



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

“ESTUDIO SOBRE LA PERDIDA DEL LECHO
FILTRANTE DURANTE EL RETROLAVADO DE
FILTROS DE LA PLANTA POTABILIZADORA
LOS BERROS DEL SISTEMA CUTZAMALA, EDO.
DE MEXICO”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

LETICIA CASTANEDA CORRAL



1991

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.

INDICE

Pág.

Lista de Tablas

Lista de Figuras

Notación

Resumen

1. Introducción.	1
2. Recopilación de la información.	2
2.1 Criterios para evaluar la eficiencia del lavado.	4
2.2 Mecanismos de adhesión.	5
2.3 La abrasión como principal mecanismo de limpieza.	8
2.4 Métodos de lavado.	12
2.4.1 Lavado con agua solamente.	12
2.4.2 Lavado con aire.	14
2.4.3 Métodos auxiliares de lavado.	15
2.4.4. Comparación entre los métodos de lavado.	17
2.5 Factores que influyen sobre el rendimiento del lavado.	18
2.5.1 Adición de reactivos.	18
2.5.2 Características del medio filtrante.	20
2.5.3 Duración del lavado.	23
2.5.4 Gradiente de velocidad.	23
2.5.5 Efecto de la temperatura.	31
2.6 Modelación del comportamiento del medio filtrante durante el lavado.	32
2.6.1 Representación del material filtrante.	32
2.6.2 Correlaciones para representar la expansión.	36
2.6.3 Fluidificación.	40
2.6.4 Pérdida de carga durante el lavado.	52
2.7 Principales sistemas de distribución.	53
2.7.1 Falso fondo tipo Leopold.	53
2.7.2 Espreas microranuradas.	55
2.7.3 Grava.	56
2.8 Problemas de operación.	57
2.8.1 Aglomerados.	57
2.8.2 Agrietamiento.	58
2.8.3 Formación de zonas con presión negativa.	59
2.8.4 Pérdida de medio filtrante.	59
2.9 Criterios de operación.	60
2.9.1 Expansión.	60
2.9.2 Velocidad de lavado de agua.	63
3. Descripción de la planta.	64
3.1 Descripción del equipo que se utiliza en el proceso de potabilización.	64

3.1.1	Rejillas.	64
3.1.2	Dosificación de reactivos.	64
3.1.3	Canal Parshall.	65
3.1.4	Módulos de Potabilización.	65
4.	Metodología experimental.	73
4.1	Descripción del filtro piloto.	73
4.1.1	Columna de filtración.	73
4.1.2	Línea de alimentación de agua de lavado.	75
4.1.3	Línea de alimentación de aire de lavado.	75
4.1.4	Línea de descarga del agua de lavado.	76
4.1.5	Trampa de arena.	76
4.2	Procedimiento experimental.	76
4.2.1	Variables experimentales.	76
4.2.2	Corridas experimentales.	76
4.2.3	Parámetros de seguimiento.	77
4.3	Resultados.	79
5.	Evaluación de la planta.	80
5.1	Condiciones de lavado.	80
5.1.1	Tasa de aire.	80
5.1.2	Lavado con agua-aire.	81
5.1.3	Lavado auxiliar y enjuague.	82
5.1.4	Lavado en general.	82
5.2	Altura del lecho.	82
5.3	Expansión.	84
5.4	Problemas de operación.	85
5.4.1	Pérdida de medio filtrante.	87
5.4.2	Aglomerados.	97
5.4.3	Efecto de la temperatura en el lavado.	98
5.4.4	Evaluación de la duración del lavado con base en la turbiedad.	98
5.5	Sistema de distribución.	101
5.5.1	Consideraciones teóricas.	101
5.5.2	Evaluación.	101
5.6	Equipo de control.	101
6.	Conclusiones.	104
7.	Bibliografía.	108
	ANEXO. Análisis granulométrico.	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 2.1 ESTUDIOS QUE DEMUESTRAN QUE LAS MEJORES CONDICIONES PARA LAVADO CON AGUA SE SITUAN A UNA POROSIDAD ENTRE 0.65 Y 0.70.	9
TABLA 2.2 INTERVALOS DE LAVADO SEÑALADOS EN LA LITERATURA.	16
TABLA 2.3 COMPARACION ENTRE LOS METODOS DE LAVADO.	17
TABLA 2.4 MEDIA Y DESVIACION ESTANDAR DEL TAMAÑO DE LA PARTICULA (FLOCULO), POTENCIAL ZETA, FLUX DE LA PARTICULA Y pH PARA CADA DOSIS DE ALUMINA.	18
TABLA 2.5 VELOCIDADES DE RECUPERACION MAXIMA Y TASAS DE LAVADO CORRESPONDIENTES PARA VARIAS CONDICIONES DE FILTRACION MEDIO DE 0.93 mm.	19
TABLA 2.6 VELOCIDADES OPTIMAS DE LAVADO.	29
TABLA 2.7 VALORES DE β PARA LA CORRECCION POR TEMPERATURA.	31
TABLA 2.8 DIAMETROS (PARAMETROS) CARACTERISTICOS EMPLEADOS PARA DESCRIBIR PARTICULAS NO ESFERICAS.	33
TABLA 2.9 VALORES DE ESFERICIDAD MODIFICADA PARA DIFERENTES MATERIALES.	35
TABLA 2.10 PARAMETROS REQUERIDOS PARA DEFINIR UN SISTEMA FLUIDIFICADO.	41

TABLA 2.11	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE SE USAN EN LOS EXPERIMENTOS DE FLUIDIFICACION.	44
TABLA 2.12	CALIDAD DEL MEDIO FILTRANTE.	58
TABLA 4.1	CORRIDAS EXPERIMENTALES CON TASA DE AGUA CONSTANTE.	77
TABLA 4.2	CORRIDAS EXPERIMENTALES CON TASA DE AGUA VARIABLE.	77
TABLA 5.1	ALTURA DEL LECHO FILTRANTE (m).	83
TABLA 5.2	PORCIENTO DE EXPANSION EN CUATRO FILTROS.	84
TABLA 5.3	CANTIDAD DE ARENA PERDIDA DURANTE EL LAVADO (L).	87
TABLA 5.4	CARACTERISTICAS DE LA ARENA QUE SE PIERDE DURANTE EL LAVADO.	89
TABLA 5.5	VELOCIDADES MINIMAS DE FLUIDIFICACION CALCULADAS.	89
TABLA 5.6	CALCULO DE EXPANSION DEL MEDIO FILTRANTE.	92
TABLA 5.7	CALCULO DE LA ARENA PERDIDA DURANTE EL LAVADO Y DEL NUMERO DE LAVADOS QUE SE PODRIAN EFECTUAR SIN NECESIDAD DE REPONER ARENA.	94
TABLA 5.8	VELOCIDADES DE SEDIMENTACION DE PARTICULAS.	97
TABLA 5.9	CLASIFICACION DE LOS FILTROS SEGUN BAYLIS.	98
TABLA 6.1	MEDIDAS PARA CONTROLAR LA PERDIDA DE ARENA.	106
TABLA 6.2	MEDIDAS DE MANTENIMIENTO.	107

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
FIG 2.1	Diferentes clasificaciones de los filtros para tratamiento de agua.	3
FIG 2.2	Sistema de fuerzas que actúan en una partícula adherida al medio, a otra partícula, o a ambos.	7
FIG 2.3	Volumen de agua para lavado en función de la expansión y la porosidad.	10
FIG 2.4	Esfuerzo cortante en función de la porosidad para medio uniforme.	11
FIG 2.5	Lavado de arena con agua a 30°C.	13
FIG 2.6	Tasa de recuperación en función de la velocidad para partículas sin coagulante.	14
FIG 2.7	Tasa de recuperación en función de la velocidad para partículas con coagulante.	15
FIG 2.8	Gradiente de velocidad y porosidades para arena con peso específico de 2.65 y antracita de 1.65 para diferentes tasas de lavado con agua a 14°C.	28
FIG 2.9	Gradiente de velocidad y expansiones a diferentes temperaturas para arena de 0.55 mm y $\rho_s = 2.65$.	30
FIG 2.10	Relación entre abertura del tamiz y el diámetro esférico.	34

FIG 2.11	Relación entre porosidad de un lecho expandido y la velocidad superficial.	37
FIG 2.12	Relación entre u_{cr} / u_s y d/D_r .	37
FIG 2.13	Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re , usando DSF como factor de forma.	38
FIG 2.14	Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re , usando ψ como factor de forma.	39
FIG 2.15	Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re , usando Ω como factor de forma.	39
FIG 2.16	Relación entre A_1 y Re_1 para partículas esféricas.	43
FIG 2.17	Clasificación de los bajodrenes.	53
FIG 2.18	Falso fondo tipo Leopold.	54
FIG 2.19	Modelos de boquillas.	55
FIG 2.20	Boquilla cola larga (empleada en Los Berros).	56
FIG 2.21	Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.93 mm.	61
FIG 2.22	Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.69 mm.	62
FIG 2.23	Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.35 mm.	62

FIG 3.1	Principales fuentes de abastecimiento.	67
FIG 3.2	Plano de localización general.	68
FIG 3.3	Canal Parshall y sistema de dosificación de reactivos.	69
FIG 3.4	Plano general de los floculadores.	70
FIG 3.5	Plano general de los sedimentadores.	71
FIG 3.6	Plano general de los filtros.	72
FIG 4.1	Diagrama del sistema experimental de filtración y fotografía del filtro piloto.	73
FIG 4.2	Esquema del filtro.	74
FIG 4.3	Expansómetro.	78
FIG 4.4	Altura del lecho con tasa de agua de 19 m/h.	79
FIG 5.1	Altura de expansión del lecho en relación con la posición de la canaleta para una velocidad de agua de 25 m/h y aire de 30 a 100 m/h.	81
FIG 5.2	Aglomerados o "bolas de lodo " encontradas en los filtros.	85
FIG 5.3	Canaleta de lavado cubierta con arena después de un lavado.	86
FIG 5.4	Grietas en el lecho filtrante.	86
FIG 5.5	Mampara para recolección de arena.	88

FIG 5.6	Expansión del lecho con diferentes velocidades de agua.	90
FIG 5.7	Expansión del lecho en función de la velocidad del aire con agua a 19 m/h.	91
FIG 5.8	Borbollón.	96
FIG 5.9	Por ciento en peso de sólidos en la arena lavada.	99
FIG 5.10	Localización de los manómetros de aire.	103

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las causas que ocasionan la pérdida del lecho filtrante durante el lavado de los filtros de la Planta Potabilizadora "Los Berros" del Sistema Cutzamala Edo., de México, y proponer soluciones.

Durante el estudio se hicieron varias visitas a la Planta para conocer las condiciones de operación reales y reproducirlas en un filtro piloto en el laboratorio de procesos del Instituto de Ingeniería.

En los filtros se hicieron mediciones de expansión, altura del lecho filtrante, tasas de lavado, eficiencia del lavado, tiempos de lavado, evaluación de la metodología del lavado, temperatura del agua y se cuantificaron las pérdidas de arena durante el lavado. Por otra parte, en el laboratorio se evaluaron las pérdidas de arena variando las tasas de lavado y la altura del lecho.

De acuerdo con los resultados de las mediciones de campo y de las corridas experimentales, se encontró que las pérdidas de arena se deben a diversos factores, los principales son: taponamiento de las boquillas (que ocasionan mala distribución de los fluidos de lavado), formación de bolas de lodo, agrietamiento del lecho, diferencia de altura entre los lechos de una cámara y, por último, de las características de la arena.

Se llegó a la conclusión de que introducir aire sólo en la primer etapa compacta el medio, por lo cual se propuso un lavado con aire y agua simultáneo. Además de mejorar el mantenimiento preventivo y correctivo de la planta.

1. INTRODUCCION

El agua se potabiliza con el fin de acondicionarla para el consumo humano. En este proceso intervienen diversas etapas, la última de ellas es la filtración que tiene por objeto remover las partículas y microorganismos (sólidos suspendidos o turbiedad) que no se retuvieron en las etapas anteriores.

La operación de un filtro consta de dos etapas: ensuciamiento y lavado.

Durante el lavado de los filtros de la Planta Potabilizadora "Los Berros" se pierde grandes cantidades de arena (medio filtrante) y en ocasiones de grava (lecho soporte) que representan un incremento del costo de operación y disminuyen la eficiencia del proceso.

El estudio comprendió dos etapas, una fue conocer las condiciones reales de los filtros y la otra reproducir éstas en el laboratorio con el propósito de determinar las causas de la pérdida de arena y proponer soluciones.

2. RECOPIACION DE INFORMACION

La potabilización de agua tiene por finalidad producir en ella los cambios físicos, químicos y biológicos necesarios para acondicionarla al consumo humano. Por ello, las potabilizadoras pueden ser consideradas como fábricas que reciben una materia prima siempre cambiante, y que tienen que entregar un producto manufacturado (agua tratada) cuyas características físicas, químicas y bacteriológicas estén dentro de las normas aprobadas.

Las operaciones básicas en una planta potabilizadora de agua son:

- Coagulación
- Sedimentación
- Filtración
- Desinfección

Puesto que este trabajo trata sobre un problema específico a la filtración a continuación se expone en que consiste.

La filtración tiene por objeto remover las partículas y microorganismos que no fueron retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. Básicamente es un proceso fisicoquímico en el cual las partículas suspendidas del agua son eliminadas de ella, gracias a la acción de un empaque poroso. La retención se debe a su adhesión al medio filtrante o a otras partículas retenidas, o, simplemente, por cribado cuando el tamaño de las partículas es considerablemente menor que el tamaño promedio de poros del lecho.

La eficiencia del filtro, está determinada por las fuerzas superficiales de adhesión entre los granos del empaque y las partículas. Estas fuerzas son el resultado de la sobreposición de las capas eléctricas, las fuerzas de Van der Waals, de efectos químicos asociados con la hidratación de partículas y a la absorción de especies disueltas (Toregas, 1983).

Los filtros empleados para el tratamiento del agua se pueden clasificar de varias formas como se muestra en la (FIG 2.1).

En las plantas potabilizadoras de gran tamaño el tipo de filtro que más se usa es el rápido, con arena, flujo descendente y por gravedad. Se instalan en tanques rectangulares de concreto donde se coloca, sobre un sistema de drenaje, una capa de grava (10 a 30 cm) y otra de arena (60 a 1.20 cm). La selección del medio y de la tasa de operación se hace con base en la pérdida de carga. La máxima tasa con que puede trabajar un filtro está condicionada por la calidad del agua que entra y por el período de trabajo. La tasa óptima es aquella que proporciona la mejor calidad del efluente y la mínima cantidad de agua de lavado.

