1.5 a 12 UTN) es similar a la empleada por Tchobanoglous (1970).

Por otra parte, la recta se ajusta al origen ya que del análisis estadístico de correlación la ordenada no coincide en

TABLA 20. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE FILTRO PERCOLADOR A 1 m c.a.

Corrida	V <sub>6</sub> m/h	Duración h	SST, mg/l				n %	Turbiedad, UTN				n % UTN
			Influyente		Efluyente			Influyente		Efluyente		
			X	S	X	S		X	S	X	S	
1	4.34	8.5	27	5.6	6	2	78	6.7	1.2	2.5	0.5	63
2	8.83	6.5	21.7	8	4.7	4.6	78	5.3	1	2	0.6	62
3	9.05	6.5	23.3	7	6	3.6	74	5.3	1	1.8	0.6	66
4	11.48	5	30.3	7.6	5.7	3.5	81	7.3	1.3	2.7	0.9	63
5	11.64	4	24	4.6	5	3.6	79	5.8	0.3	2.4	0.2	59
PROMEDIOS:			25.3	3.4	5.5	0.6	78	6.1	0.9	2.3	0.4	62

TABLA 21. RESUMEN DE LAS CORRIDAS EFECTUADAS PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE FILTRO PERCOLADOR A 2 m c.a.

Corrida	V <sub>0</sub> m/h	Duración h	SST, mg/l				n %	Turbiedad, UTN				n % UTN
			Influente		Efluente			Influente		Efluente		
			X	S	X	S		X	S	X	S	
1	12.24	8	27.3	4	4.7	3.5	83	7.2	0.9	2.5	0.5	65
2	13.68	9	19	1.7	4.3	3.2	77	5.3	0.8	2	0.4	62
PROMEDIOS:			23.2	5.9	4.5	0.3	81	6.3	1.3	2.3	0.4	63

TABLA 22. RESUMEN DE LA CORRIDA EFECTUADA PARA LA FILTRACION DEL SISTEMA DE FILTRO PERCOLADOR A 3 m c.a.

Corrida	V <sub>0</sub> m/h	Duración h	SST, mg/l				n %	Turbiedad, UTN				n % UTN
			Influente		Efluente			Influente		Efluente		
			X	S	X	S		X	S	X	S	
1	14.6	7.75	39	16.7	8.7	2.5	78	8.8	2	2.9	0.7	67

cero.

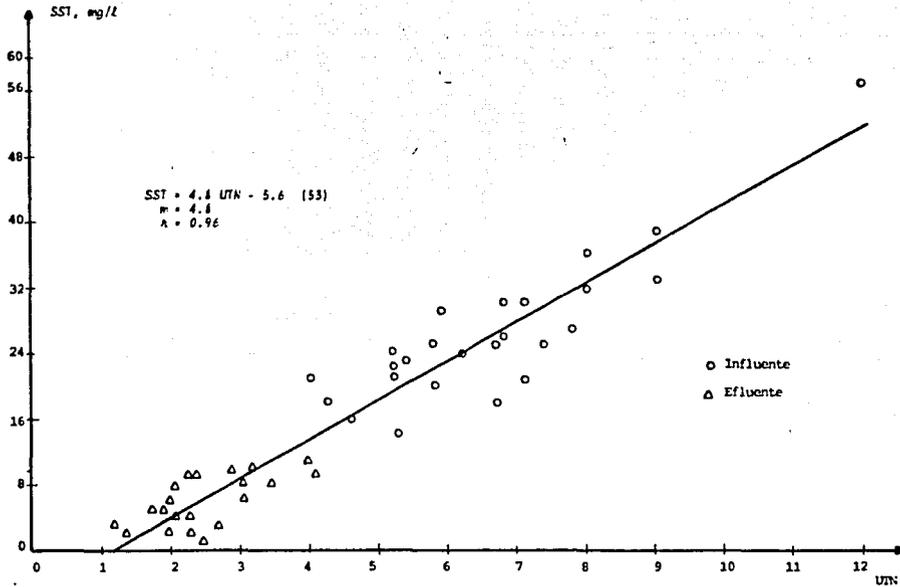


Figura 48. Relación entre la concentración de sólidos suspendidos y la turbiedad. F.P.

#### 4.3.5 Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de la corrida $\eta = f(t)$

De la figura 49 se encuentra que la eficiencia crece de 2 a 3% cada hora. En el caso especial del punto que decrece (4 h) se encontró se debía a una baja en la turbiedad del influente más que a la degradación del efluente.

En la Tabla 23 se nota que el promedio de eficiencia aumenta ligeramente, a una mayor carga de agua, pero esto es debido al incremento de la turbiedad del influente.

TABLA 23. PROMEDIOS DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE LA TURBIEDAD ( $\eta$ )

Condición	Promedio (%)		Turbiedad influente (UTN)	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
1 m c.a.	63	2.5	6	0.9
2 m c.a.	64	2.1	6.3	1.3
3 m c.a.	67		8.8	2

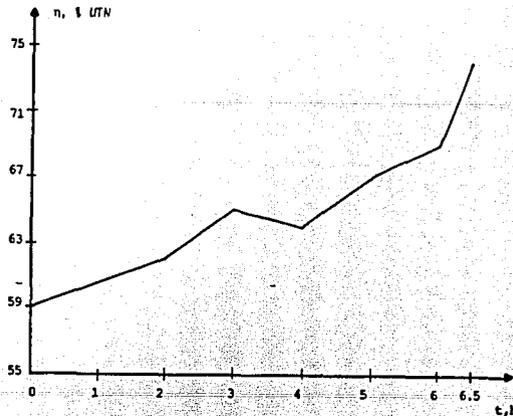


Figura 49. Relación entre la eficiencia de remoción y la duración de corrida para F.P.

#### 4.3.6 Relación entre la duración de corrida y la velocidad de filtración $t = f(v_f)$

Por la gráfica que resulta de esta relación (figura 50) se nota que los sólidos de este sistema tienen una característica diferente a los demás sistemas.

De estos resultados se deduce que los sólidos del filtro percolador son probablemente menos resistentes al paso del agua que el sistema de biodisco y que al desintegrarse se reparten mejor sobre el medio filtrante alargando las duraciones de las corridas.

TABLA 24. RELACION ENTRE LA DURACION DE CORRIDA Y LA VELOCIDAD DE FILTRACION PARA F.P.  
A 1 m c.a.

$v_f, m/h$	$t, h$
4.34	8.5
8.83	6.5
9.05	6.5
11.48	5
11.64	4

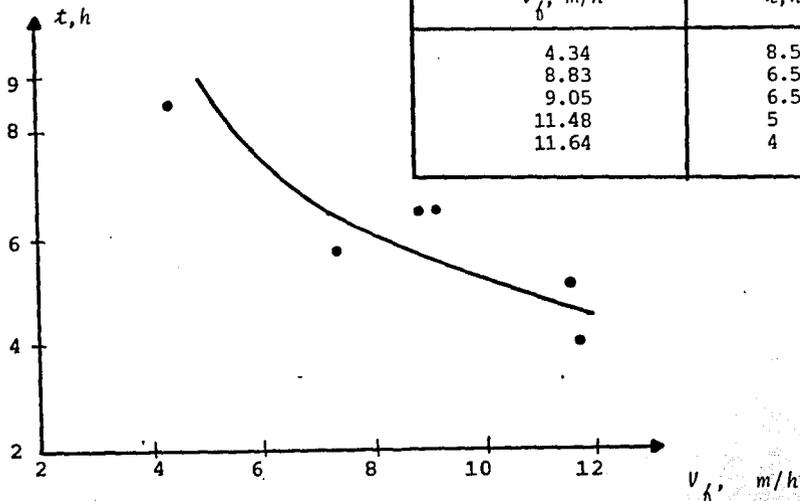


Figura 50. Relación entre la duración de la corrida y la velocidad de filtración. F.P.

4.3.7 Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo  $H = f(\Delta P)$  y  $f(t)$

4.3.7.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la misma condición de trabajo (1 m c.a.).

En este sistema, al igual que los otros, se encuentra que la velocidad de filtración es la causa de las caídas de presión iniciales, línea 1 (figuras 51 y 52). Así, para la velocidad de 4.34 m/h se tiene una  $\Delta P$  de (160-129 = 31 cm); mientras que para la velocidad más alta (11.64 m/h) se tiene una  $\Delta P$  de (160-62 = 98 cm). Además se observa que se sigue afectando la duración de corrida por la velocidad aplicada; cuando la corrida 5 (figura 52) concluye línea 4 (4 h), la corrida 1 (figura 51) apenas se encuentra a la mitad de su duración (4 h) línea 3.