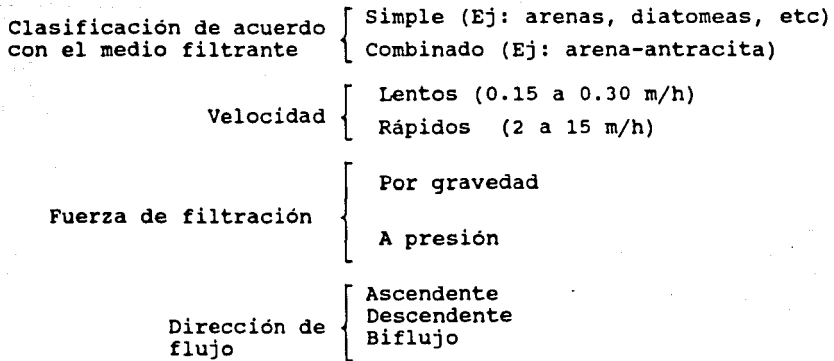


FIG. 2.1 Diferentes clasificaciones de los filtros para tratamiento del agua

Las principales partes que constituyen un filtro rápido son:

a) Lecho Filtrante.- El lecho filtrante es un material granular constituido comúnmente por arena, aunque también se emplea el cuarzo, la antracita o algún otro material triturado mecánicamente. La arena se obtiene de playas, lechos de ríos, bancos de arena o triturando cuarzo (Arboleda et al., 1969).

b) Lecho soporte.- Sirve de base para que el medio no penetre en los drenes y los obstruya. Comúnmente se emplea grava colocada de menor a mayor tamaño tomando como referencia el punto de contacto en el medio filtrante.

c) Sistema de distribución o bajo dren.- El objetivo del bajodren es repartir uniformemente el flujo al medio filtrante durante la operación de lavado.

d) Sistema de lavado.- Al cabo de cierto número de horas de servicio el filtro se obstruye y se necesita realizar un lavado. Para ello se introduce agua a presión por los drenes y se recolecta en la canaleta de lavado. El medio se expande y el material acumulado entre los granos sale. Terminado el lavado, que dura aproximadamente de 20-30 minutos, se vuelve a llenar el filtro y se reinicia la operación.

El lavado debe hacerse cada vez que la pérdida de carga en el filtro sea tal que iguale a la presión estática sobre el lecho o que la calidad del filtrado disminuya ("perforación" del filtro).

2.1 Criterios para evaluar la eficiencia del lavado

El mejor criterio para la eficiencia de lavado según Amirtharajah (1988), es la calidad del agua filtrada, ausencia de suciedad en los filtros y de formación de bolas de lodo. Sin embargo, es necesario operar un filtro durante largo tiempo para poder evaluar el lavado en esta forma.

Toregas (1983) propuso como una forma de medir la capacidad de recuperación o de desprendimiento de los sólidos durante el lavado del filtro los siguientes parámetros

a) Índice de recuperación de los depósitos en el filtro, R_{1j} .- Representa la eficiencia de remoción de sólidos durante el lavado. El índice de recuperación es función de la duración del lavado y de la velocidad de flujo su valor se obtiene mediante

$$R_{1j} = (\sigma_{1j}/\sigma_0) * 100 \quad (2.1)$$

donde

σ_0 : cantidad total de sólidos retenidos durante la filtración (depósito específico).

σ_{1j} : cantidad en g de los depósitos recuperados al lavar con un flujo F_j durante un tiempo (t_j).

El índice de recuperación depende de las fuerzas de adhesión de las partículas, la turbulencia del fluido y de las fuerzas de arrastre. Los depósitos que son fácilmente recuperados (es decir con bajas tasas de lavado) son aquellos cuya remoción se efectuó por simple cribado y basta con aplicar el tiempo suficiente para recuperar casi todos los sólidos retenidos. Velocidades por debajo de la fluidificación del lecho provocan índices de recuperación muy bajos. De hecho, los mejores índices de recuperación se obtienen con valores de velocidades inferiores a la de expansión del lecho pero superiores a los de la fluidificación.

b) Recuperación acumulada, R_0 .- La recuperación acumulada es la suma de los diferentes índices de recuperación obtenidos al incrementar sucesivamente la velocidad de lavado en un filtro

$$R_0 = \sum R_{1j} \quad (2.2)$$

Para seleccionar las condiciones de lavado apropiadas se debe, por una parte, determinar la duración de lavado que permita la salida total de sólidos desprendidos y, por otra, definir el flujo capaz de desprenderlos. Para un tiempo de lavado fijo el índice de recuperación depende de la tasa de lavado.

c) Velocidad de recuperación, r .- Se denomina así a la relación

entre el índice de recuperación del depósito obtenido y el incremento de la velocidad de flujo.

$$r = \frac{R_{1,2}}{F_1 - F_2} \quad (2.3)$$

donde

$R_{1,2}$: índice de recuperación obtenido al aumentar el gasto de lavado de F_1 a F_2 .

F_1 y F_2 : velocidades de flujo: en la cual $F_1 > F_2$.

d) Velocidad máxima de recuperación, r_{max} . - Es el máximo valor que alcanza la velocidad de recuperación en un lavado. Se obtiene a partir de la gráfica de la velocidad de recuperación contra la velocidad del agua de lavado (Toregas 1983).

2.2 Mecanismos de adhesión

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

Una vez efectuada la retención, las partículas están sujetas a dos tipos de fuerzas. La primera es de adhesión (F_A) y es la resultante de las fuerzas de largo alcance como la gravitacional (adhesión entre la partícula y la fase estacionaria). La segunda, se debe a factores hidrodinámicos que corresponden al esfuerzo cortante hidrodinámico promedio (F_D) y que actúa en la interfase de la fase móvil y estacionaria. La magnitud de estas fuerzas depende de varios factores como son el tamaño y la densidad de la suspensión, carga eléctrica de las especies (valencias químicas), concentración de iones en la fase móvil, constante dieléctrica del líquido y propiedades químicas de la superficie del empaque y de la suspensión. La FIG 2.2 representa el sistema de fuerzas que actúa en una partícula adherida. En general, sólo una fracción de las partículas que entran en colisión con el empaque son retenidas y adheridas a éste, ya que el flujo principal tiende a separarlas del medio.

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

Los índices de recuperación para cada una de estas condiciones se pueden usar para calcular el porcentaje de contribución de los tres

De acuerdo con Gregory (1972), el término perforación o "breakthrough" describe el cambio de posición de flóculos en el lecho y ocurre a la tasa normal de filtración. Se debe a que la deposición de los sólidos en los poros superiores ha sido completada y comienzan a llenarse los inferiores. En cambio, "Bridging" describe el aumento de los sólidos retenidos adentro de un poro y que se ocluye total o parcialmente. En estas condiciones el fuerte aumento de la presión local o del flujo hace que el "puente" se destruya y los sólidos atraviesen el filtro, efectuándose una disgregación del flóculo.

La limpieza de un filtro se puede efectuar de dos formas. La primera consiste en remover la capa superior del filtro en forma manual. Este método se emplea únicamente para filtros lentos donde las partículas no penetran al fondo del empaque. La segunda consiste en aplicar agua en sentido ascendente. Por costumbre y tomando en cuenta la operación de los filtros con flujo descendente, se denomina como retro-lavado aún cuando el término no sea muy adecuado. El lavado de un filtro debe remover los flóculos superficiales y también los encontrados a todo lo largo del lecho ya que en la filtración de alta tasa existe una mejor repartición de los sólidos (Gregory, 1971 y Cleasby y Arboleda, 1977). El proceso consta de dos etapas (Arboleda y Cleasby, 1979 y Toregas, 1983) :

a) Separación de los sólidos del medio filtrante, de otros flóculos o de ambos.

b) Transporte de los sólidos hacia la canaleta de lavado tanto de los desprendidos como de los que se encuentran sólo atrapados en la superficie del filtro o en los poros por cribado.

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

Las velocidades de aire y agua empleadas, así como sus combinaciones y el tipo de sistema de distribución seleccionado, deben producir, además de un lavado apropiado, los requerimientos de reacomodo del lecho, ya sea que se segregue o mezcle durante la limpieza del lecho (Gregory 1971).

El movimiento del empaque efectuado durante el retrolavado provoca que el medio primero se fluidifique y posteriormente se expanda, es decir, aumente la longitud del lecho. Los sólidos removidos son separados del medio ya sea por acción de la turbulencia, la fuerza de arrastre, o bien, por la abrasión mecánica entre los granos suspendidos (Toregas, 1983). Aparentemente, la acción de limpieza no parece aumentar a medida que se eleva la tasa de lavado una vez pasado el punto de fluidificación.

modelos de remoción (cribado, interacciones partícula-partícula, e interacciones medio filtrante-partícula).

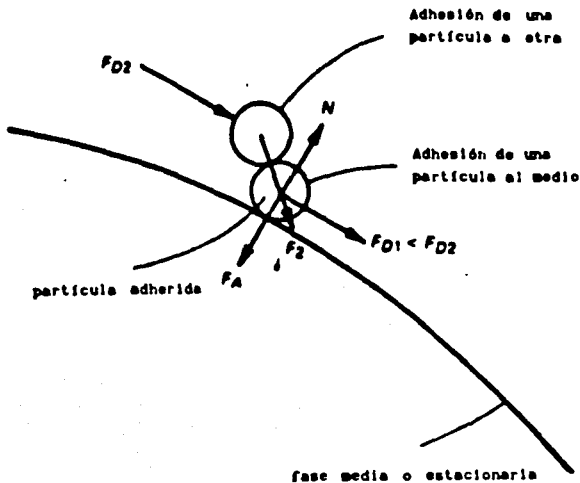


FIG 2.2 Sistema de fuerzas que actúan en una partícula adherida al medio, a otra partícula, o a ambos.

Toregas realizó un estudio experimental con filtros cuyos empaques eran de arena, vidrio y antracita. Empleó tres tamaños de granos (0.93, 0.64 y 0.35 mm) y dos tasas de filtración (9.7 y 19.4 m/h). El influente se preparó a partir de una mezcla de kaolinita (45 mg/l) con diferentes dosis de sulfato de aluminio para producir flóculos de tamaño entre 1 y 45 μm (velocidad de mezclado de 60 rpm durante 3 min). Los ensayos de filtración se realizaron a una velocidad constante hasta que se alcanzó una pérdida de carga de 1.2 m o la turbiedad efluente pasaba de 5 JTU. Cada tasa de lavado se aplicó durante 7 min colectando una muestra cada minuto para determinar su turbiedad. Posteriormente, se aumentó el gasto al siguiente valor deseado manteniéndolo 5 min hasta alcanzar una tasa equivalente al 50% de expansión. A partir de los datos obtenidos dedujo que para el medio con tamaño de 0.93 mm la contribución por cribado es de 4 al 14 % (5% en promedio). Para los medios con tamaño de 0.64 y 0.35 mm, de 4 a 28 % (12%, promedio) y de 35 a 72% (47% promedio), respectivamente. Esto es: a menor tamaño de medio la remoción por cribado aumenta. Así, puesto que para el medio de 0.35 mm el cribado es el principal

mecanismo de remoción, su lavado es más fácil.

Por otra parte, la contribución de la remoción por interacción sólido-medio resultó prácticamente constante, para todas las condiciones estudiadas e igual a 35%. La remoción por la interacción flóculo-flóculo es importante en la medida que la remoción no se efectúe por cribado. De tal forma que, puede llegar a tener un valor hasta del 65% (cuando no hay cribado) o ser sólo de 20% (cuando la remoción por cribado es de 45%). Sin embargo, para que la eficiencia de filtración sea buena se debe favorecer las interacción flóculo-flóculo para promover la remoción en profundidad aún cuando el lavado se complique.

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

La magnitud relativa de las fuerzas de adhesión se refleja en velocidades de recuperación de los depósitos diferentes. En el caso de partículas estabilizadas con coagulante la recuperación de los flóculos unidos a otros y la de los flóculos unidos al empaque ocurre prácticamente al mismo tiempo. Sin embargo, el depósito total recuperado durante el retrolavado a una tasa correspondiente al 10 y 50 % de expansión engloba a los flóculos retenidos por los dos tipos de mecanismo.

2.3 La abrasión como principal mecanismos de limpieza

Camp et al., (1971) sugirieron que el frotamiento entre granos es un factor de limpieza despreciable durante el lavado con agua ya que prácticamente toda la energía requerida sirve para suspender los granos. Amirtharajah (1978) se propuso analizar este problema basado en las siguientes aseveraciones (citadas por el mismo):

a) El coeficiente de fricción entre granos, C_D , tiende a un valor infinito cuando la separación entre granos esféricos tiende a cero, (Rowe, 1961).

b) Los contactos entre partículas fluidificadas no son observados por medio de rayos X (Murray, 1966)

c) En un lecho fluidificado no se observa cambios de velocidad asociados con las colisiones entre partículas (Buevich y Marlov, 1970)

Después de desarrollar un modelo, Amirtharajah, así como varios autores (TABLA 2.1) demostraron que la máxima turbulencia ocurre a

porosidades entre 0.65 y 0.70 y que las colisiones en un lecho fluidificado con esas condiciones son nulas.

TABLA 2.1 ESTUDIOS QUE DEMUESTRAN QUE LAS MEJORES CONDICIONES PARA LAVADO CON AGUA SE SITUAN A UNA POROSIDAD ENTRE 0.65 Y 0.70.

Método	Valor de la porosidad	Autor
A partir de las ecuaciones para la turbulencia de Taylor encontraron que tanto el mezclado como la difusión se describen por medio del número de $Pe = Ud/E$ Cuyo valor numérico corresponde a una difusividad máxima que se presenta cuando la porosidad es de 0.70.	0.70	Hanratty, Latinem y Wilhelm, (1956)
Mediante el estudio visual del mezclado axial y longitudinal - los autores encontraron que los remolinos de tamaño máximo se formaban cuando la porosidad era de 0.65 a 0.70.	0.65 a 0.70	Cairns y Prausnitz (1960)
La máxima transferencia de materia en un lecho fluidificado sucede cuando la porosidad es de 0.65 a 0.70.	0.65 a 0.70	Mc Cune y Wilhelm (1949)
El movimiento máximo de las partículas ocurre cuando la porosidad es de 0.70.	0.70	Mc Cune y Wilhelm (1949)
Desarrolla un modelo matemático para obtener el valor máximo - del esfuerzo cortante en un lecho fluidificado y, que, para que los medios comúnmente empleados en filtración, resulta entre 0.65 y 0.70.	0.65 a 0.70	Amirtharajah, (1970)

ADAPTADO DE: Amirtharajah (1978).

Desde el punto de vista teórico, Amirtarajah, 1972 demostró que varias de las propiedades hidrodinámicas tienen un valor máximo cuando la porosidad es aproximadamente de 0.7. Sin embargo, las propiedades a que hace referencia (turbulencia, transferencia de calor y de masa, y el mezclado) tienen una capacidad de eliminar los sólidos inferior al provocado por las colisiones entre partículas.

Además señala que, porosidades de 0.65 a 0.75 implican expansiones del orden de 100 % para medios uniformes y de 40 a 50 % para arena graduada con T.E. de 0.45 mm y C.U. = 1.58 (FIG 2.3).

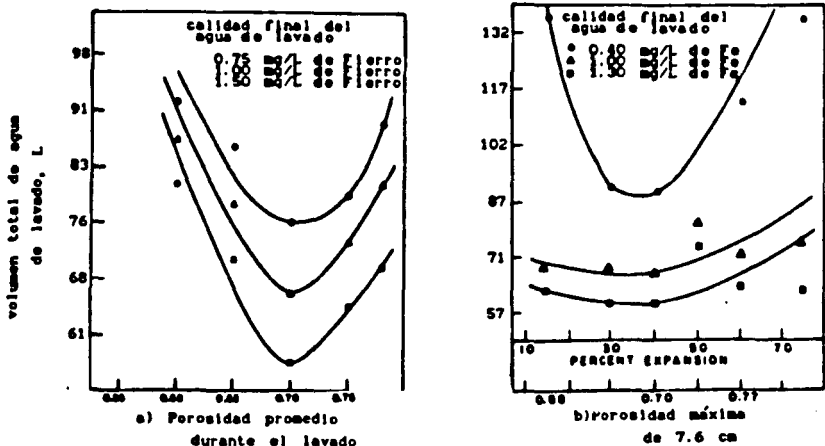


FIG 2.3 Volumen de agua para lavado en función de la expansión y la porosidad.

En la FIG 2.4 se muestra la variación del esfuerzo cortante en función de la porosidad. Debido a la forma de la curva se deduce que el situarse exactamente en el valor óptimo de lavado no es relevante ya que varía muy poco, sobretodo si se emplean porosidades ligeramente inferiores en un 10 a 20 %.

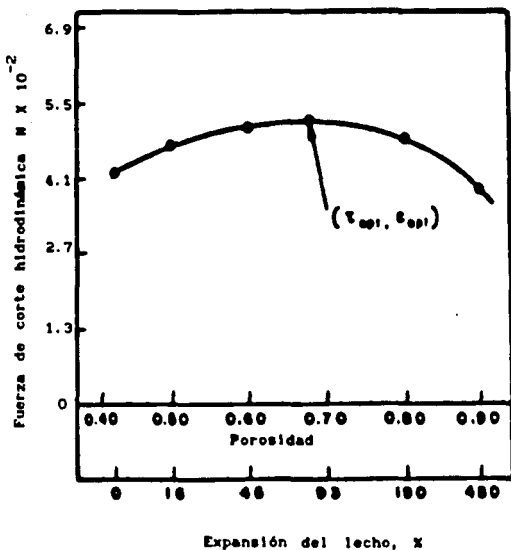


FIG 2.4 Esfuerzo cortante en función de la porosidad para medio uniforme.

Amirtharajah concluye que puesto que las colisiones entre las partículas son prácticamente inexistentes durante la fluidificación con agua y que a partir de la experimentación resulta que es este fenómeno el que más favorece la limpieza, cualquier mecanismo que las favorezca propiciará un lavado más eficiente. De ahí que el empleo de un lavado superficial como el desarrollado por Baylis o el uso de aire en Europa resulten eficaces. Siendo el segundo método más conveniente ya que propicia la abrasión entre todos los granos del medio y no sólo en la capa superficial (Amirtharajah, 1978).

Además, analiza que para la aplicación del aire existen las opciones siguientes:

- a) Aire solo seguido de un enjuague con una velocidad inferior a la fluidificación, escuela británica.
- b) Aire y agua simultáneos, escuela europea.

c) Aire solo seguido de agua a una velocidad de fluidificación, escuela americana.

De los cuales es el empleo de agua y aire juntos a velocidades inferiores a la de fluidificación el que causa la máxima abrasión entre las partículas y por tanto las mejores condiciones de lavado (Amirtharajah, 1978).

2.4 Métodos de lavado

Dependiendo de la velocidad de retrolavado usada en el lecho filtrante se puede tener (Arboleda y Cleasby, 1979):

a) Todos los granos fluidificados, como producto de una alta velocidad de retrolavado, situación típica en Estados Unidos. La velocidad de flujo se calcula de tal modo que sea capaz de iniciar la fluidificación de los granos más gruesos.

b) Granos finos fluidificados pero no los granos gruesos, a lo cual se le llama velocidad intermedia de retrolavado, practicada en El Reino Unido de La Gran Bretaña. El flujo de retrolavado se calcula para que la capa de la superficie se expanda un 20 % aunque el material pesado localizado en el fondo no se expanda. La limpieza auxiliar con aire siempre se usa antes del retrolavado con agua a velocidad intermedia.

c) Medio filtrante no fluidificado, esto se da cuando la velocidad de retrolavado es baja y se emplea en los países europeos. No hay expansión en las capas del fondo y muy poco en las capas superiores, por esta razón siempre se debe lavar con aire y agua simultáneamente.

En los tres métodos los gradientes de velocidad son relativamente pequeños, por lo tanto se necesita incrementar la eficiencia de retrolavado introduciendo sistemas auxiliares como rastrillos mecánicos, aire o lavado superficial.

2.4.1 Lavado con agua solamente.

Este método es el más antiguo y se aplica mucho en plantas potabilizadoras. El procedimiento consiste en suministrar una cantidad de agua suficiente para producir una expansión entre 20 y 50% (Cleasby et al., 1977), aunque se han encontrado valores desde 16 hasta 75 %. Si se utilizara la expansión óptima establecida con el criterio de Amirtharajah resultaría que las velocidades deberían aumentar en un 80 % a 100 % causando pérdidas del medio y desacomodo de la cama soporte empleando además una cantidad importante de agua. Por tanto, se aconseja tener una expansión inferior al 50 %, aunque el filtro casi siempre queda sucio y se forman aglomerados difíciles de eliminar.

En cuanto a los criterios de velocidad el intervalo oscila entre 19 y 60 m/h. Para medios entre 0.5 y 0.6 mm la velocidad es de 33 a 55 m/h con el señalamiento de que a velocidades bajas es conveniente auxiliarse con aire para el desprendimiento de sólidos y que a velocidades elevadas (alto grado de fluidificación) se

pierde el efecto de limpieza por falta de abrasión entre los granos.

Un factor importante de señalar es que el lavado con agua a altas velocidades hace que un medio simple se estratifique. Camp, 1971 lo demostró al colocar 15.5 kg de arena con tamaño entre las mallas U.S.A 18 y 30 (aperturas de 0.1 a 0.059cm). Fluidificó el lecho con agua sola a 64 m/h y 30°C y después del lavado se tomó muestras en la parte superior, media e inferior del lecho. Los resultados se muestran en la curva A de la FIG 2.5 y confirman que el tamaño de los granos localizados en la parte superior fue 23 % menor que los de la parte inferior.

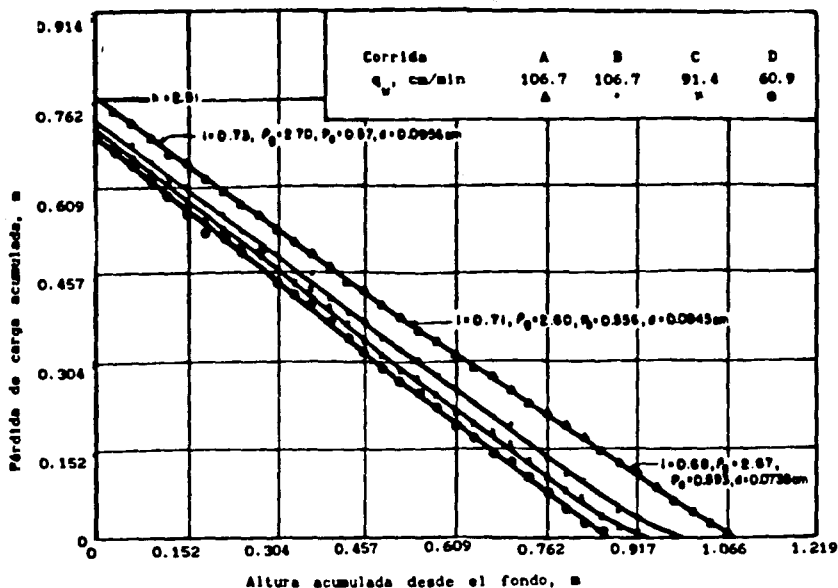


FIG 2.5 Lavado de arena con agua a 30°C.

2.4.1.1 Lavado con agua en medios mixtos.

El lavado con solo agua se recomienda para medios múltiples puesto que se desea mantener la estratificación. Sin embargo, los medios empleados deben ser tales que la capa superior del medio inicie su fluidificación a una velocidad igual o ligeramente superior que

las capas más bajas del medio. Esto se puede determinar en forma experimental o a partir del modelo de Woods.

2.4.2 Lavado con aire

La técnica de lavado basada en el empleo de aire y agua se adoptó desde el inicio de la década de los sesenta. Para medios simples se provoca un intermezclado que es benéfico para la filtración pero que requiere un enjuague a una velocidad menor que la de fluidificación para sacar las burbujas de aire retenidas. En cambio, si se aplica en lechos combinados se provoca el mezclado de los medios por lo que el enjuague debe ser a velocidad de fluidificación para estratificar. En ambos casos, el aire provoca la fricción entre granos debido a que el lecho no se encuentra expandido.

El principio de lavado con agua se basa en que la tasa de agua empleada hace que la fluidificación sea del tipo particular que como proceso de limpieza es deficiente. Por ello, se utiliza aire como sistema auxiliar para causar la abrasión entre los granos del medio y en la superficie del filtro (Amirtharajah 1978).

Este procedimiento puede ser muy efectivo para desbaratar aglomerados. En la boquilla el tamaño de las burbujas es de 0.6 mm y crece hasta 12 mm al final del filtro. La velocidad de ascensión de las burbujas es de 731 m/h (Camp, 1971).

Existen dos opciones para el lavado con aire: agua y aire simultáneos y lavado previo con aire.

2.4.2.1 Lavado previo con aire

El uso de aire solo en un lecho con agua causa la compactación del medio. El aire sirve de gran ayuda para desprender los sólidos adheridos a los granos pero dificulta su salida del lecho por la compactación.

Para el lavado, se baja el nivel del agua en el filtro hasta unos centímetros por debajo del medio y se hace circular aire a presión a una velocidad señalada en la literatura entre 16 a 90 m/h. Una vez que se han aflojado los sólidos (3 a 10 min) se introduce agua a una velocidad de 12 a 55 m/h (0.2 a 0.917 m/min) con el objeto de expandir ligeramente el lecho y sacar los sólidos del filtro. Los intervalos más comunes para el aire son de 15 a 30 m/h y agua de 12 a 18 m/h.

Otro método consiste de introducir agua hasta obtener una expansión del 10 al 15%. Posteriormente, se inyecta aire a razón de 15 a 36 m/h por un lapso de 2 a 3 min. Se suspende el flujo de aire y se aumenta la velocidad de agua hasta 36 o 46 m/h. Una derivación del método anterior, que es especial para arena fina, consiste en bajar el nivel del agua unos centímetros por debajo del nivel del medio filtrante, e introducir aire entre 15 a 36 m/h

durante 3 a 5 min y posteriormente agua de 18 a 36 m/h hasta que el agua alcance el nivel de las canaletas de lavado, momento en el cual, se suspende la introducción de aire para evitar la pérdida de arena.

2.4.2.2 Lavado con aire y agua simultáneos.

El método de lavado con agua y aire simultáneos ha sido desarrollado básicamente por los europeos y se ha adoptado en otros países debido a su buen rendimiento. Consiste en introducir aire y agua al mismo tiempo. La velocidad del agua oscila entre 10 y 40 m/h y la del aire de 20 a 146 m/h. La duración es variable entre 2 y 10 minutos, siendo los más usuales de 3 a 5 min. En una segunda etapa, se introduce sólo agua con el objeto de sacar los sólidos desprendidos así como las burbujas de aire atrapadas en el medio. De acuerdo con Amirtharajah, 1978 y 1984, aire y agua simultáneamente a 54 - 90 m/h y 15 - 19.6 m/h respectivamente proporcionan la mejor limpieza para sólidos con una elevada fuerza de adhesión. Tanto el aire como el agua deben introducirse en forma progresiva hasta alcanzar la tasa deseada.

Camp, 1971, demostró que tanto la pérdida de carga como la expansión son menores cuando se emplea agua y aire combinados que cuando se emplea el agua sola. Esto se debe a la reducción de la densidad efectiva del fluido de lavado (aire + agua) que aumenta el peso de los granos en él.

En el caso de emplear este método con los medios mixtos se tiene el peligro de perder el medio con el agua y aire por lo que necesitan una fluidificación con solo agua al término del lavado para restratificar el lecho (Amirtharajah 1978 y Gregory, 1971).

2.4.3 Métodos auxiliares de lavado.

En los primeros años que se empleó la fluidificación con bajas tasas de lavado que no proporcionaban la expansión suficiente para sacar los sólidos del lecho por lo que se optó por colocar rastras mecánicas, o introducir aire. Sin embargo, estos métodos al emplear bajas tasas de enjuague, generaron la formación de aglomerados, taponaron los sistemas de distribución y el desacomodo de la grava. Como resultado el uso de aire fue abandonado en Los Estados Unidos alrededor de 1900 (Arboleda y Cleasby, 1979).

En 1924 Hulbert y Herring definieron a partir de su experiencia que una expansión del 50 % con sólo agua es suficiente para un buen lavado. Pero tanto Hudson como Baylis señalaron que aún empleando las elevadas tasas correspondientes los aglomerados formados no son eliminados e introdujeron la idea de emplear sistemas superficiales de lavado en la década de 1930. (Amirtharajah, 1978). Así, se concluyó que el lavado superficial o las rastras mecánicas sólo funcionan eficientemente para tasas altas de lavado, dejando abandonado el uso del aire.

Se aplicó entonces pulsaciones o vibraciones durante el lavado pero con el tiempo se observó que es de poca ayuda ya que el lecho se compactaba (Gregory, 1972).

Así, en la actualidad se consideró que, el aire es el mejor método auxiliar y se puede emplear en los tres casos de velocidades de agua con buenos resultados pero se debe tener en cuenta que es posible perder el medio.

2.4.3.1 Torniquetes hidráulicos.

Son torniquetes colocados en la parte superior del filtro. El lavado comienza con la introducción de agua a contracorriente para obtener una expansión del medio filtrante del 20 al 40 %. Después, se hace que los brazos del torniquete empiecen a girar (por la introducción del agua) manteniéndolos en movimiento por un mínimo de 3 min.

Este lavado se emplea mucho en Estados Unidos. Cleasby et al., 1975 recomiendan mantener los torniquetes en operación durante todo el lavado y que se haga la fluidificación completa del medio. Adicionalmente, señalan que para medios múltiples se pueden colocar torniquetes en cada una de las interfases.

2.4.3.2 Lavado superficial.

El lavado típico americano se complementa con lavado superficial, el cual se hace por medio de unos brazos giratorios o estáticos que inyectan agua sobre la superficie del medio filtrante, a razón de 4.5-16.8 m/h con presión no inferior a 5.9 m (Arboleda, 1969).

Los sistemas de lavado de la superficie pueden instalarse en casi todos los filtros. Empleándolos, se puede reducir la cantidad total de agua de lavado que se requiere para el lavado ordinario.

En la TABLA 2.2 se presenta un resumen de los intervalos señalados en la literatura para los diferentes métodos de lavado.