4.3.8 Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo  $\Delta P$  y  $UTN = f(t)$

En la figura 53 se observa que existe relación entre la turbiedad del influente y efluente Parte A y en las caídas de presión parte B, hay un crecimiento pequeño de nivel a nivel debido a la velocidad de paso del agua (Bauman, 1974).

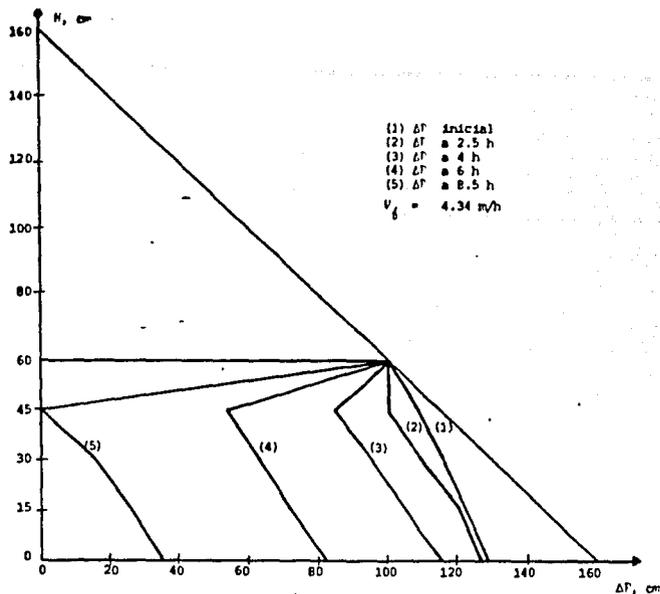


Figura 51. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo. F.P. (1 m c.a.)  $V_f = 4.34$  m/h

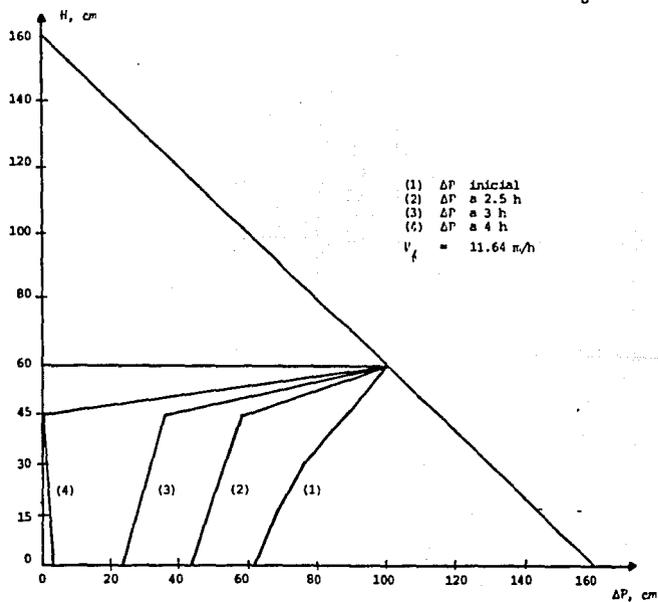


Figura 52. Relación entre la altura del medio con respecto a la caída de presión y el tiempo F.P. (1 m c.a.)  $V_f = 11.64$  m/h

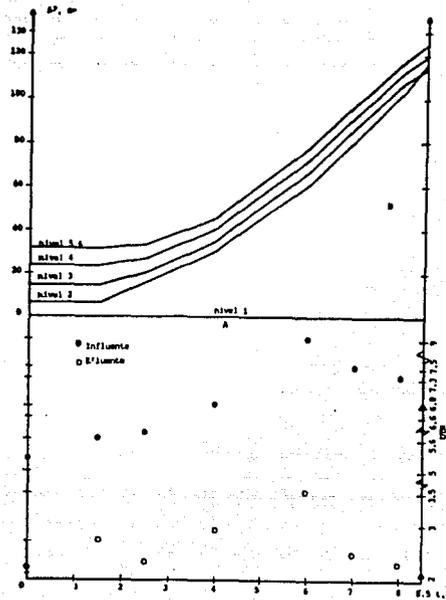


Figura 53. Relación entre la caída de presión y turbiedad con respecto al tiempo. F.P.

#### 4.3.9 Relación entre la altura con respecto a la turbiedad y el tiempo $H = f(UTN)$ y $f(t)$

En la figura 54 se encuentra que con el transcurso del tiempo mejora la remoción por turbiedad. A las 0 h hay un valor muy alto de turbiedad del influente (7.1), nivel 1 (75 cm), resultando un efluente de (2.8); mientras que a las 4 y 6.5 h el valor del influente es de 4.7 y 4.6 UTN llegando a un efluente de 1.7 y 1.2 UTN (nivel 6,5 cm) respectivamente.

Se nota además, que cuando el influente tiene un valor seme-

jante (4 y 6.5 h con 4.7 y 4.6 UTN) la remoción mejora con el tiempo.

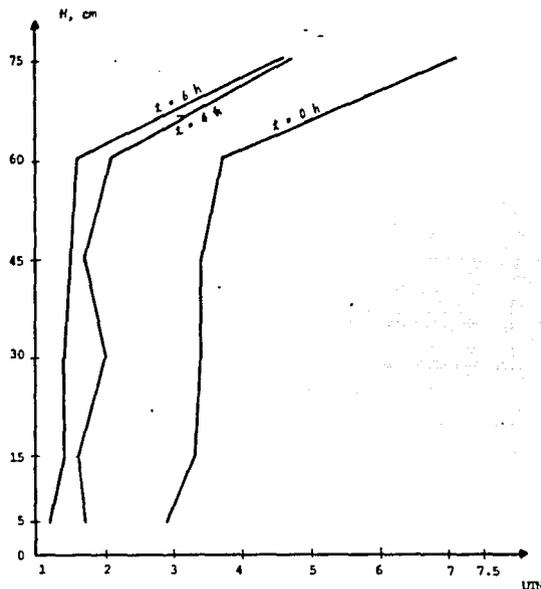


Figura 54. Relación entre la altura del medio con respecto a la turbiedad y el tiempo. F.P.

#### 4.3.10 Relación entre la eficiencia de remoción de turbiedad y la turbiedad del influente $\eta = f(\text{UTN influente})$

Los puntos que se obtienen de esta relación (figura 55) muestran que la capacidad del filtro tiende a un 75% y promedio de 65%. Esto demuestra que a lecturas de turbiedad del influente más altas resultarán eficiencias más grandes que a la vez son mayores a los demás sistemas.

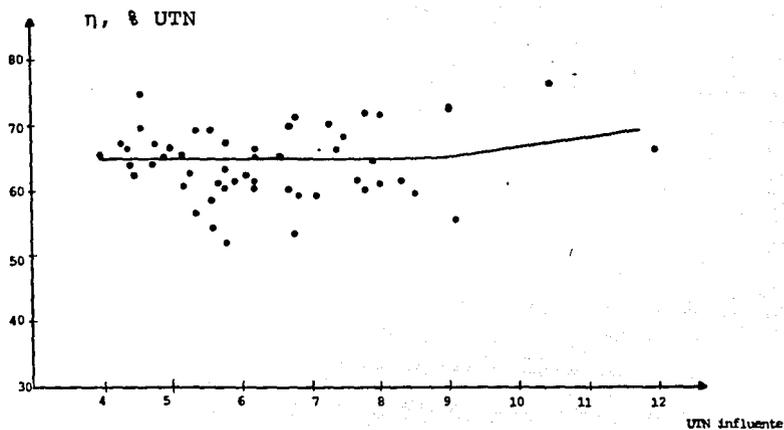


Figura 55. Relación entre la eficiencia de remoción y la turbiedad del influente para F.P.

#### 4.4 Aplicación del modelo matemático de Deb

Con objeto de comprobar si el modelo matemático propuesto por Deb se aplica a los resultados experimentales obtenidos, se alimentó el programa de cálculo con los datos de los tres efluentes estudiados. Las constantes  $A^I$ ,  $B^I$ ,  $\zeta$ ,  $K$  y  $F$  se calcularon de acuerdo con el método propuesto por Espinal (1985). En la Tabla 25 se encuentran resumidos los parámetros de filtración y las condiciones de operación empleados.