TABLA 2.2 INTERVALOS DE LAVADO SEÑALADOS EN LA LITERATURA

METODO	Velocidad del agua m/h	Velocidad del aire m/h	Duración min
Sólo agua	19 - 60		
Aire seguido de agua	12 - 55	15 - 90	2 - 10
Aire y agua simultáneos	10 - 40	20 - 146	3 - 5

2.4.4. Comparación entre los métodos de lavado

Cleasby et al., 1975 señalan que la mejor forma de comprobar que método de lavado es más eficaz, consiste en efectuar el estudio sobre un efluente de tipo biológico ya que los sólidos involucrados son muy difíciles de remover. Los autores desarrollaron una comparación entre tres tipos de lavado con un efluente biológico:

- a) Lavado con agua a 48.6 m/h durante 5 min
- b) Lavado con agua a 48.6 m/h y 73.2 m/h de aire durante 5 min
- c) Lavado con introducción superficial de agua a 276 kN/m² a 345 kN/m² (40 a 50 psig) durante dos minutos antes de introducir agua a 48.6 m/h durante 3 min.

Los resultados se muestran en la TABLA 2.3.

TABLA 2.3 COMPARACION ENTRE LOS METODOS DE LAVADO

PARAMETRO	TIPO DE LAVADO		
	AGUA SOLA	AGUA Y AIRE COMBINADOS	AGUA CON TORNQUETES
Prueba de abrasión ml/g (antes del lavado)	33.7	9.0	11.3
Número de ciclos de lavado	5	3	2
SS desprendidos en el último ciclo g/m ²	72	18	28
Cantidad total de sólidos desprendi- dos	883	161	228
Prueba de abrasión después del lavado ml/g	15.3	1.9	2.9

FUENTE: Cleasby et al., 1975

Las conclusiones obtenidas del estudio fueron las siguientes:

- 1) El peor método resultó ser el que sólo emplea agua ya que se forman aglomerados dentro del medio y en las paredes del filtro. Además, se forman grietas en el medio.

2) A pesar de que los lavados con introducción auxiliar de agua en la superficie y él que emplea agua y aire simultáneos son comparables, es él de agua y aire el que presenta mejores resultados. Aunque para la adaptación de las plantas existentes en los Estados Unidos los autores recomiendan el de lavado auxiliar superficial.

3) En cualquier caso, se establece que como mínimo se expanda el lecho un 25 % para permitir la salida de los sólidos.

2.5 Factores que influyen sobre el rendimiento del lavado.

2.5.1 Adición de reactivos.

La adición del sulfato de aluminio conduce a la formación de flóculos de tamaño diferente que son función de la cantidad de floculante añadido. En la TABLA 2.4 se presenta esta relación. La fuerza de adhesión, que de hecho también determina el rendimiento de limpieza, depende de la cantidad de reactivos químicos que se hayan añadido al agua. Los reactivos tienen el efecto de disminuir el potencial Zeta de los sólidos en suspensión haciendo que las fuerzas de repulsión entre ellas disminuyan. La densidad de los aglomerados es función de la cantidad de sustancias químicas que se agregan y en concentraciones iguales un aglomerado de mayor tamaño contiene una mayor cantidad de agua disminuyendo su densidad y siendo más fácil sacarlo durante el lavado.

TABLA 2.4 MEDIA Y DESVIACION ESTANDAR DEL TAMAÑO DE PARTICULA (FLOCULO), POTENCIAL ZETA, FLUX DE LA PARTICULA Y pH PARA CADA DOSIS DE ALUMINA.

Dosis de alúmina mg/L	Tamaño de partícula μ m		Potencial Zeta mV		Flux 10^6 part/cm ² s	Unidades de pH		Temperatura °C	
	Media	Desviación Estandar	Media	Desviación Estandar		*Media	Desviación Estandar	Media	Desviación Estandar
0	1	0.2	-28	0.2	2.34 x 10 ⁶	6.6	0.22	20	0.2
21	21	0.3	-22.2	0.26	2.5	7.38	0.28	20.6	0.22
31.5	28	0.52	-7.7	0.17	1.06	7.53	0.20	20.6	0.18
38	32	0.32	0	0	0.7	6.22	0.20	20.2	0.2
45	21	0.65	+7.7	0.23	2.5	6.45	0.18	20.3	0.2

* el intervalo de pH que se usó es de 6 a 8
FUENTE: Toregas, 1983

La TABLA 2.5 muestra la influencia del potencial Z y del tamaño sobre la fuerza de unión del aglomerado así como la variación de ambos en función de rmax. Mientras que el potencial Z crece (de -28 a 0 mV) el rmax aumenta y por consiguiente la fuerza de adhesión de un aglomerado decrece. Cuando el potencial Z sobrepasa el valor de 0 mV la magnitud de la fuerza de adhesión aumenta (rmax disminuye). Esto sorprende, ya que se pudiera esperar que a medida de que el potencial Z aumenta la adhesión disminuye debido a que las partículas están más juntas y se pierde el efecto del tamaño. La magnitud de las fuerzas correspondientes a los diferentes potenciales Z es prácticamente la misma para

aglomerados de igual tamaño. Siendo así lo que más afecta para la adhesión es el tamaño de los aglomerados que a su vez depende de la mezcla, la cual provoca que dos aglomerados entren en contacto y puedan ser atraídos entre sí (Toregas 1983).

El efecto de las dosis de alúmina en el índice de recuperación es importante para los valores obtenidos hasta el 10 % de expansión, después de este valor el efecto es mínimo (Toregas, 1983).

Los datos de la TABLA 2.5 demuestran que los valores promedio de r_{max} y de F_0 para el influente sin sulfato de aluminio con la arena y el vidrio son de 1.6 h/m y 4.4 h/m respectivamente. Estos valores reflejan los valores requeridos del esfuerzo cortante para deshacer los aglomerados formados.

Cuando dp/dm es $> 55 \times 10^{-3}$ el mecanismo de remoción dominante es el cribado, Para valores de 40 a 55×10^{-3} el cribado es significativo y para valores superiores puede ser despreciable.

Las fuerzas de adhesión para la formación de aglomerados dependen más del tamaño que del potencial Z, probablemente debido a que tienen una mayor oportunidad de entrar en contacto durante una colisión provocada por el mezclado.

TABLA 2.5 VELOCIDADES DE RECUPERACION MAXIMA Y TASAS DE LAVADO CORRESPONDIENTES PARA VARIAS CONDICIONES DE FILTRACION - MEDIO DE 0.93 mm.

Dosis mg/l	P.Z mV	R.T $\times 10^{-3}$	Tasa de filtración m/h	Flux $\times 10^3$	r_{max} h/m	F_0 h/m
ARENA						
0	-28	1.07	9.7	2.34	1.5	4.4
			19.4	4.68	1.4	4.4
21	-22.2	22.6	9.7	2.5	2.3	1.4
			19.4	5	1.9	1.4
31.5	- 7.7	30.1	9.7	1.06	3.8	1.2
			19.4	2.12	3.9	1.2
38	0	34.4	9.7	0.7	5.1	0.9
			19.4	1.4	5.1	0.9
45	+ 7.7	22.6	9.7	2.5	2.7	1.4
			19.4	5	2.3	1.4
VIDRIO						
0	-28	1.07	9.7	2.34	1.7	4.4
			19.4	4.68	1.6	4.4
21	-22.2	22.6	9.7	2.5	2.7	1.3
			19.4	5	2.3	1.3
31.5	- 7.7	30.1	9.7	1.06	3.5	1.1
			19.4	2.12	3.7	1.1
38	0	34.4	9.7	0.7	4.9	0.9
			19.4	1.4	5.0	0.9
45	+ 7.7	22.6	9.7	2.5	2.5	1.3
			19.4	5	2.2	1.3
ANTRACITA						
0	-28	1.07	9.7	2.34	3.5	2.3
			19.4	4.68	3.1	2.3
21	-22.2	22.6	9.7	2.5	4.3	0.8
			19.4	5	4.4	0.8
31.5	- 7.7	30.1	9.7	1.06	6.1	0.6
			19.4	2.12	6.8	0.6
38	0	34.4	9.7	0.7	7.8	0.4
			19.4	1.4	8.2	0.4
45	+ 7.7	22.6	9.7	2.5	0.2	0.8
			19.4	5	4.5	0.8

Dosis : Dosis de alúmina
P.Z : Potencial Z de la partícula
R.T : Relación del tamaño partícula-medio
Flux : Número de partículas/cm² s
 r_{max} : Tasa de recuperación máxima
 F_0 : Tasa de lavado correspondiente

FUENTE: Toregas, 1983.

2.5.2 Características del medio filtrante.

El medio filtrante debe ser tal que:

a) Desde el punto de vista de filtración

- Detenga los flóculos con poca compresión para facilitar el lavado y evitar la formación de aglomerados de lodo.
- Retenga el mayor volumen posible de flóculos sin obstruirse.

b) Para el lavado, es recomendable que

- Se limpie fácilmente y quede libre de flóculos.
- Permita el paso del agua con suficiente velocidad para quitar los sedimentos sin perder arena.
- Tenga una densidad mayor que los sólidos retenidos, de tal modo, que no se pierda al fluidificar durante el lavado.

En la práctica se debe lograr un compromiso entre estos requisitos, en especial, en lo que se refiere al tamaño de la arena.

2.5.2.1 Tipo de medio

Las gráficas de velocidad de recuperación contra velocidad de flujo de lavado para los tres tipos de medio (arena, vidrio y antracita), que se presentan en las FIG 2.6 y 2.7, indican que la variación de la velocidad de recuperación en función de la velocidad empleada para el lavado se aproxima a una distribución Chi cuadrada.

Los valores correspondientes a la tasa máxima, r_{max} , y a F_0 se presentan en la TABLA 2.5, donde se observa que el valor de r_{max} aumenta a medida que la dosis de aluminio aumenta hasta cierto punto, a partir del cual decrece. Tanto para la arena como para el vidrio los valores promedio de r_{max} y de F_0 son comparables. Sin embargo, para la antracita, el valor de r_{max} es del doble, debido principalmente a la diferente densidad que hace que, para una misma tasa de lavado, el medio sufra expansiones mayores (la antracita tiene una densidad de 1.4 comparada con la arena y la del vidrio que es de 2.65 mg/l).

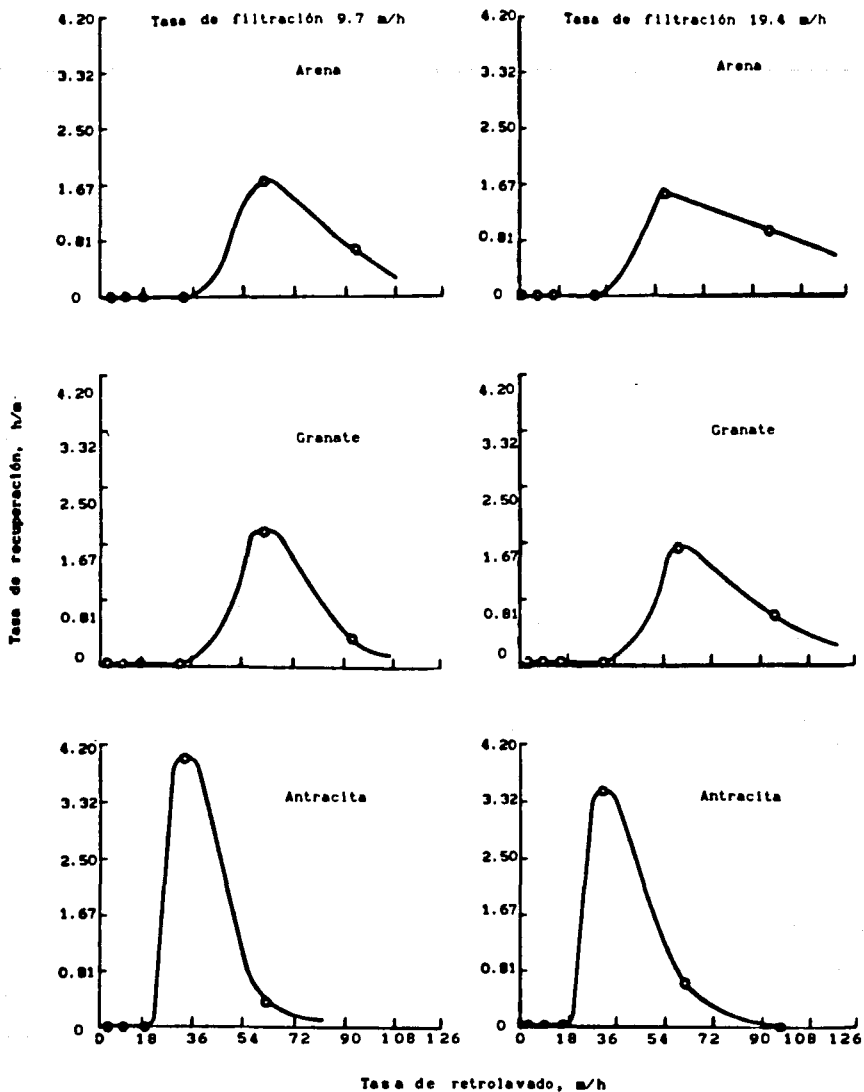


FIG 2.6 Tasa de recuperación en función de la velocidad de lavado para sólidos sin coagulante y medio filtrante de tamaño igual a 0.93 mm.

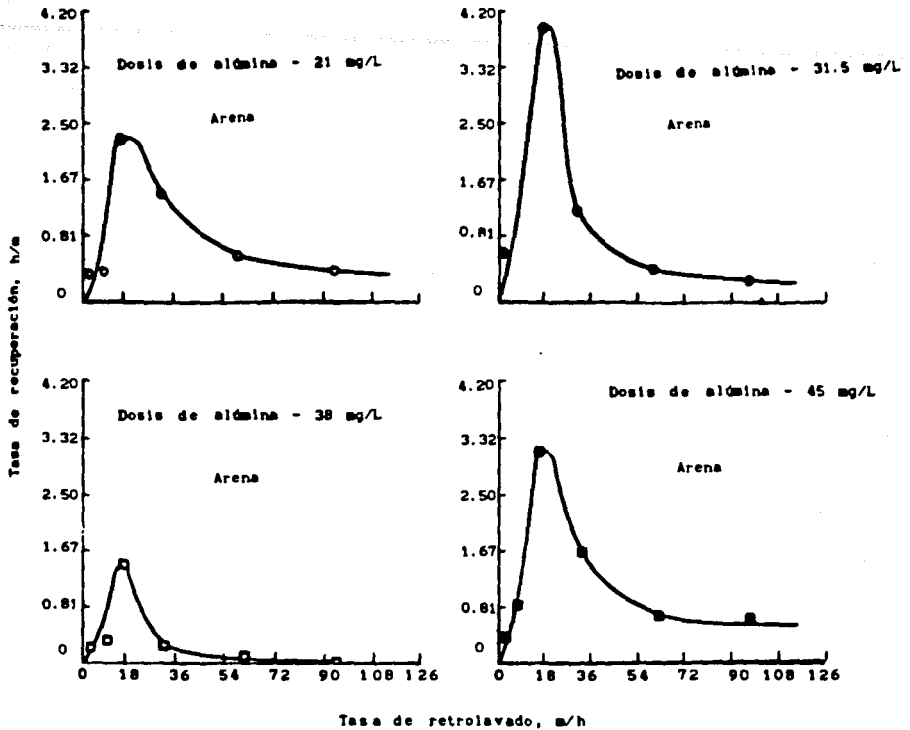


FIG 2.7 Tasa de recuperación en función de la velocidad de lavado para partículas con coagulante.