TABLA 25. CONSTANTES ESPECIFICAS DE FILTRACION

Sistema	Condiciones de operación		Parámetros de Filtración												
	Columna de agua (m c.a.)	Velocidad de filtración (m/h)	p	A'	B'	ζ	K	F	$h_o$	ΔL	Δt	n	ψ	NTF	NLF
L.A.	1	3.9	0.44	22.7	$2.3 \times 10^{-8}$	.95	3.4	37000	26	.25	12.9	7.5	8.04	18	8
BIODISCO	1	9.16	0.44	19.9	$1.6 \times 10^{-7}$	1	3.2	41111	66	.25	.25	7.6	5.2	6	8
F.P.	3	14.6	0.44	27.8	$6.9 \times 10^{-11}$	1.5	1.8	14230	110	.25	.41	7.4	4.14	8	8

El modelo calcula la relación de concentración y caídas de presión a lo largo de la corrida de filtración y para cada punto de muestreo. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada sistema.

#### 4.4.1 Lodos activados

En la figura 56 se presentan los resultados teóricos para el sistema de lodos activados, en ella se encuentran los perfiles de relación de concentración a través del tiempo para los cuatro puntos de muestreo establecidos ( $l/l$  es la relación de distancia del punto de muestreo,  $l$ , a longitud del lecho de arena,  $L$ ). Como se observa, la mayor parte de remoción de sólidos se lleva a cabo en los primeros centímetros de lecho de arena.

Por otra parte, en la figura 57 se muestran los resultados experimentales. Aquí se observa que no existen diferencias de remoción de sólidos a través del lecho filtrante a lo largo de la corrida. Por ello, se decidió hacer un promedio de los resultados para cada tiempo y presentarlos en la figura 58 con los resultados teóricos del primer punto de muestreo dentro del filtro.

En la figura 58 se observa la comparación entre los resultados teóricos con los experimentales y se observa que no exis

ten diferencias significativas por lo que el modelo de Deb es satisfactorio.

De igual manera en la figura 59 se presentan los resultados teóricos y experimentales para las caídas de presión a lo largo de la corrida de filtración. Una vez más el modelo se ajusta satisfactoriamente con los resultados experimentales.

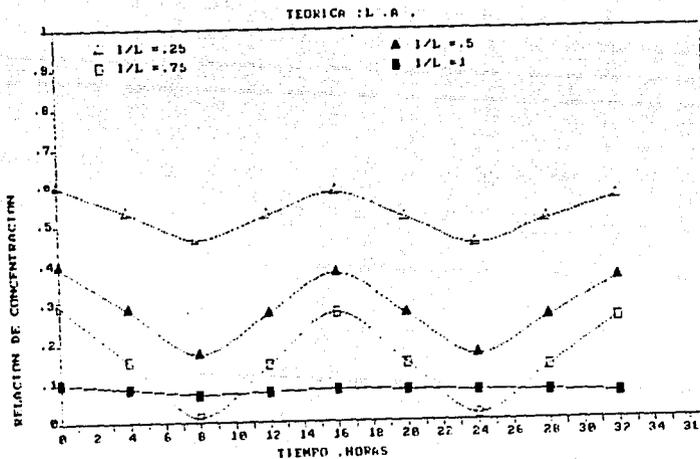


Figura 56. Relación de concentración teórica a lo largo de la corrida de filtración. Lodos Activados.

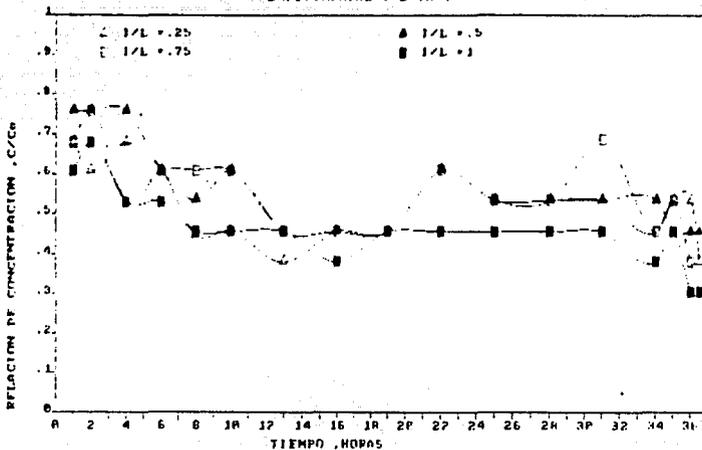


Figura 57. Relación de concentraciones experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Lodos Activados.

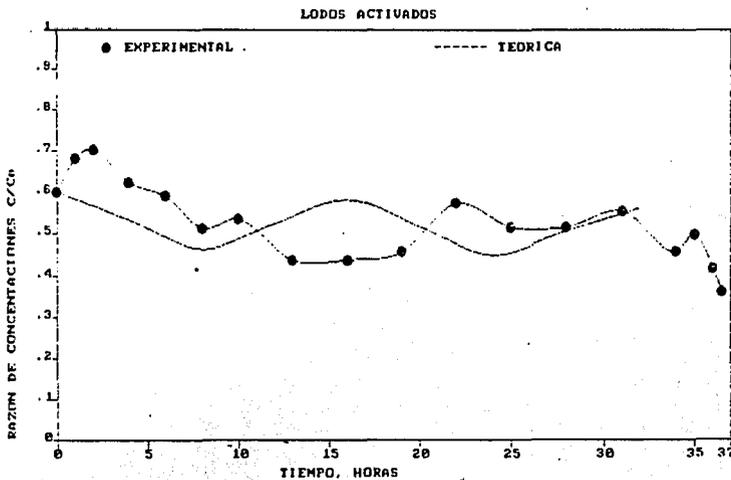


Figura 58. Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. Lodos Activados.

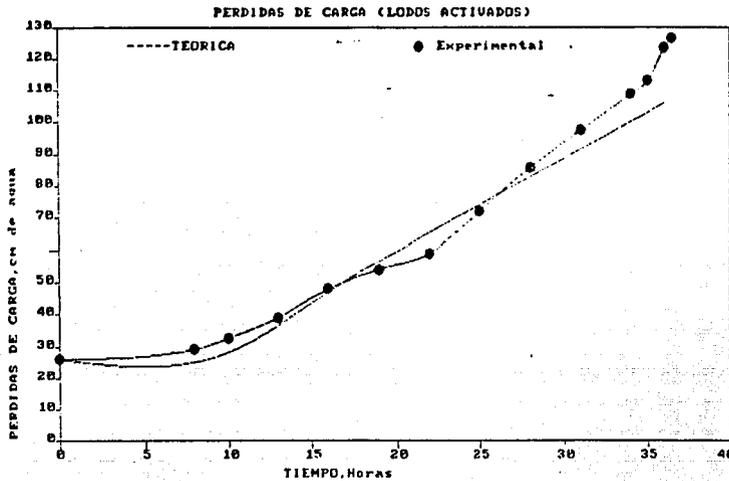


Figura 59. Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Lodos Activados.

#### 4.4.2 Biodisco

Para el caso del efluente de biodisco, las curvas teóricas, obtenidas a través del modelo matemático de Deb, muestran que la remoción de sólidos es prácticamente constante a lo largo de la corrida de filtración -para cada punto de muestreo (figura 60). Al igual que para lodos activados, los datos experimentales de concentración relativa, no permiten diferenciar un punto de muestreo de otro (figura 61). Por lo anterior se

calculó el promedio de los datos experimentales y se seleccionó la curva teórica que mejor los representa (figura 62). Aún así, se observa que los datos teóricos no concuerdan con los experimentales (56% de desviación) ya que experimentalmente, se encontraron mejores eficiencias de remoción que las teóricas.

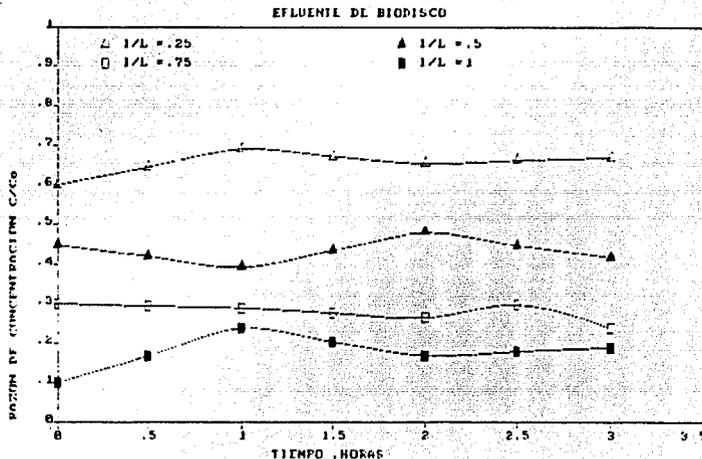


Figura 60. Relaciones de concentración teóricas a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco.