2.5.2.2 Tamaño, densidad y forma.

El medio filtrante debe ser seleccionado en tal forma que su tamaño y densidad favorezcan que las fuerzas de fricción ejercidas durante el lavado conduzcan a una limpieza adecuada. Desde este punto de vista, los granos no deben ser muy grandes como para requerir una tasa de lavado muy alta y el espesor del lecho tampoco debe ser importante, pues dificulta la salida de los sólidos.

La esfericidad o angularidad del medio tiene fuerte influencia sobre la pérdida de carga del lecho fijo, la velocidad mínima de fluidificación y el comportamiento del medio (Dharmarajah y Cleasby, 1986), siendo más difícil fluidificar partículas irregulares.

Camp et al, 1971, realizaron experimentos donde se muestra que el tamaño tiene mayor influencia que la densidad en el comportamiento del medio durante el lavado. Se colocaron cuatro partículas de carbón de densidad de 1.64 g/ml y tamaños de 0.15, 0.30, 0.50 y 2.16 cm en la parte superior de un medio de 0.64 cm compuesto de arena y granate mezclados. Se fluidificó el lecho con agua a 63 m/h hasta una altura de 1.06 m. La partícula más grande sedimentó dentro del lecho en tanto que las otras permanecieron en la superficie, adheridas a las burbujas de aire. Se redujo, entonces, la tasa a 51.7 m/h, la expansión a 1.02 m y la partícula más grande se elevó a la superficie del agua.

2.5.3 Duración del lavado

Durante el lavado, la turbiedad del agua que sale disminuye progresivamente. Un lavado completo implicaría la salida del agua sin turbiedad. Sin embargo, se considera que, desde el punto de vista económico, una turbiedad de salida de 75 UTN es conveniente (Beaudry, 1984).

La experimentación mostró que el tiempo de lavado óptimo es de 5 min, tiempos superiores se traducen en un aumento despreciable de los sólidos recuperados (Toregas 1983).

2.5.4 Gradiente de velocidad

Fair y Geyer (1954) propusieron la siguiente ecuación para valuar el efecto de limpieza por abrasión en un filtro

$$G = \left[\frac{g}{\nu} (\gamma_s - 1) (1 - \epsilon) V_s \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

donde

G : gradiente de velocidad

γ_s : peso específico de los granos del empaque

ϵ : porosidad

V_s : velocidad de sedimentación en caída libre de los granos del empaque

ν : viscosidad cinemática

g : aceleración debida a la gravedad

Sin embargo no pudieron darle ninguna interpretación física por lo que Arboleda y Cleasby, (1979) desarrollaron la siguiente teoría.

La expansión del lecho producida por el flujo, E, es función de la relación entre la porosidad inicial, ϵ_0 , y la porosidad expandida, ϵ ,

$$E = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{1 - \epsilon} \quad (2.5)$$

La fricción en el lecho produce una disipación de energía (Pr) que por unidad de área es igual a la fuerza de arrastre F_D , multiplicada por la velocidad intersticial, u/ϵ , dividida por el volumen total ocupado por el lecho durante el lavado. Esto es

$$Pr = \frac{F_D}{V_E} \left(\frac{u}{\epsilon} \right) \quad (2.6)$$

donde

F_D : fuerza de arrastre
 u : velocidad en columna vacía
 V_E : volumen del lecho expandido

En el equilibrio dinámico, F_D representa la fuerza capaz de suspender los granos y por tanto es igual al peso de éstos en el líquido (W)

$$F_D = W = (\rho_s - \rho) V (1 - \epsilon) g \quad (2.7)$$

donde

$\rho_s - \rho$: diferencia entre la densidad de los granos del empaque ρ_s y la densidad del agua
 $V(1 - \epsilon)$: volumen ocupado por los granos y que es constante aún después de la expansión del lecho. De ello,

$$V(1 - \epsilon) = V_0(1 - \epsilon_0) \quad (2.8)$$

donde

V_0 : volumen inicial

Al combinar las Ec 2.5, 2.6 y 2.7 y reordenar se tiene

$$Pr = \rho (\gamma_s - 1) (1 - \epsilon) g \frac{u}{\epsilon} \quad (2.9)$$

Con

$$\gamma_s = \rho_s / \rho \quad (2.10)$$

En la Ec. 2.9 el término $(\gamma_s - 1) (1 - \epsilon)$ es la pérdida de carga por unidad de longitud obtenida al lavar, es decir, es dh/dL por tanto

$$Pr = \frac{dh}{dL} \rho g \frac{u}{\epsilon} \quad (2.11)$$

Teóricamente, la energía P_r se puede disipar de las siguientes maneras:

- a) Como un esfuerzo cortante que separe la película del grano
- b) Como colisiones elásticas entre granos
- c) Como un aumento de temperatura del agua
- d) Como sonido

Sin embargo, no se ha observado ni un aumento de temperatura ni se ha escuchado ruido que implicara las colisiones. De hecho se supone que durante el lavado cada grano está rodeado de una capa de agua que actúa como lubricante y favorece la rotación sin que exista contacto y fricción entre ellos.

Si se desprecia la pérdida de energía por calor o colisiones elásticas, puesto que prácticamente no existen durante el lavado con sólo agua, la eficiencia del proceso se puede obtener estimando la fuerza de arrastre viscoso causada por el flujo sobre los granos, de acuerdo con su tamaño y peso específico, puesto que son los parámetros que se consideran como únicos responsables de la acción de limpieza.

El arrastre viscoso se puede expresar en términos del gradiente de velocidad o del esfuerzo cortante. El gradiente se puede obtener sustituyendo en la ecuación de disipación de la energía de Camp y Stein, el valor de P_r de la ec 2.9

$$G = \left(\frac{P_r}{\mu} \right)^{1/2} = \left[g(\gamma_s - 1) \frac{(1 - \epsilon)}{c} \nu \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

$$G = \left[K_1 \frac{1 - \epsilon}{c} \nu \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

donde

μ : viscosidad absoluta

K_1 : $g(s_s - 1)$

Por su parte, el esfuerzo cortante se puede obtener de la definición que dice que esta fuerza es igual al producto de la viscosidad dinámica por el gradiente de velocidad (ó tasa de deformación del fluido), ésto es

$$\tau = \mu \frac{du}{dl} = \mu G \quad (2.14)$$

o bien,

$$\tau = \left[\mu g \rho \frac{u}{c} \frac{dh}{dl} \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

donde

dh/dl: gradiente hidráulico

La relación entre c y u se puede calcular con el modelo de expansión de Woods (1973), también presentado por Cleasby y Bauman (1977). Ambas investigaciones siguieron el modelo de Richardson y Zaki (1954), y propusieron un modelo para predecir la expansión de filtros de granos no esféricos.

$$c^n = \frac{u}{u_1} \quad (2.16)$$

donde u_1 es la velocidad de intercepción o velocidad superficial del fluido cuando la porosidad es de 1 y se obtiene por extrapolación de la curva del $\log u$ contra $\log c$ donde n es la pendiente de la curva.

El número de Reynolds se definió en términos de u_1 , como:

$$Re = \frac{d * u_1}{\nu} \quad (2.17)$$

donde

d : diámetro del grano

Al sustituir en la Ec 2.17 para u_1 y reemplazando u_1 en la Ec 2.16

$$c = \left[\frac{u d}{\nu Re} \right]^{1/n} \quad (2.18)$$

Sustituyendo esta expresión en la Ec 2.12 el gradiente de velocidad se puede calcular como

$$G = \left[K_1 u \left\{ 1 - \left(\frac{u d}{\nu Re} \right)^{1/n} \right\} * \left(\frac{u d}{\nu Re} \right)^{-1/n} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

En la expresión anterior falta por determinar los valores del número de Reynolds y del coeficiente de expansión, n , para granos de diámetro d y densidad dada.

Cleasby y Baumann (1977) presentaron una relación empírica para obtener el número de Reynolds a partir del número de Galileo

$$Re = K Ga^x \quad (2.20)$$

donde K y x son constantes empíricas con valores diferentes para cada material (p.e. arena, antracita, grava) y Ga es el número de Galileo que se calcula de la siguiente forma

$$Ga = \frac{d^3(\rho_s - \rho) g}{\mu^2} \quad (2.21)$$

Este número es adimensional y no depende ni de la velocidad de sedimentación ni de la de intercepción de los granos.

También el valor de n ha sido relacionando empíricamente con el número de Reynolds, calculado con la Ec 2.19, por medio de

$$n = CR_e^z \quad (2.22)$$

donde C y z son constantes empíricas que dependen del material granular involucrado.

Amirtharajah (1971) encontró que la porosidad óptima c_m , ocurre cuando el esfuerzo cortante es máximo y se obtiene por

$$c_m = \frac{n-1}{n} \quad (2.23)$$

Al sustituir la Ec (2.12) en la Ec (2.23) el gradiente de velocidad óptimo para el lavado, G_m , es

$$G_m = \left[\frac{g}{\nu} (\gamma_s - 1) \frac{c_m}{n-1} \right]^{1/2} = \left[K_1 \frac{c_m}{n-1} \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

La velocidad óptima de retrolavado u_m para diferentes tamaños de grano podrá calcularse con la ecuación siguiente que es una combinación de (2.16), (2.17) y (2.23)

$$u_m = \frac{\nu Re}{d} \left(\frac{n-1}{n} \right) n \quad (2.25)$$

Y el gradiente óptimo mediante

$$G_{\text{opt}} = \left[K_1 \frac{\nu R e}{d(n-1)} \left(\frac{n-1}{n} \right)^n \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

Usando la Ec 2.19 para partículas de diferente tamaño y densidad en combinación con el modelo de expansión de Woods, se obtiene una serie de curvas que ilustran el comportamiento de lechos granulares durante el proceso de retrolavado, como se observa en la FIG 2.8.

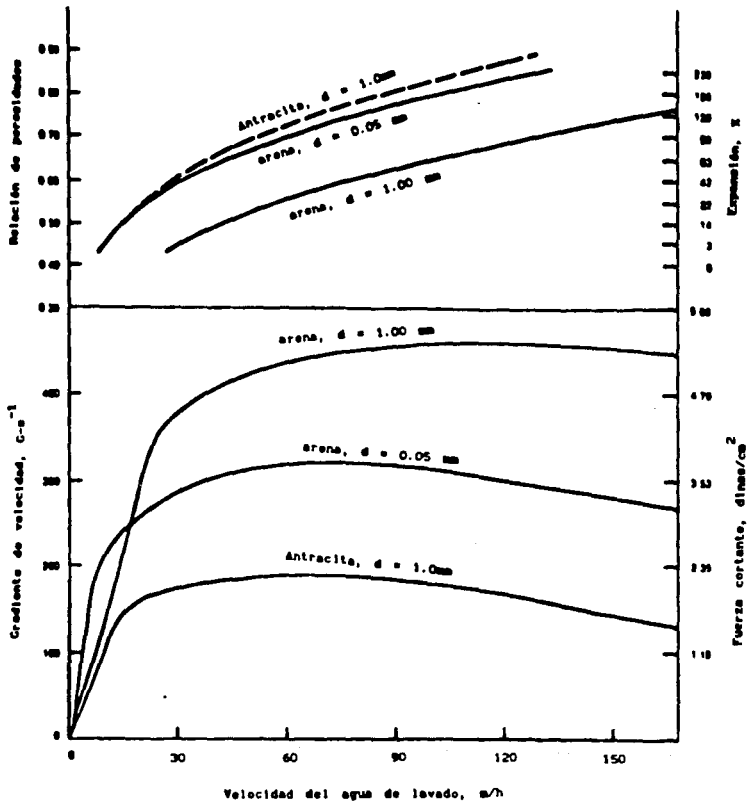


FIG 2. 8 Gradiente de velocidad y porosidades para arena con peso específico de 2.65 y antracita de 1.65 para diferentes tasas de lavado con agua a 14°C

De estas curvas se puede concluir lo siguiente:

- a) El gradiente de velocidad (o la fuerza de fricción) que se produce sobre un grano para remover la película adherida se incrementa proporcionalmente con el peso específico y al tamaño de éste. En efecto, para la misma tasa de lavado, por ejemplo, 60 m/h el gradiente hidráulico producido será 36 % más grande en una arena de 1.0 mm que en una de 0.5. Esto confirma que es más fácil lavar la arena gruesa que la arena fina.
- b) Las partículas de antracita, que son más ligeras que la arena, producen un gradiente menor a 60 m/h. Por ejemplo, es 42% menor que la arena (tamaños de 1 mm), y 55 % menor para granos de 0.55 mm.
- c) El empleo del gradiente óptimo de lavado es prácticamente imposible desde el punto de vista económico ya que implica tasas muy elevadas (TABLA 2.6).

TABLA 2.6 VELOCIDADES OPTIMAS DE LAVADO.

Medio	Tamaño mm	Temperatura °C	Tasa m/h
arena	0.5	14	80.4
arena	1.0	14	126.0
antracita	1.0	14	63.6
antracita	2.0	14	111.0

d) Generalmente los gradientes de velocidad producidos durante el lavado son bajos. Para arena gruesa los gradientes de velocidad son alrededor de 400 s^{-1} y para arena fina alrededor de 300 s^{-1} . Mientras que para la antracita varían entre 150 y 300 s^{-1} . Como referencia se señala que para la floculación se emplean generalmente gradientes de 80 s^{-1} y que es suficiente para formar un flóculo que no se desintegre incluso a 100 s^{-1} . Esto indica que los gradientes producidos durante el lavado pueden ser insuficientes para remover los flóculos adheridos al filtro, necesiándose métodos auxiliares de lavado (p.e. introducción de aire).

En la FIG 2.9 se presentan curvas trazadas para relacionar el gradiente de velocidad G , la tasa de expansión E para diferentes temperaturas (de 1 a 30°C). Esta figura muestra que la expansión del lecho disminuye al aumentar la temperatura del agua. Pero ello no implica que la eficiencia del lavado disminuya, ya que el gradiente de velocidad también aumenta. Por ejemplo, en la FIG 2.12 para una arena de 0.5 mm lavada con agua a 36 m/h y 5°C , G es de 324 s^{-1} en lugar de 241 s^{-1} a 5°C , pero la expansión disminuye a 0.44. En consecuencia existe una disminución de 5.5 unidades en el gradiente de velocidad por cada grado que aumente la temperatura del agua. Esto se debe a que la viscosidad del líquido disminuye

con la temperatura al igual que la expansión y porosidad del lecho. Así, resulta que aumentar el flujo de agua en la época de calor no se justifica desde este punto de vista. En efecto para mantener la misma expansión a 5°C y 20°C se requiere aumentar la velocidad en 45 m/h pero eso solo cambia G en 3 % (de 324 a 334s^{-1}). Es decir, el criterio de una expansión determinada no es el adecuado. Sin embargo nótese que esto no implica que se niegue el hecho de que para un buen lavado siempre se requiera la fluidificación (Arboleda y Cleasby, 1979).