Con respecto a las curvas de caídas de presión (figura 63) se observa que el modelo no se ajusta a los datos experimenta

tales, ya que existe hasta 86% de desviación. Se deduce de

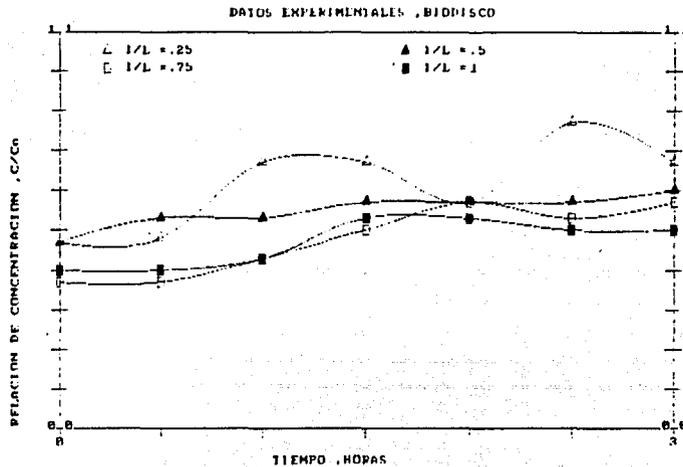


Figura 61. Relaciones de concentración experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco.

la curva teórica que el medio se satura más rápidamente que lo encontrado experimentalmente.

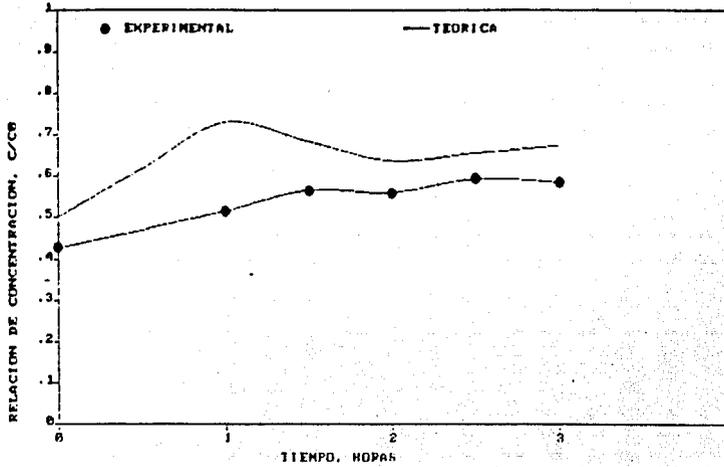


Figura 62. Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco.

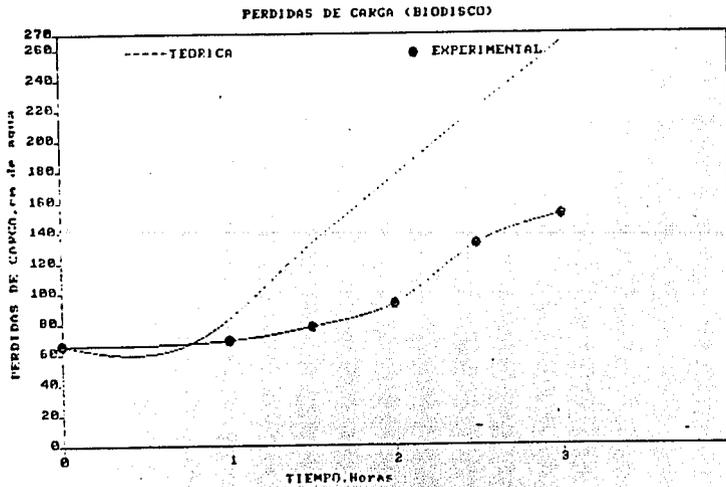


Figura 63. Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Biodisco.

#### 4.4.3 Filtro percolador

Los resultados experimentales de relación de concentración en función del tiempo de filtración muestran que, para este caso, existe una remoción diferente para cada punto de muestreo. Es decir, a medida que aumenta la profundidad del lecho filtrante, la remoción de sólidos es mayor. A medida que transcurre la corrida de filtración se observa que, en general para todos los puntos de muestreo, existe un ligero aumento en la eficiencia de remoción de sólidos (figura 64).

Sin embargo, al comparar los resultados experimentales promedio con los teóricos se observa que existe gran divergencia. Para este caso existen desviaciones de la relación de concentración hasta 80% (Figura 65).

Con respecto a las pérdidas de carga el modelo se ajusta medianamente, ya que las desviaciones son de hasta 17% mayores las teóricas que las experimentales (figura 66). Es decir, para el caso del filtro percolador el modelo predice una saturación del medio en un menor tiempo.

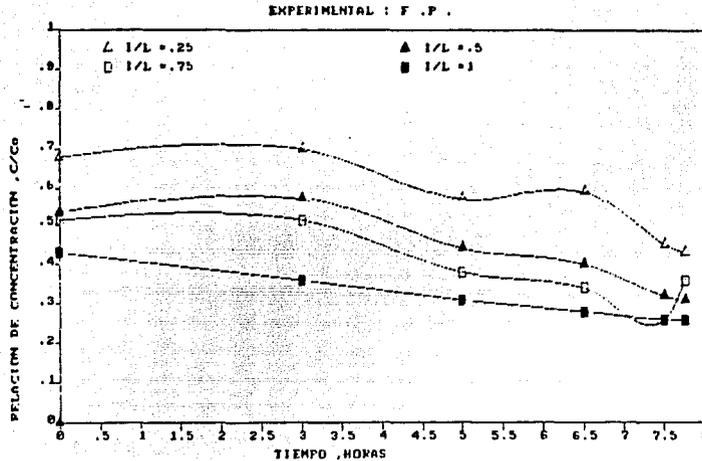


Figura 64. Relaciones de concentración experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Filtro Percolador.

#### 4.4.4 Análisis general de los resultados

Como se observó, el modelo matemático propuesto por Deb, sólo es aplicable para el caso de efluentes de lodos activados; ya que en este caso se obtuvieron resultados similares entre la teoría y la práctica. Sin embargo, debido a las características de la arena con que se trabajó, no fué posible obtener el perfil de concentraciones a lo largo del lecho de filtración y, poder compararlos con los obtenidos teóricamente.

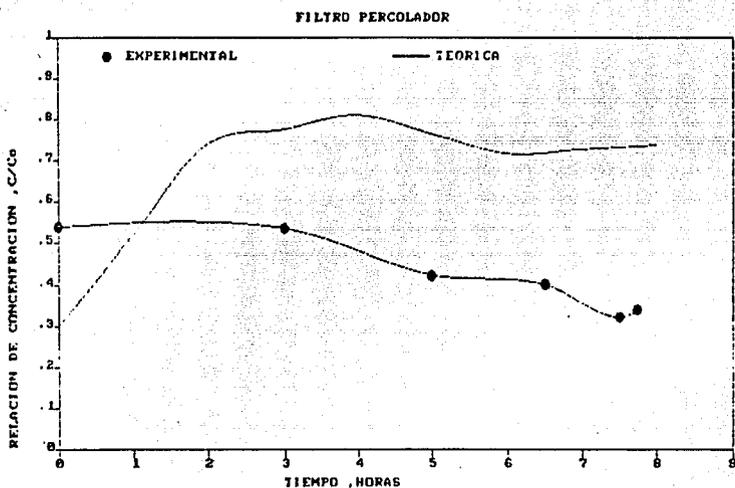


Figura 65. Valores teóricos y experimentales de la relación de concentración a lo largo de la corrida de filtración. Filtro percolador.

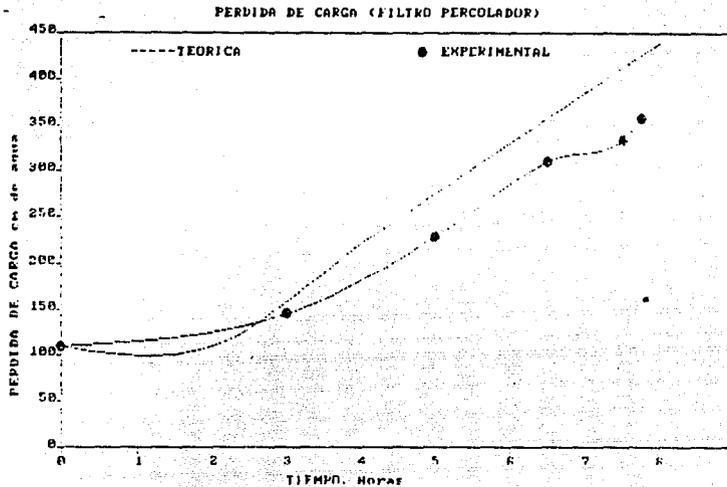


Figura 66. Pérdidas de carga teóricas y experimentales a lo largo de la corrida de filtración. Filtro Percolador.

Para los efluentes de biodisco y filtro percolador, el modelo no se aplica. Esto, puede ser debido a que el tipo de flóculo de estos sistemas es distinto al de los lodos activados. Lo anterior ocasiona que los parámetros de filtración no sean adecuados para modelar el funcionamiento de los filtros.

El motivo por el cual las corridas experimentales duraron más tiempo, que el predicho por el modelo teórico, se puede explicar por el hecho de que a altas velocidades los flóculos fueron disgregados. Lo anterior ocasionó que hubiera una mejor penetración a lo largo del medio, evitando saturaciones prematuras del medio con lo cual se prolongó el tiempo de filtración.

Finalmente, como también se dedujo a partir de los estudios de pérdida de carga, el modelo indica que, sólo la primera capa del lecho de arena remueve la mayoría de los sólidos suspendidos.

#### 4.5 Lavado de los filtros

##### 4.5.1 Resultados

Se obtuvieron las eficiencias del lavado por el cociente entre la materia desprendida en el lavado y la materia retenida en la filtración. Para calcular ambos parámetros se usó la aproximación de Simpson (discreta) que determina el área bajo la curva experimental por medio de una integral.

La materia retenida se evaluó en función de la turbiedad del influente y del efluente y los tiempos correspondientes. La ecuación empleada es la siguiente:

$$\text{materia retenida} = \int_{t_0}^{t_n} (T_{u_i} - T_{u_e}) dt \quad (54)$$

donde

$T_{u_i}$  : turbiedad del influente

$T_{u_e}$  : turbiedad del efluente

$t_n$  : tiempo final (de la corrida)

$t_0$  : tiempo inicial

Usando la misma aproximación para el cálculo de la materia desprendida pero con datos de lavado o sea turbiedades y los tiempos de muestreo. El método estructuró la ecuación siguiente

$$\text{Materia desprendida} = \int_{t_0}^{t_n} T_u dt \quad (55)$$

donde

$T_u$  : turbiedad de la muestra

$t_n$  : tiempo final (del lavado)

$t_0$  : tiempo inicial

Los resultados se ordenaron por continuidad experimental para cada filtro y en bloques de sistemas. Obteniendo para cada bloque un promedio de las eficiencias y un promedio total al finalizar la experimentación. Las Tablas 26 y 27 son los

resultados finales con que se interpretó y analizó el lavado.

La eficiencia se calculó mediante la siguiente ecuación

$$\eta = \frac{\text{material desprendido}}{\text{material retenido}} \times \frac{\text{velocidad de lavado}}{\text{velocidad promedio de filtración}} \quad (56)$$

#### 4.5.2 Análisis de resultados de lavado

La metodología de lavado estuvo respaldada por los gastos de lavado que variaron desde 4.6 m/h a 28.8 m/h y son datos que no están desviados completamente de la literatura, en la práctica recomiendan gastos de 4.8 m/h a 122.4 m/h (Siemak, 1984; Qureshi, 1982; Biskner, 1977).

Las eficiencias obtenidas fueron en general, mejores en el filtro 1 (Tablas 26 y 27). En promedio se obtuvo para lodos activados un rendimiento del 80%, para Biodisco de 80% y filtro percolador de 42%.

El bajo promedio obtenido en el segundo caso indica que es necesario realizar un estudio con mayor detalle al respecto.

TABLA 26. RESULTADO FINAL DE LAVADO DEL FILTRO UNO.

Sistema	Gasto medio de filtración (m <sup>3</sup> /h)	Columna de agua (m)	Tiempo de filtración (h)	Tiempo de lavado (min)	Gasto de lavado (m <sup>3</sup> /h)	nr (UTN-h)	md (UTN-h)	η (%)
Lodos Activados	3.29	1	6	15	4.5	2.95	2.66	100
	3.47	1	17	15	7.2	9.3	4.1	92
	3.31	2	13	17	4.03	12.8	16.2	100
	1.26	1	9.5	14	3.81	11.4	3.7	98
	4.03	3	16.5	22	2.7	19.4	8.5	29
	3.17	1 (coag)	8.5	20	3.2	5.2	5.5	100
$\bar{X}$								86.5
S								28.3
Biodisco	2.18	1	1.5	12	4.07	3.8	2.4	100
	3.11	1	1.25	15	3.03	1.6	2.1	100
	1.76	1	4	14	3.02	3.8	3.3	100
	3.63	2	4.75	14	4.9	4.4	2.3	71
	2.29	1	3	13	4.9	4.4	1.5	73
	3.89	3	5.5	15	3.2	9.2	3.3	30
$\bar{X}$								79
S								27.6
Filtro rociador	1.09	1	8.5	20	2.7	35	5.1	36
	2.21	1	6.5	19	3.6	21.1	7.1	55
	3.05	2	8	19	3.7	29	7	29
	3.65	3	7.75	19	4	43.3	7	18
$\bar{X}$								34.5
S								15.5
$\bar{X}_{\text{global}}$								70.7
S global								32.37

donde:  $\bar{X}$  :media

S :desviación standard

nr :material retenido

md :material desprendido

UTN :unidades de turbiedad

TABLA 27. RESULTADO FINAL DE LAVADO DEL FILTRO DOS

Sistema	Gasto medio de filtración (m <sup>3</sup> /h)	Columna de agua (m)	Tiempo de filtración (h)	Tiempo de lavado (min)	Gasto de lavado (m <sup>3</sup> /h)	mr (UTN-h)	md (UTN-h)	$\eta$ (%)
Lodos activados	0.972	1	27	12	3.13	19.3	5.61	94
	0.972	1	36.5	15	1.69	24.5	7.6	54
	1.59	1	13	25	1.62	15	9.8	67
	3.34	2	8	35	1.15	11.7	18.9	56
	2.12	1 (coag)	11	18.9	3.24	6	4	100
$\bar{X}$								74.2
S								21.5
Biodisco	2.83	1	1	15	3.17	11.7	2.8	26.8
	2.75	1	2	13	3.10	3.3	3.5	100
	3.53	2	4	20	3.24	3	3.8	100
	2.72	1	2	15	2.66	2.4	2.9	100
$\bar{X}$								81.7
S								36.6
Filtro rociador	2.91	1	4	19	3.35	9.7	5.4	64.1
	2.87	1	5	15	3.47	21.5	4.8	27.0
	2.26	1	6.5	19	3.6	17.4	6.2	56.8
	3.42	2	9	31	3.49	24.2	11.7	49.3
$\bar{X}$								49.3
S								16.04
$\bar{X}_{\text{global}}$								68.8
S <sub>global</sub>								27.34

donde:  $\bar{X}$  : media .

S : desviación standard

mr : materia retenida

md : materia desprendida

UTN : unidades de turbiedad

## 5. APLICACION DE LOS RESULTADOS A LA OPERACION DE LA PTCU

Los resultados expuestos permiten sugerir lo siguiente

- a) Para la filtración terciaria de la PTCU es posible utilizar un medio simple. En la actualidad el lecho se compone de arena ( $T.E \approx 0.4 \text{ mm}$ ) y restos de antracita. Si bien, sería también conveniente volver a colocar la cama de antracita el costo de ello resultaría elevado ya que su precio es de  $300 \text{ USD/m}^3$  contra  $70\,000 \text{ \$/m}^3$  para la arena.
- b) Aunque este estudio se realizó con una arena de T.E. de  $0.55 \text{ mm}$  (mayor al de la PTCU) pocas veces se lograron corridas mayores de  $24 \text{ h}$ , por lo que el medio ideal para los fines de la planta tendrá, seguramente, un tamaño mayor.