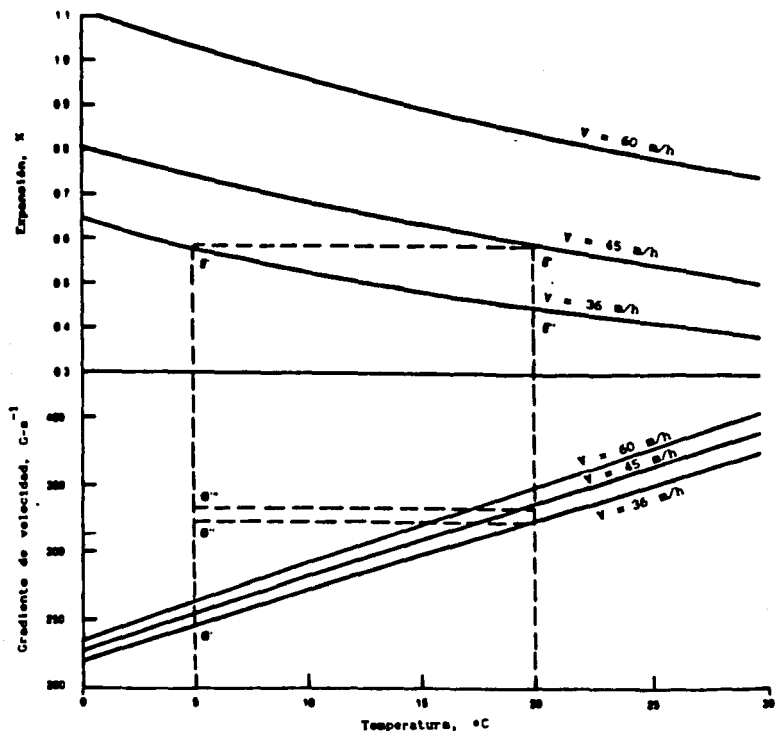


FIG 2.9 Gradiente de velocidad y expansiones a diferentes temperaturas para arena de 0.55 mm y $\rho_s = 2.65$.

2.5.5 Efecto de la temperatura.

La temperatura al afectar la viscosidad del agua afecta la expansión obtenida del lecho para una velocidad dada. Con agua fría es necesario disminuir el gasto mientras que con agua caliente la cantidad de agua empleada es mayor. Para calcular la variación de la velocidad en función de la temperatura se emplea la ecuación siguiente

$$u_{1(T)} = \kappa u_1 \quad (2.27)$$

donde,

- $u_{1(T)}$: velocidad del agua a la temperatura deseada
- u_1 : velocidad del agua a 18°C
- κ : factor de corrección

El valor de κ se presenta en la TABLA 2.7

TABLA 2.7 VALORES DE κ PARA LA CORRECCION POR TEMPERATURA.

TEMPERATURA DEL AGUA, °C	0	5	10	25	30
FACTOR DE CORRECCION, κ	0.84	0.89	0.93	1.06	1.10

FUENTE: Beaudry, 1984

2.6 Modelación del comportamiento del medio filtrante durante el lavado.

La modelación del comportamiento del medio filtrante es un problema que no ha quedado completamente resuelto en la literatura. Ello se debe básicamente a:

- la dificultad de desarrollar ecuaciones matemáticas para partículas no esféricas, irregulares y de diferente tamaño.
- los diversos factores que intervienen en la hidrodinámica de medios heterogéneos ya que los filtros son combinaciones de líquido (agua), sólido (medio filtrante y materia retenida) y gas (aire).

2.6.1 Representación del material filtrante.

2.6.1.1 Tamaño

Las partículas no esféricas, a diferencia de las esféricas, no pueden ser descritas por un parámetro unidimensional. La TABLA 2.8 presenta los diferentes parámetros que se han usado para caracterizar las partículas no esféricas. Estos parámetros son denominados por Allen (1975) "diámetros" aún cuando no corresponden con la definición geométrica.

En cuanto al tamaño, lo más frecuente es describir el tamaño de las partículas por medio del T.E (Tamaño efectivo) y el intervalo de sus tamaños mediante C.U (coeficiente de uniformidad). Valores que se obtienen al cribar la muestra a través de una serie de tamices.

Heywood (1974), se preguntó sobre el significado de emplear el tamaño de las aperturas de un tamiz para definir partículas irregulares. Llegó a la conclusión de que el tamaño más pequeño de la apertura de un tamiz por el cual pasa la muestra es un indicio de las dimensiones promedio definidas en tres ejes. La FIG 2.10 muestra la relación entre el tamaño de un tamiz, la longitud promedio axial intermedia y el diámetro esférico equivalente para grava de río.

TABLA 2.8. DIÁMETROS (PARAMETROS) CARACTERISTICOS EMPLEADOS PARA DESCRIBIR PARTICULAS NO ESFERICAS.

Diámetro	Símbolo	Definición
Diámetro del tamiz 1	d_{t1}	Apertura del tamiz más pequeño por el cual pasa un grano
Diámetro del tamiz 2	d_{t2}	Promedio de las aperturas correspondientes al tamaño más pequeño por el cual pasa un grano y el más grande que lo retiene.
Diámetro volumen (Diámetro esférico equivalente).	d_v	Diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que el grano.
Diámetro superficial	d_s	Diámetro de una esfera que tiene la misma área superficial que el grano.
Diámetro superficie-volumen.	d_{sv}	Diámetro de una esfera que tiene la misma relación superficie externa volumen.
Diámetro de fricción	d_f	Diámetro de una esfera que tiene la misma resistencia al movimiento que el grano en un fluido de igual densidad, viscosidad y velocidad relativa.
Diámetro de caída libre	d_{cl}	Diámetro de una esfera que tiene la misma densidad y la misma velocidad de caída libre que el grano, en un fluido de igual densidad y viscosidad.
Diámetro de Stock	d_{st}	Diámetro de una partícula en caída libre en la región de flujo laminar (i.e.) $Re < 0.2$
Diámetro 1 del área proyectada.	d_1	Diámetro de un círculo que tiene la misma área que la proyectada que la del grano colocado en una posición estable.
Diámetro 2 del área proyectada.	d_2	Diámetro de un círculo que tiene la misma área que la proyectada por el grano en una orientación al azar.
Diámetro del perímetro	d_p	Diámetro de un círculo que tiene el mismo perímetro que la proyección del grano
Diámetro de Feret	d_f	Valor promedio de la distancia entre dos tangentes paralelas trazadas a los lados del grano.
Diámetro circunscrito	d_{cs}	Diámetro del círculo más pequeño que circunscribe la proyección del grano.
Diámetro inscrito	d_{ci}	Diámetro del círculo más grande que se pueda dibujar adentro del grano.

Fuente: (Dharmarajah y Cleasby, 1986)

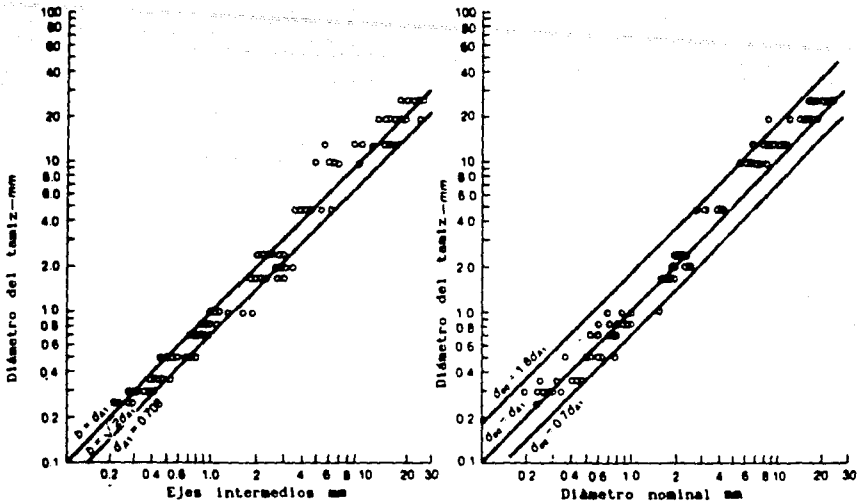


FIG 2.10 Relación entre abertura del tamiz y el diámetro esférico equivalente para grava de río

2.6.1.2 Forma

Durante los diversos desarrollos matemáticos que se han hecho para modelar los filtros se acostumbra representar al medio filtrante como esferas y por ello, ha sido necesario hallar una forma para evaluar que tanto los medios empleados se alejan de esta hipótesis. Esto se ha efectuado empleando las definiciones de factor de forma y de esfericidad.

Waddell (1934) definió la esfericidad, ψ , como "la relación entre el área superficial de una esfera con volumen igual al del grano y el área superficial real de éste", basado en que ello refleja aproximadamente el comportamiento de una partícula en suspensión.

ψ = área superficial de una esfera del mismo volumen / área superficial de la partícula.

En la TABLA 2.9 se representan los valores de esfericidad reportados por Cleasby y Fan (1982).

TABLA 2.9 VALORES DE ESFERICIDAD MODIFICADA PARA DIFERENTES MATERIALES.

M A T E R I A L		E S F E R I C I D A D
U.S arena	10-12	0.71
U.S arena	14-16	0.71
U.S arena	18-20	0.73
U.S arena	30-35	0.77
U.S antracita	5- 6	0.48
U.S antracita	6- 7	0.45
U.S antracita	7- 8	0.44
U.S antracita	12-14	0.46
U.K roca	25-30	0.62
U.K antracita	18-22	0.64
U.K antracita	25-30	0.61
U.K arena	12-15	0.81
U.K vidrio	18-22	0.96

FUENTE: Cleasby y Fan (1982).

El factor de forma, se define en función de dos o más parámetros de la TABLA 2.8. Las técnicas para medirlo se dividen en dos grupos: directas e indirectas. En las primeras se mide las dimensiones de cada grano para una muestra representativa. En tanto que, en las segundas se infieren a partir de una propiedad observada para todo el empaque. Los métodos indirectos son más comunes debido a su simplicidad. En efecto, se emplean la permeabilidad o las isotermas de adsorción para determinar la superficie específica del conjunto de granos y evaluar el factor de forma (Dharmarajah, 1986).

Otros factores de forma han sido definidos para describir el comportamiento hidrodinámico de granos angulares y se denominan factores de forma dinámicos. Gunasingham et al., (1981) usaron la siguiente relación

$$\Omega = d_{cl}/d_{eq} \quad (2.28)$$

donde

Ω : factor de forma dinámico o DSF

d_{cl} : diámetro de una esfera que tiene la misma densidad y velocidad de caída libre que el grano en un fluido de igual densidad y viscosidad.

d_{eq} : diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula.

En varios textos Ω se tomó igual a ψ , erróneamente.

Con excepción de valores del Re muy bajos o muy altos, Ω no guarda ninguna relación con el factor de forma geométrica ψ .

2.6.2 Correlaciones para representar la expansión.

Richardson y Zaki (1954) desarrollaron una correlación empírica que es muy usada para describir la velocidad promedio de flujo en los espacios vacíos en un sistema de partículas esféricas. Dichos autores observaron que el logaritmo de la velocidad superficial es una función lineal del logaritmo de la porosidad del lecho expandido para un sistema fluidificado con granos de tamaño uniforme (FIG 2.11).

$$u_s/u_{s1} = \epsilon^n \quad (2.29)$$

$$n \log \epsilon = \log u_s - \log u_{s1} \quad (2.29a)$$

Richardson y Zaki, además, presentaron cinco ecuaciones empíricas para calcular el coeficiente de expansión n y concluyeron que la velocidad de intercepción u_{s1} es igual a la velocidad de sedimentación en caída libre del grano en un medio infinito, $u_{s\infty}$, para los experimentos de sedimentación. De hecho, se relaciona con $u_{s\infty}$ mediante la siguiente ecuación

$$\log u_{s\infty} = \log u_{s1} + d/D_r \quad (2.30)$$

donde

d/D_r : relación entre el diámetro del grano y el diámetro de la columna

Sin embargo, la FIG 2.12 muestra una gráfica de $\log(u_{s\infty}/u_{s1})$ contra d/D_r , y revela que la Ec 2.30 no es válida.

Posteriormente, varios investigadores demostraron analíticamente, que para suspensiones muy diluidas de partículas esféricas, la relación entre la velocidad de sedimentación en cualquier instante y la velocidad final alcanzada en un medio infinito se determina mediante

$$u_s/u_{s\infty} = \epsilon / [1 + \zeta(1-\epsilon)^{1/3}] \quad (2.31)$$

donde

ζ : constante cuyo valor varía entre 1.3 y 2.1.

La Ec 2.31 es completamente diferente a la Ec 2.29 de Richardson y Zaki (1954). Por lo tanto los valores de u_{s1} que se obtuvieron por extrapolación, no representa el proceso físico involucrado cuando $\epsilon = 1$.

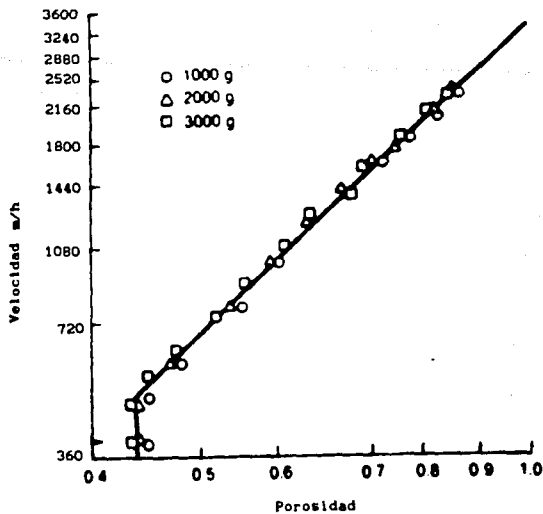


FIG 2.11 Relación entre porosidad de un lecho expandido y la velocidad superficial.