- c) Es interesante señalar el comportamiento tan diferente que presenta cada uno de los efluentes. Simplemente basta con recordar las duraciones promedio de corrida en cada caso: 15 h. para lodos activados, 7 h. para filtro percolador y 3 h para Biodisco.

Esto conduce a pensar en la posibilidad de separar los efluentes y tratarlos mediante lechos de arena diferente.

En el caso particular del filtro percolador, cuyos resultados se esperaban semejantes al otro proceso de película fija-biodisco-, es necesario considerar, antes de optimar el proceso de filtración, el fenómeno del rompimiento del flóculo por el bombeo del efluente.

- d) La mejora de la operación y seguimiento de los filtros de la PTCU están íntimamente ligados a la adaptación de sistemas de control y medición de los gastos influentes y efluentes, así como al empleo de piezómetros. Esto permitiría un control fácil por parte de los operadores y el afinamiento de ciertos parámetros a las condiciones diarias de funcionamiento.
- e) Como parte del mantenimiento preventivo debe de incluirse la verificación periódica de la granulometría del me

dio ya que es sabido que ésta se modifica con el tiempo. Esta práctica permitiría detectar el empleo de condiciones inadecuadas de lavado.

- f) Por último, las condiciones de lavado empleadas en el estudio lograron eficiencias del 75% mismas que pueden fácilmente alcanzarse e incluso mejorarse en los filtros de la planta mediante la correcta dosificación de los gastos de agua y aire.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado lleva a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

### En general

La crisis económica en México ha ocasionado que la utilización de medios duales de arena y antracita tiendan a desaparecer. Dentro de este contexto resulta interesante la realización de un estudio que emplee un medio fácilmente accesible y barato como es la arena.

La experimentación y la bibliografía realizadas demostraron que para evaluar la eficiencia de un filtro se debe tomar en cuenta tanto la calidad del efluente como la producción de agua tratada y la duración de la corrida. Además, de consi-

derar el comportamiento del medio durante la filtración.

Para el tipo de efluente

Se encontró que los tres efluentes se comportan de manera muy diferente, siendo lodos activados el que presentó los mejores rendimientos para el tipo de arena empleada.

- La forma de las curvas de caída de presión vs tiempo de filtración (figuras 27, 45 y 53) indica que los mecanismos dominantes de remoción fueron el cribado y la intercepción.
- El empleo de una arena relativamente pequeña provocó que las corridas se terminasen por falta de carga hidráulica y no por bajos rendimientos por lo que la optimización del proceso requiere el aumento de la granulometría (T.E. a 0.8 - 0.95 mm) y (C.U. lo más uniforme posible).
- Las técnicas de lavado empleadas tuvieron un rendimiento promedio del 75% (80% en lodos activados, 80% en bio disco y 42% Filtro rociador). Se considera que estas eficiencias se pueden mejorar mediante un estudio adecuado.

### En cuanto a la metodología empleada

El tamaño y consistencia del floculo formado de los efluentes residuales biológicos es muy variable y ocasiona diferentes lecturas de turbiedad para un mismo contenido de materia.

En relación con el modelo matemático de Deb se encontró que para el sistema de lodos activados se acopló confiablemente mientras que para los otros sistemas no se obtuvieron tan buenos resultados. La razón de ellos es la corta duración de las corridas para biodisco y filtro percolador.

Por último, se recomienda siempre llevar a cabo un estudio piloto de filtración antes de construir una planta ya que existen pocos criterios en la literatura y es muy difícil tomar en cuenta durante el cálculo la variabilidad de las características del influente.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Arboleda V.J. (1969) "Manual de tratamiento de aguas potables" Programa de Educación de Ingeniería Sanitaria, Caracas, Venezuela. Publicación 30, pp. 353.

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

Badillo, J. y Rodríguez R., (1977) "Mecánica de suelos" 3a. Edición, Tomo I, Ed. Limusa, pp. 642.

Baumann E.R. and Huang J.Y.C. (1974) "Granular filters for tertiary wastewater treatment", Journal WPCF, Vol. 46, pp. 1958-1973.

Biskner C.B. and Young J.C. (1977) "Two-stage filtration of secondary effluent", Journal WPCF, Vol. 49, pp 319-331.

Coronado, J.A. (1984) "Diseño e instalación de un modelo pa  
ra filtración directa de aguas turbias", Facultad de Inge-  
nería, UNAM. pp. 194.

Dawda M.M. and Davidson, M.L. (1978) "Granular media filtra  
tion of secondary effluent", Journal WPCF, Vol. 50, pp.  
2143-2156.

Deb, K.A. (1969) "Theory of sand filtration", Journal SEE,  
Vol. 95, No. SA3, pp. 399-422.

Deb, K.A. (1970) "Numerical solution of filtration equations"  
Journal SEE, Vol. 96, No. SA2, pp. 195-210.

Dégremont (1979) "Manual técnico del agua", 4a. Edición,  
pp. 1216.

Espinal, F.G. (1985) "Comparación experimental de filtración  
directa según la práctica Americana y Europea", Facultad de  
Ingeniería, UNAM, pp. 95.

Jiménez, C.B. (1986) "La operación de la planta de tratamien  
to de aguas residuales de C.U. Comentarios y actividades pro  
puestas", Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 134.

Ludwing, E.E. (1960) "Flow of Fluids" Chemical Engineering Vol. 67, No. 12-13, pp. 161-208.

Matsumoto, M.R. and Galeziewski, M.T. (1982) "Filtration of primary effluent", Journal WPCF, Vol. 54, pp. 1581-1591.

Metcalf and Eddy (1979) "Wastewater treatment-Disposal-Reuse", 2a. Edición, Ed. Mc Graw-Hill, pp. 920.

Qureshi, N. (1982) "The effect of backwashing rate on filter performance", Journal AWWA, Vol. 74, pp. 242-248.

Reynolds, T. (1982) "Unit operations and processes in Environmental Engineering". Ed. Wads-Worth, USA, pp. 576.

Segall, A.B. and Okun A.D. (1966) "Effect of filtration rate on filtrate quality", Journal AWWA, Vol. 58, pp. 368-378.

Siemack, C.R. (1984) "Tertiary filtration: practical design consideration", Journal WPCF, Vol. 56, No. 8, pp. 944-949.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1980). Journal, APHA, AWWA, WPCF, Ed. Amer. Pub. Health Assoc.

Tchobanoglous G. and Eliassen R. (1970) "Filtration of Treated sewage effluent", Journal SEE, Vol. 96, No. SA2, pp. 243-265.

. Tchobanoglous G. (1970) "Filtration techniques in tertiary treatment", Journal WPCF, Vol. 42, pp. 604-623.

## A N E X O S

**ANEXO 1. DEDUCCION DE LA FORMULA PARA CALCULAR EL NUMERO DE  
PUNTOS DE CONTACTO ENTRE GRANOS.**

## ANEXO 1

DEDUCCION DE LA FORMULA PARA CALCULAR EL NUMERO DE PUNTOS DE CONTACTO ENTRE GRANOS.

Slichter estableció que la porosidad de un lecho de esferas con arreglo romboédrico varía entre un valor máximo de 0.4764 (cuando el ángulo de los lados es de 90°) y un mínimo de 0.2599 (ángulos de 60°). En cada caso el número de puntos en contacto es de 6 y 12. Si se representa  $x$  como la fracción contenida de granos en un medio con arreglo de 90° y  $(1 - x)$  la de 60°, la porosidad del lecho es:

$$p = 0.4764 x + (1 - x) 0.2599 \quad (A.1.1)$$

Si la cantidad total de granos ( $N_p$ ) contenidos en una unidad de volumen está dada por:

$$N_p = (1 - p) / \beta_0 d^3 \quad (A.1.2)$$

donde,

$\beta_0$  : coeficiente volumétrico de los granos

$d$  : talla media de los granos

La cantidad de partículas con arreglo de 90 y 60° será, respectivamente

$$N_{p_1} = x(1 - 0.4764) / \beta_0 d^3 \quad (A.1.3)$$

y

$$N_{p_2} = (1 - x)(1 - 0.2599) / \beta_0 d^3 \quad (A.1.4)$$

tomando en consideración lo expuesto por Slichter el número medio de puntos de contacto,  $\eta$ , se representa:

$$\eta = \frac{6N_{p_1} + 12 N_{p_2}}{N_p} \quad (A.1.5)$$

Al sustituir A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4 resulta:

$$\eta = \frac{15.7714 - 26.5109 p}{1 - p} \quad (A.1.6)$$

Ecuación presentada en sección 1.4.