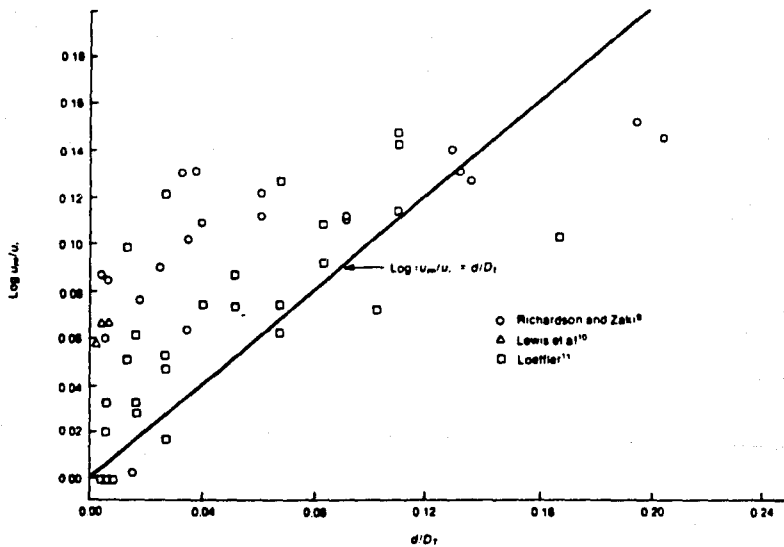


FIG 2.12 Relación entre u_w / u_1 y d/D_T

2.6.2.1 Coeficiente de expansión.

Cleasby y Fan (1981) observaron que los valores de n para partículas no esféricas son más grandes que para las esféricas considerando valores iguales de Re . A partir de ello corrigieron los valores de n calculados con la ecuación de Richardson y Zaki multiplicando por un factor proporcional al factor de forma (DSF o ψ) y por el número de Reynolds de la partícula (Re):

$$n = (4.45 + 18 d/D_r) Re^{-0.1} (DSF)^a \quad (2.32)$$

$$a = -2.2715(DSF)^{0.42} (Re)^{-0.441} \quad (2.33)$$

ó

$$n = (4.45 + 18 d/D_r) Re^{-1.0} (\psi)^b \quad (2.34)$$

$$b = -2.9237 \psi^{0.884} Re^{-0.363} \quad (2.35)$$

En las FIG 2.13 y 2.14 se muestra la relación de n contra Re para DSF y ψ , respectivamente y la FIG 2.15 la variación de n en función de Re usando Ω como parámetro de factor de forma.

Al examinar estas figuras se concluye que al aumentar el número de Reynolds de la partícula, el efecto de la forma sobre el valor de n es menos significativo.

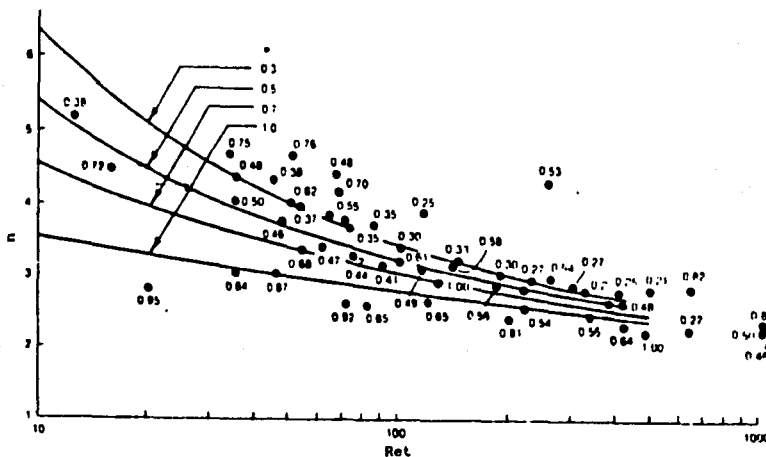


FIG 2.13 Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re , usando DSF como factor de forma.

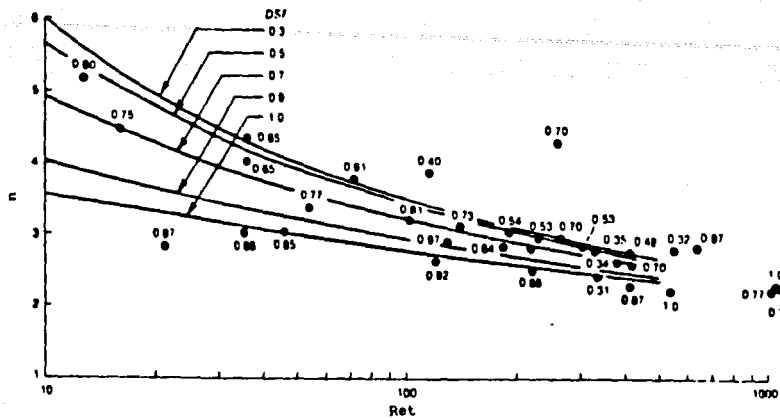


FIG 2.14 Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re_t usando ψ como factor de forma.

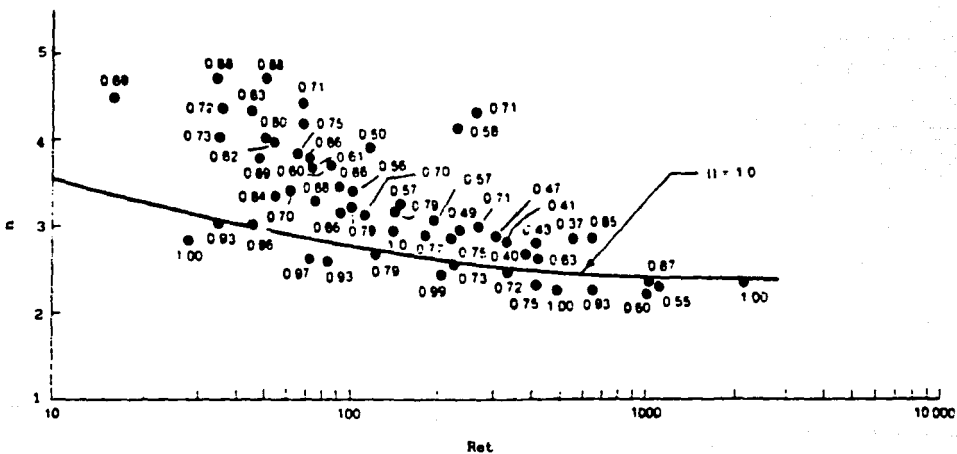


FIG 2.15 Relación del coeficiente de expansión, n , con el número de Reynolds, Re_t usando Ω como factor de forma.

2.6.3 Fluidificación

Amirtharajah (1978), describió el fenómeno de fluidificación como el paso en dirección ascendente de un fluido (gas o líquido) a través de un lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para suspenderlas en el fluido. En un lecho fluidificado todas sus partículas están en movimiento.

La velocidad superficial a la cual se inicia la fluidificación (velocidad mínima de fluidificación u_{mf}), es aquella a la cual la caída de presión por fricción ΔP_w , es igual al peso de las partículas que flotan por unidad de área. Teóricamente, cualquier incremento en la velocidad de flujo sólo causa que el lecho se expanda sin aumentar la pérdida de carga.

a) Fluidificación particular u homogénea. En casi todos los lechos fluidificados con líquido, la altura del lecho se incrementa uniformemente conforme aumenta la velocidad del agua u_{mf} . El líquido pasa suavemente a través del medio y se aprecia una distribución uniforme de éste. Cuando un filtro se lava con sólo agua se realiza este tipo de fluidificación.

b) Fluidificación agregativa o no homogénea. Se presenta cuando el fluido es un gas el cual se comporta como burbujas que crean un medio heterogéneo. Este corresponde a un sistema de dos fases (gas y sólido) y aun cuando no es el caso del lavado de un filtro con aire (sistema trifásico) sirve para comprender el fenómeno, ya que en ambos casos, el gas se comporta en forma aislada. De hecho, durante el lavado aire-agua los sólidos no se encuentran en estado de fluidificación.

2.6.3.1 Modelo de Dharmarajah y Cleasby

Dharmarajah y Cleasby (1986) desarrollaron una correlación para predecir la relación entre la velocidad y el porcentaje de vacíos usando el número de Reynolds modificado por Blake y una función para el porcentaje de vacíos que depende del número de Galileo y de la porosidad del lecho.

Se considera que un sistema fluidificado está definido completamente por los parámetros de la TABLA 2.10. Como hay ocho parámetros (incluyendo ψ) y tres dimensiones primarias, se pueden establecer cinco grupos adimensionales

$$(g/Su^2), (\rho u/S\mu), (\rho_s - \rho)/\rho, \epsilon, \psi$$

TABLA 2.10 PARAMETROS REQUERIDOS PARA DEFINIR UN SISTEMA FLUIDIFICADO.

Parámetro	Símbolo	Dimensiones
Velocidad superficial	v	LT^{-1}
Densidad del fluido	ρ	ML^{-3}
Viscosidad del fluido	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Densidad de los granos	ρ_s	ML^{-3}
Area superficial específica de los granos (dimensión característica), i.e., área superficial/unidad de volumen	S	L^{-1}
Porosidad promedio	ϵ	ninguna
Aceleración debida a la gravedad	g	LT^{-2}
Un factor de forma tal como la esfericidad para partículas no esféricas	ψ	ninguna

FUENTE: (Dharmarajah y Cleasby, 1986)

Para correlacionar la caída de presión del lecho Blake (1922) sugirió que la velocidad intersticial promedio representa la velocidad característica y que la longitud característica es análoga al radio hidráulico de un conducto.

$$\text{velocidad característica} = v/c \quad (2.36)$$

Longitud característica = área de la sección transversal media de canales de flujo a través del lecho/perímetro medio (2.37)

Si el numerador y el denominador de la Ec 2.37 se multiplica por la profundidad del lecho L , se obtiene

Longitud característica = [(volumen total del lecho/superficie total del lecho)] * $\epsilon = c/[S(1-\epsilon)]$ (2.38)

El número de Reynolds modificado por Blake se define como

$$Re_1 = (v/c) [c/S(1-\epsilon)] (\rho/\mu) = \rho v / [S\mu(1-\epsilon)] \quad (2.39)$$

Para correlacionar la caída de presión a través del lecho fluidificado, Blake (1922) y Carman (1973) usaron el número de Reynolds modificado y la siguiente función vacíos

$$\Phi = (\Delta P/L) (1/S\rho v^2) [\epsilon^2(1-\epsilon)] \quad (2.40)$$

pero, para lechos fluidificados

$$(\Delta P/L) = (\rho_s - \rho)(1-\epsilon)g \quad (2.41)$$

que al sustituir en la 2.40 se tiene

$$\Phi = (\rho_s - \rho)(1 - \epsilon)(g/S\rho v^2) [\epsilon^3(1 - \epsilon)] \quad (2.42)$$

$$\Phi = [g(\rho_s - \rho)\epsilon^3]/[S\rho v^2] \quad (2.43)$$

Como ambos, Φ y Re_1 contienen v , se puede definir una función nueva, A_1 , como:

$$\begin{aligned} A_1 &= \Phi * Re_1^2 \\ &= \{ [g(\rho_s - \rho)\epsilon^3]/[S\rho v^2] \} * \{ \rho^2 v^2/[S^2 \mu^2 (1 - \epsilon)^2] \} \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$A_1 = [\epsilon^3(1 - \epsilon)^2] \{ [\rho(\rho_s - \rho)g]/S^3 \mu^2 \}$$

Se graficó el logaritmo de A_1 contra $\log Re_1$ para obtener la correlación considerando que para partículas esféricas (FIG 2.16)

$$S = 6/d_e \quad (2.45)$$

donde

d_e : el diámetro de la esfera.

Y, para partículas no esféricas

$$S = 6/(\psi d_{eq}) \quad (2.46)$$

El procedimiento para determinar ρ_s , ϵ_0 , d_{eq} , ψ y v_c es descrito por Cleasby y Fan (1982). La TABLA 2.11 resume las propiedades de los materiales que usaron en una columna fluidificada de 10 cm de diámetro y una temperatura a 25°C.

La esfericidad se debe calcular usando los datos de caída de presión del lecho fijo, antes y después de compactarlo. La TABLA 2.9 muestra los valores corregidos de esfericidad por Cleasby y Fan (1982).

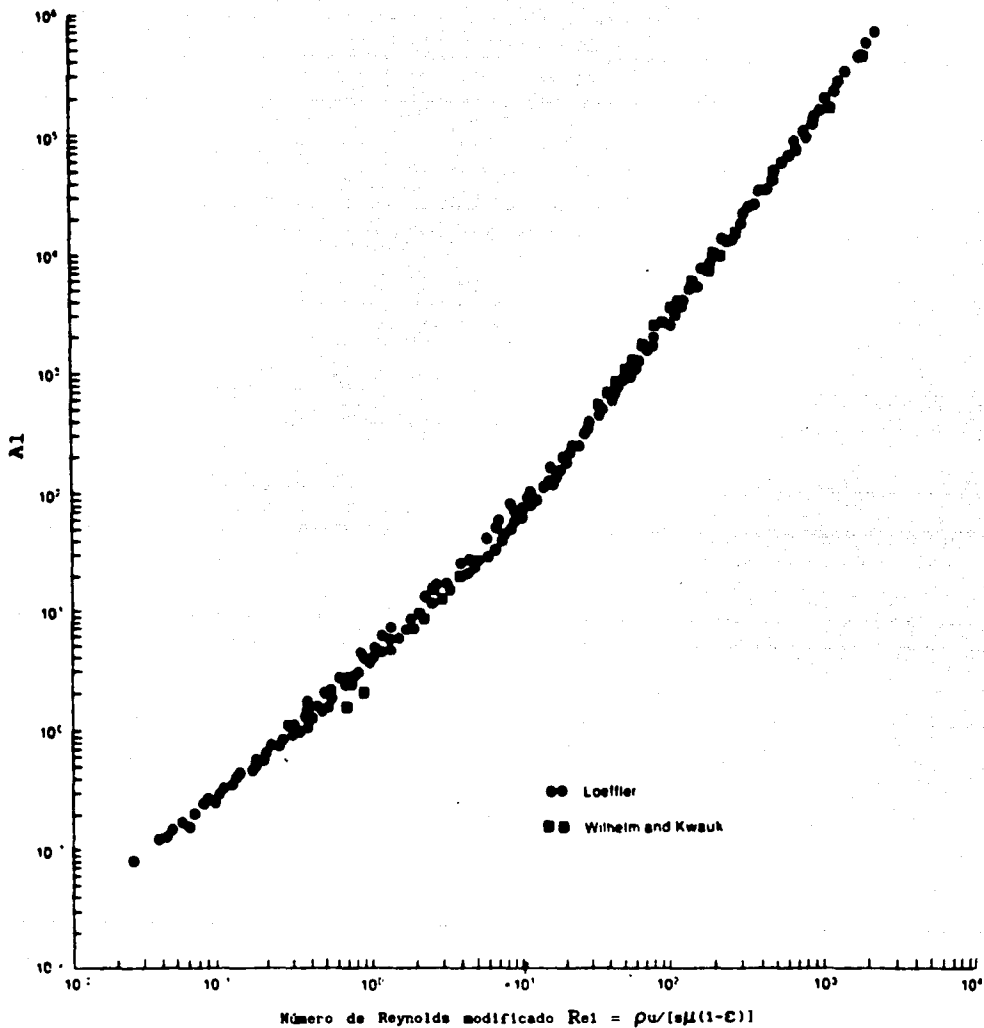


FIG 2.16 Relación entre A_1 y Re_1 para partículas esféricas.

TABLA 2.11 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE SE USAN EN LOS EXPERIMENTOS DE FLUIDIFICACION.