## **ANEXO 2. DIAGRAMA DE FLUJO Y PROGRAMA**

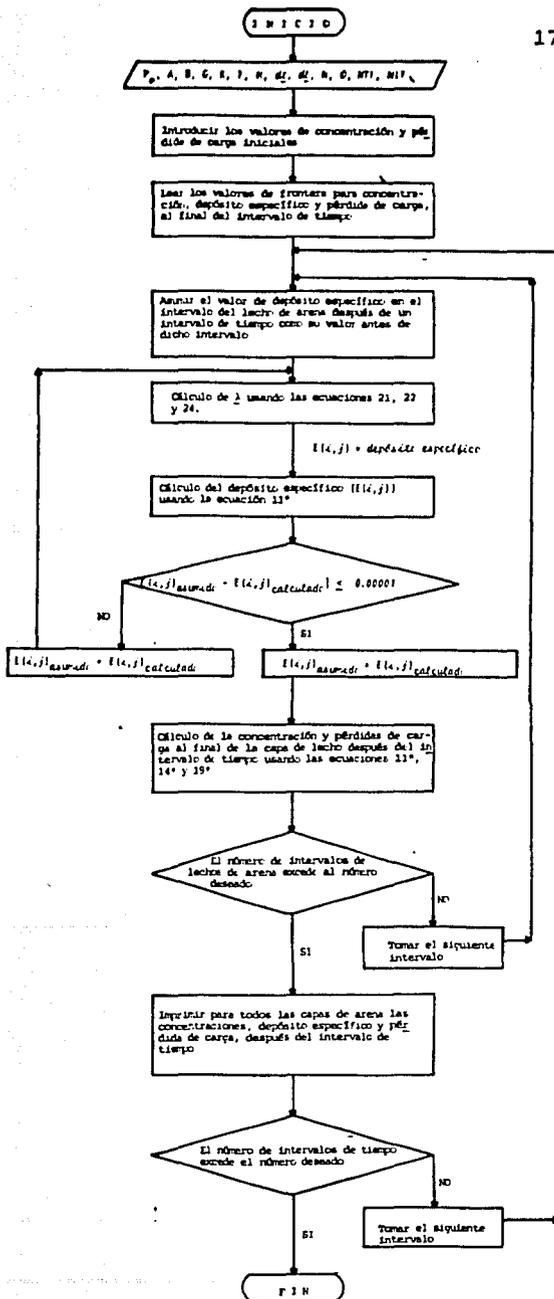


DIAGRAMA DE FLUJO

### **ANEXO 3. DESCRIPCION DE LAS TECNICAS ANALITICAS EMPLEADAS**

### ANEXO 3. DESCRIPCION DE LAS TECNICAS ANALITICAS EMPLEADAS

#### A.3.1 *Determinación de sólidos suspendidos totales (Métodos Estándar, 1980)*

##### A.3.1.1 Método

Se toma muestra bien mezclada cuyo volumen depende del contenido de sólidos existentes , y se filtra a través de un filtro de fibra de vidrio a peso constante. El residuo retenido en el filtro es secado a 103 - 105°C.

El incremento en peso del filtro representa los sólidos suspendidos totales, tal como lo expresa la siguiente ecuación

$$C_{SST} = \frac{A - B}{\text{Volumen de alicuota}} \times 1000 = \text{mg/l}$$

(A.3.J)

A: peso del filtro más el residuo seco, mg

B: peso inicial del filtro, mg.

#### A.3.1.2 Equipo y material

- a) Charolas de aluminio de acero inoxidable de 65 mm de diámetro
- b) Papel filtro de fibra de vidrio sin adhesivo orgánico
- c) Equipo de filtración Millipore
- d) Estufa.

#### A.3.2 Determinación del peso específico (Arboleda, 1973)

##### A.3.2.1 Método

La muestra se lava y se seca a una temperatura de 130°C durante 24 horas. Se pesa una cierta cantidad de arena (peso de arena P.A.) y se hierve en 100 ml de agua destilada durante 5 min con el fin de expulsar el aire contenido dentro de los poros de la arena.

Previamente se seca un matraz aforado, se pesa y se anota como peso del matraz (P.M.).

Después de enfriar la muestra se introduce al matraz, se afora con agua destilada hasta la marca y se vuelve a pesar anotándolo como el peso final (P.F.).

### A.3.2.2 Cálculos

El peso específico se obtiene de:

Peso de arena: P.A.

Peso de matraz solo: P.M.

Peso final (peso matraz, peso arena, peso agua): P.F.

Peso de agua = peso final - P.M. - P.A. = P.F. - P.M. - P.A.

$$\text{Volumen de agua} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{densidad de agua}} = P.F. - P.M. - P.A. \quad (\text{A.3.2})$$

Volumen de muestra = Volumen del aforado - Volumen de agua

o sea

$$V.M. = V.A. - (P.F. - P.M. - P.A.) = V.A. + P.M. + P.A. - P.F.$$

entonces

$$P.E. = \frac{P.A.}{V.M.} = \frac{P.A.}{V.A. + P.A. + P.M. - P.F.} \quad (\text{A.3.3})$$

### A.3.2.3 Material

- a) Matraz aforado del volumen deseado
- b) Vaso de precipitado del volumen adecuado para el calentamiento
- c) Parrilla eléctrica
- d) Desecador
- e) Termómetro.

### A.3.3 Determinación de la porosidad (Juárez Badillo, 1977)

#### A.3.3.1 Método

Se toma un volumen de muestra ( $V_M$ ) y se seca durante 24 h. Se vuelve a pesar ( $W_\Delta$ ). Bajo las expresiones siguientes se calcula la porosidad.

#### A.3.3.2 Procedimiento de cálculo

- a) Se determina el volumen seco de la muestra ( $V_\Delta$ ) a partir del peso seco ( $W_\Delta$ ) y el peso específico ( $\rho'_\Delta$ )

$$V_\Delta = \frac{W_\Delta}{\rho'_\Delta} \quad (\text{A.3.4})$$

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

$$V_v = V.M. - V_s \quad (A.3.5)$$

- c) El valor de la porosidad será la relación del volumen de vacíos entre el volumen medido

$$p = \frac{V_v}{(V.M.)} \quad (A.3.6)$$

#### A.3.3.3 Material

Probeta de 100 ml

Balanza granataria

Estufa

#### A.3.4 Análisis granulométrico (Judrez y Badillo, 1979)

##### A.3.4.1 Método

Se separa la arena a través de una serie de tamices con aberturas estandarizadas (Serie Americana de Tamices, E.U.). Con ayuda de un vibrador. La arena retenida en cada malla se pesa y se obtienen los porcentos que pasan a través de cada malla.

Se construye una gráfica semilogarítmica de el porcentaje que pasa de arena (escala normal) contra la abertura de malla (escala log). De ahí se obtiene el tamaño efectivo como el diámetro al 10% y el coeficiente de uniformidad que es la relación de diámetros correspondientes al 60% y 10%.

#### A.3.4.2 Preparación del medio

Para el presente estudio de filtración se requería un (T.E.  $\approx$  0.6 mm) y un (C.U.  $\approx$  1.6) ya establecido. Fue necesario obtener una granulometría adecuada a partir de la arena disponible en el mercado.

En la sección 3.5 se encuentra la Tabla 8 que muestra la granulometría inicial que es similar a la que se requiere.

La preparación consistió en separar en mallas (16, 30 y 50) 1 ton. de material. Posteriormente se calculó el porcentaje requerido de cada malla y se mezclaron para formar el empaque con características de la Tabla A.3.4. Asimismo en la figura A.3.4 se presenta la gráfica correspondiente.

TABLA A.3.4 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA ARENA

# de malla	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% que pasa acumulado
16	1.19	50.4	5.94	94.06
25	0.71	483.0	56.97	37.09
30	0.59	214.1	25.25	11.84
40	0.42	50.3	5.93	5.91
50	0.297	44.3	5.23	0.68
70	0.21	4.0	0.47	0.21
100	0.149	0.7	0.08	0.13

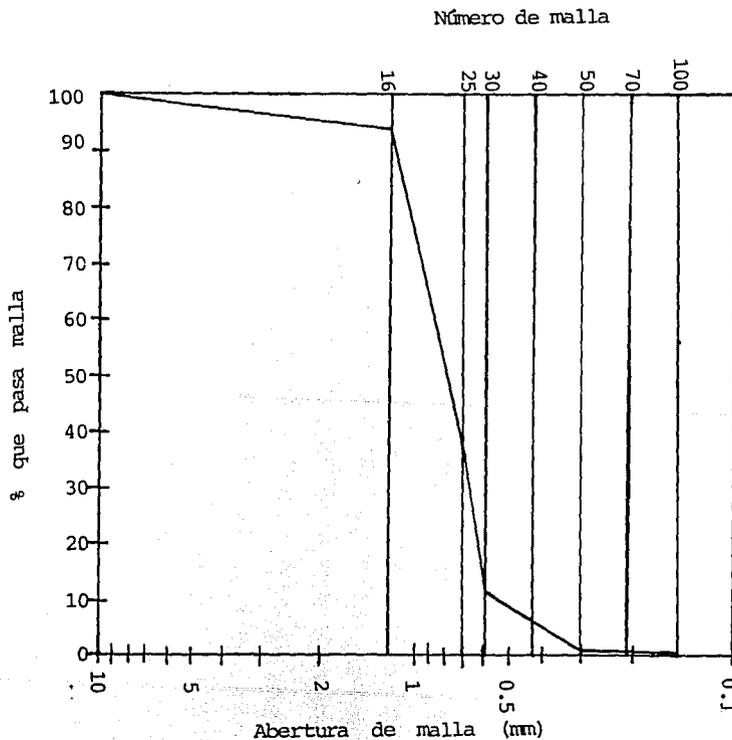


Figura A.3.4. Curva de análisis granulométrico

#### ANEXO 4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FILTRACION

$v_f = 3.9 \text{ m/h}$	Duración de: 27 h corrida	$SST_{\text{in } f} = 14.7 \frac{\text{mg}}{\ell}$	$SST_{\text{e } f} = 2.5 \frac{\text{mg}}{\ell}$
-------------------------	------------------------------	--	--

Tiempo h	Turbiedad, UIN						n %	AP, cm					
	in f=1	2	3	4	5	e f=6		in f=1	2	3	4	5	e f=6
0	1.2					0.9	25	0	6	12	19	25	25
0.25	1.3	0.9	1.0	1.0	0.8	0.9	31	0	7	14	21	27	27
0.5	1.3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	46	0	7	14	21	27	27
1.0	1.4	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	36	0	8	14	21	27	27
1.5	1.6	1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	44	0	9	14	21	28	28
2.0	1.6	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	44	0	9	14	21	28	28
3.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	40	0	10	15	21	28	28
4.0	1.7	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	53	0	12	16	21	28	28
6.0	1.9	1.4	0.9	0.8	0.9	0.9	53	0	15	18.5	22	28	28
8.0	1.9	0.9	1.1	0.9	0.8	0.8	58	0	24	27.5	31	34	34
10.0	1.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	56	0	31	34	37	40	40
12.0	1.4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	57	0	43	46	49	52	52
13.0	1.4	0.7	0.8	0.6	0.6	0.5	64	0	47	50.5	53	56.5	56.5
14.0	1.2	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	50	0	52	55.5	58	61	61
15.0	1.2	0.5	0.7	0.5	0.5	0.6	50	0	64	67.5	71	75	75
16.0	1.3	0.6	0.6	0.7	0.5	0.5	62	0	67.5	71	74.5	77.5	77.5
17.0	1.1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	64	0	72	75.5	78.5	82	82
18.0	1.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	71	0	79	82.5	86	89	89
19.0	1.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	67	0	83	86.5	89	92.5	92.5
20.0	1.4	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	71	0	85.5	89	92	95	95
21.0	1.2	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	67	0	88.5	91.5	94.5	97.5	97.5
22.0	0.9	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	56	0	91	94.5	97.5	100.5	100.5
23.0	0.9	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	56	0	93	96	99	102	102
24.0	1.2	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	58	0	99.5	102.5	105.5	108.5	108.5
25.0	1.2	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	42	0	103.5	106.5	110	112.5	112.5
26.0	1.3	0.7	0.6	0.9	0.7	0.6	54	0	108	111	114	117.5	117.5
27.0	1.3	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	54	0	115	118	121	124	124











**Anexo 4.2. Lodos Activados**  
**2 m c.a.**





**Anexo 4.3. Lodos Activados****3 m c.a.**



**Anexo 4.4. Lodos Activados**  
**1 m c.a. con coagulante**





Anexo 4.5 Błodisco  
1 m.c.a.















Anexo 4.6. Biodisco  
2 m c.a.





Anexo 4.7. Biodisco  
3 m c.a.



**Anexo 4.8. Filtro rociador****1 m c.a.**











nexo 4.9. *Filho rociador*  
2 m c.a.





**Anexo 4.10. Filtro rociador**  
**3 m c.a.**



Anexo 4.11. Relación SST =  $\delta$  (UTN)

TABLA A.4.30 RELACION ENTRE LA TURBIEDAD Y LA CONCENTRACION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS PARA LODOS ACTIVADOS

No.	SST mg/l	TURBIEDAD UTN	
1	1	0.9	
2	1	0.9	
3	6	0.8	SST = 8.17 UTN - 1.89 (A.4.30)
4	1	0.9	
5	1	0.8	m = 8.17
6	5	0.6	
7	1	1	
8	6	1	n = 0.48
9	2	0.7	
10	1	0.9	
11	20	1	
12	17	1	
13	1	0.9	
14	2	1.1	
15	2	1	
16	5	0.6	
17	5	0.9	
18	1	0.7	
19	2	0.6	
20	1	0.9	
21	9	0.8	
22	27	1.6	
23	30	1.6	
24	8	1.7	
25	7	1.9	
26	4	1.9	
27	12	1.3	
28	7	1.9	
29	7	2.2	
30	8	2	
31	2	1.5	
32	36	1.7	
33	24	1.6	
34	7	1.8	
35	18	2.3	
36	15	2.2	
37	30	2.2	
38	16	2.1	
39	9	1.9	
40	7	2	
41	7	1.9	
42	13	1.4	

TABLA A.4.31. RELACION ENTRE LA TURBIEDAD Y LA CONCENTRACION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS PARA BIODISCO

No.	SST mg/l	TURBIEDAD UTN
1	5	1.2
2	2	1.7
3	10	2.2
4	13	2.3
5	5	1.1
6	7	1.6
7	9	1.1
8	8	1.5
9	8	2.4
10	2	1.6
11	10	2.0
12	4	1.9
13	9	1.6
14	4	1.6
15	6	1.7
16	8	1.6
17	5	0.8
18	2	1.3
19	3	1.3
20	10	1.2
21	1	1.3
22	6	1.2
23	6	1.9
24	15	3.2
25	22	4.8
26	26	5.9
27	13	2.4
28	14	3.1
29	11	2.4
30	13	2.9
31	22	4.3
32	16	3.8
33	19	4.7
34	20	4.6
35	17	3.5
36	15	3.6
37	10	1.9
38	19	3.3
39	9	1.5
40	8	2.7
41	14	2.6
42	13	2.5
43	5	2.8
44	21	3.5

$$SST = 4.7 \text{ UTN} - 0.7 \quad (A.4.31)$$

$$m = 4.7$$

$$n = 0.89$$

TABLA A.4.32. RELACION ENTRE LA TURBIEDAD Y LA CONCENTRACION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS PARA FILTRO ROCIADOR.

No.	SST mg/l	TURBIEDAD UTN
1	4	2.1
2	8	3.5
3	6	2
4	10	3.2
5	2	2
6	2	1.4
7	10	2.9
8	5	1.8
9	3	1.2
10	9	4.1
11	6	3.1
12	2	2
13	9	2.4
14	4	2.3
15	2	2.3
16	8	3.1
17	1	2.5
18	5	1.9
19	3	2.7
20	8	2.1
21	2	1.4
22	11	4
23	6	2.5
24	9	2.3
25	22	5.2
26	33	9
27	26	6.8
28	30	6.8
29	14	5.3
30	21	4
31	30	7.1
32	24	5.2
33	16	4.6
34	39	9.1
35	27	7.8
36	25	6.7
37	23	5.4
38	20	5.8
39	29	5.9
40	32	8
41	25	7.4
42	25	5.8
43	18	6.7
44	21	5.2
45	18	4.3
46	57	11.9
47	24	6.2
48	36	8

SST = 4.8 UTN - 5.6 (A.4.32)

m = 4.8

r = 0.96