Tamaño de malla (U.S.)	d_{eq} cm	ρ_s g/cm ³	η_0	u_t m/h	ψ
Arena gruesa					
5-6	0.3749	2.646	0.455	987.76	0.76
6-7	0.3497	2.640	0.452	983.16	0.78
Carbón ligero					
5-6	0.3865	1.485	0.559	389.16	0.54
6-7	0.3167	1.485	0.556	358.56	0.55
7-8	0.2690	1.485	0.558	320.04	0.58
8-10	0.2339	1.485	0.563	301.32	0.54
Plástico A					
7-8	0.3085	1.36	0.410	455.40	0.90
Plástico B					
7-8	0.3040	1.27	0.440	361.44	0.72
Plástico C					
8-10	0.2693	1.2	0.429	270.72	0.77
Latón					
35-40	0.0474	8.55	0.426	665.64	0.88
Acero inoxidable					
16-18	0.0956	7.78	0.444	809.28	0.78
Aluminio					
16-18	0.1090	2.734	0.442	496.80	0.85

ρ_s , (densidad)
 c_0 (porosidad inicial)
 u_t a 25°C
 ψ (esfericidad)

Los plásticos A, B y C son polivinilo de diferente densidad.

FUENTE: Dharmarajah y Cleasby, 1986

Puesto que los efectos de pared de la columna son despreciables en las operaciones industriales pero no en los experimentos de laboratorio, Cleasby y Fan tomaron en cuenta las Ec de Loeffler las cuales muestran que el efecto de pared es función de la relación tamaño de la partícula / diámetro de la columna (d/D_T) y de las características del flujo (Re).

$$v_0 = v \times 10^{\alpha(d/D_T)} \quad (2.47)$$

con

$$\alpha = 5.18 / (Re_{t=0})^{0.585} \approx 5.2 / (Re_{t=0})^{0.6} \quad (2.48)$$

donde

- v_0 : velocidad en columna vacía requerida para alcanzar la misma porosidad que se obtiene en una columna donde existen efectos de pared
- v : velocidad en columna vacía y donde existe el fenómeno de pared
- D_T : diámetro de la columna

A valores grandes de Re se puede despreciar el efecto de pared. A partir de los datos experimentales y de las consideraciones anteriores Dharmarajah y Cleasby establecieron la siguiente relación del ajuste de los filtros (FIG 2.19):

$$\log A_1 = 0.56543 + 1.09348 \log Re_1 + 0.17979(\log Re_1)^2 - 0.00392(\log Re_1)^4 - 1.5(\log \psi)^2 \quad (2.49)$$

Puesto que A_1 y Re_1 son función de ϵ , la estimación de ϵ puede realizarse por un método de prueba y error. Se debe recordar que si se requiere conocer la velocidad superficial es necesario emplear las Ec 2.47 y 2.48 para obtener la velocidad v_0 (en la cual no hay efecto de pared) antes de calcular Re_1 . Si el modelo proporciona un valor en el cual $\epsilon < \epsilon_{cr}$, entonces ϵ_{cr} se emplea para calcular la expansión.

Limitaciones del modelo de Dharmarajah y Cleasby.

No se debe usar este modelo para predecir expansiones cuando $\epsilon > 0.85$ y $Re_f < 100$ y cuando $\epsilon > 0.9$ $Re_f > 100$ y para materiales con alta densidad ($\rho > 7.78 \text{ g/cm}^3$).

2.6.3.2 Modelo de Camp, Graber y Concklin

a) Lecho fluidificado con agua.

Quando un lecho está fluidificado se tiene que la fuerza de fricción que soportan los granos es igual al peso de los granos en el agua. Esto es

$$gpdh = dl g(\rho_g - \rho)(1 - \epsilon_e) \quad (2.50)$$

donde

dh: caída de presión

dl: espesor de la capa

ϵ_e : porosidad expandida a cualquier nivel

que para todo el lecho se torna

$$gph = (\rho_g - \rho)(1 - \epsilon_{av}) \quad (2.51)$$

donde

h : pérdida de carga a través del lecho fluidificado de espesor l

ϵ_{av} : porosidad promedio

Así, a partir del lado derecho de la ecuación (2.50) se puede calcular el peso de una fracción del lecho fluidificado a partir de las lecturas en los piezómetros. El conocer el w peso de un fluido por unidad de área sirve para calcular la porosidad del lecho con la Ec 2.51.

La Ec 2.50 se puede reorganizar de la forma

$$i = \frac{dh}{dl} = \frac{\rho_g - \rho}{\rho} (1 - \epsilon_e) \quad (2.52)$$

El valor de i se puede relacionar con la ecuación de Kozeny antes de que ocurra la suspensión. Al pasar el fluido a través del lecho fijo se genera una caída de presión dp (pérdida de energía) proporcional a la velocidad superficial v (en columna vacía), dada por la ecuación de Carmen-Kozeny.
donde

$$v = \frac{\epsilon^3}{\beta S_p^2 \mu (1-\epsilon)^2} * \frac{dh}{dL} \quad (2.53)$$

donde

L : espesor del lecho

S_p : área superficial específica del lecho

β : factor adimensional que depende de la porosidad, la forma de poro y la tasa de lavado.

Kozeny, definió el diámetro equivalente δ de los poros en un lecho, como el volumen de vacíos por unidad de superficie interna $\epsilon/S = \delta$. Donde S es el área superficial específica del lecho. Para lechos en los cuales solamente ocurren puntos de contacto (i.e., se pierde una cantidad despreciable de área superficial).

$$S = S_p(1-\epsilon) \quad (2.54)$$

donde

S_p : área superficial específica de una sustancia

Así con las ecuaciones 2.52 y 2.53, se relaciona la tasa de lavado con la porosidad para cualquier estrato del lecho (Camp, 1971):

$$q_w = \frac{g (\rho_g^3 - \rho)^2}{\beta \nu \rho} \frac{\epsilon_e}{1 - \epsilon_e} d^2 \quad (2.55)$$

donde

q_w : tasa de lavado por unidad de superficie la forma de poro y la tasa de lavado.

b) fluidificación con agua y aire

Camp et al, 1971 desarrollaron una ecuación similar a la 2.55 para el agua y aire tomando en cuenta que la densidad efectiva de la mezcla depende de la relación entre la velocidad ascendente del aire y la del agua, aspecto que a su vez es función del tamaño de las burbujas. Así, la densidad se determina a partir del volumen de agua, aire y el medio contenidos en cada tramo del lecho y las tasas de agua.

Las tasas de lavado para cada uno de los fluidos están dadas

$$\text{para el agua} \quad q_w = u_{w\epsilon_w} \quad (2.56)$$

$$\text{para el aire} \quad q_a = (u_w + u_a)(\epsilon - \epsilon_w) \quad (2.57)$$

donde

u_w : velocidad del agua en la porción donde se encuentra (p_w)
 ϵ_w : fracción del volumen que contiene agua
 u_a : velocidad de ascenso de las burbujas con respecto al del agua
 $\epsilon - \epsilon_w$: fracción de poros que ocupa el aire

La densidad efectiva de la mezcla ρ_{aw} es

$$\rho_{aw} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon} \rho + \frac{\epsilon - \epsilon_w}{\epsilon} \rho_a \quad (2.58)$$

como $\rho_a \ll \rho$, el segundo término de la Ec 2.58 frecuentemente se desprecia.

Si, además, se considera nulo el cambio de momento causado por la expansión del aire, el balance de fuerzas para una capa expandida de espesor dl se puede expresar como

$$-dP = dl \, g \, [\rho_g(1-\epsilon_e) + \epsilon_e \rho_{aw}] \quad (2.59)$$

donde

dP : diferencia de presión a través de la capa

Si no se toma en cuenta el cambio en la energía cinética producto de la expansión del aire en la mezcla, el principio de conservación de energía requiere que la pérdida de energía en presión, dh , sea igual a la lectura piezométrica, esto es

$$h_p = \frac{P}{g\rho_{aw}} + l \quad (2.60)$$

donde

l : elevación a la cual se encuentra el punto de lectura

Así, la Ec 2.59 en términos de la pérdida de carga puede ser escrita como

$$g\rho_{aw}dh = dl \, g(\rho_g - \rho_{aw}) (1 - \epsilon_e) \quad (2.61)$$

Para la totalidad del filtro y considerando que ρ_{aw} es constante

$$g\rho_{aw}h = L \, g(\rho_g - \rho_{aw}) (1 - \epsilon_{av}) \quad (2.62)$$

El lado izquierdo de la Ec 2.62 representa el peso por unidad de área de un filtro lavado con aire y agua.

La presión diferencial en un lecho fluidificado se relaciona con la diferencial manométrica (dh_M) como sigue

$$-dP = \rho_g(dh_M + dl) \quad (2.63)$$

Eliminando dP de las Ec 2.60 y 2.63 y tomando $dh = -dh_p$ se obtiene

$$\rho_g(dh_M + dl) = \rho_{aw} \, g \, (dh + dl) \quad (2.64)$$

Al emplear 2.64 y 2.58 para expresar h en la Ec 2.62 se tiene

$$h_M = L\left(\frac{\rho_g}{\rho} - 1\right)(1 - \epsilon_{av}) - L(\epsilon_{av} - \epsilon_w) \quad (2.65)$$

donde

h_M : lectura del manómetro

El primer término del lado derecho de la Ec 2.65 es una propiedad constante del filtro y es igual al valor que tendría la pérdida de carga si el lecho estuviera fluidificado con sólo agua. Por consiguiente la lectura manométrica, h_m , es igual a la pérdida de carga a través del lecho fluidificado menos el término $l(c_{av} - c_w)$ que representa el volumen que ocupa el aire por unidad de superficie.

Con la Ec 2.65 la fracción ocupada tanto por el aire como por el agua (c_{av}) pueden ser calculadas a partir de datos experimentales. Luego con las Ec 2.56 y 2.57 se calcula la velocidad del agua y la de las burbujas.

Por último, Camp et al., 1971 señala que si se aplica la Ec 2.55 primero para el caso del agua y luego para el del aire solo, con β iguales se tiene que la velocidad del aire debe ser 84 veces la del agua para obtener la misma expansión.

c) Filtros de medio múltiple.

En un lecho fluidificado, los granos de un medio ligero no se mezclarán con los del medio más pesado al sedimentar a menos que la densidad de los primeros sea mayor que la de la mezcla de los granos pesados y el agua. A continuación se presenta el desarrollo de un criterio matemático para calcular esta posible mezcla.

La fuerza de flotación de un grano de un lecho fluidificado es igual al peso de la mezcla desplazada.

$$F_b = V_d g \rho_m \quad (2.66)$$

donde

V_d : volumen ocupado por la mezcla desplazada
 ρ_m : densidad de la mezcla

Una partícula que se encuentra flotando dentro de la mezcla de volumen V_d debe tener una fuerza neta de empuje hacia abajo igual a la de su peso menos la fuerza de arrastre que provoca el agua de lavado al pasar cerca de ella. La fuerza neta impulsora es

$$F_i = V_d g \rho_p - C_d \frac{3}{2d} V_d \rho \frac{q_w^2}{2c_o} \quad (2.67)$$

donde

$V_d g \rho_p$: representa el peso de la partícula
 ρ_p : densidad de la partícula suspendida dentro de la mezcla
 C_d : coeficiente de arrastre de la partícula con diámetro d

$\rho (q_w^2/2c_e^2)$: presión dinámica

En el equilibrio, F_a es igual a F_b y

$$\rho_m = \rho_p - C_D \frac{3}{2d} \rho \frac{q_w^2}{2gc_e^2} \quad (2.68)$$

El número de Reynolds para el factor de fricción y arrastre de las partículas es

$$Re = \frac{\rho \frac{q_w}{c_e} d}{\mu} \quad (2.69)$$

al sustituir q_w/c_e en 2.68 da

$$\rho_m = \rho_p - \frac{3\mu^3}{4g\rho d^3} C_D Re^2 \quad (2.70)$$

En Camp (1945) se presentaron valores del coeficiente de arrastre C_D para esferas en función de Re . El segundo término de la Ec 2.70 puede ser omitido para valores pequeños de C_D , esto es (cuando las densidades de los granos mezclados son muy diferentes).

La densidad de un lecho fluidificado con medios mezclados en un tramo donde la porosidad es ϵ_e vale

$$\rho_m = \epsilon_1 \rho_1 + \epsilon_2 \rho_2 + \epsilon_e \rho_f \quad (2.71)$$

donde

- ϵ_1 : fracción de volumen expresada como porosidad que ocupa los granos pesados de densidad ρ_1
- ϵ_2 : fracción de volumen como porosidad que ocupa los granos más ligeros con densidad ρ_2
- ρ_f : la densidad del fluido

Ahora,

$$\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{w_2}{w_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (2.72)$$

donde

- w_2 : peso de los granos ligeros por unidad de volumen del lecho
- w_1 : peso de los granos pesados por unidad de volumen del lecho

Pero como $c_1 + c_2 = 1 - \epsilon_e$ (2.73)

resulta que

$$1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{1 - \epsilon_e}{\epsilon_1} \quad (2.74)$$

Si se relaciona las Ec 2.72 y 2.74 y se despeja c_1 se tiene

$$c_1 = \frac{1 - \epsilon_e}{1 + \frac{w_2}{w_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (2.75)$$

Al sustituir el valor de c_2 ρ_2 de la Ec 2.72 en la 2.71 y c_1 de la Ec 2.75 se obtiene ρ_m

$$\rho_m = (1 - \epsilon_e) \rho_1 \frac{1 + \frac{w_2}{w_1}}{1 + \frac{w_2}{w_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} + \epsilon_e \rho_f \quad (2.76)$$

La densidad efectiva de los granos es

$$\rho_s = \frac{\epsilon_1 \rho_1 + \epsilon_2 \rho_2}{(1 - \epsilon_e)} = \rho_1 \frac{1 + \frac{w_2}{w_1}}{1 + \frac{w_2}{w_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (2.77)$$

Por lo tanto, la Ec 2.76 se transforma

$$\rho_m = (1 - \epsilon_e) \rho_s + \epsilon_e \rho_f \quad (2.78)$$

Tomando el valor de ρ_f de la Ec 2.52 como la ρ_s de la Ec 2.77 y al despejar $1 - \epsilon_e$ se tiene

$$(1 - \epsilon_e) = i \left[\frac{\rho_1}{\rho_f} \frac{1 + \frac{w_2}{w_1}}{1 + \frac{w_2}{w_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}} - 1 \right]^{-1} \quad (2.79)$$

Para obtener el valor de β en cualquier nivel por medio de la Ec 2.55 es necesario tener un valor promedio de d^2 para ambos tipos de granos (ligeros y pesados). A partir de la definición por peso y conteo del diámetro

$$d^3_{av} = \frac{6}{\pi} \frac{w}{\rho_s n_u} \quad (2.80)$$

donde

w : peso de los granos por unidad de volumen del lecho
 n_u : número de granos por unidad de volumen del lecho
 como

$$c = \frac{w}{(\rho_s g)} = c_1 + c_2 \quad \text{y} \quad n_u = n_{u1} + n_{u2} \quad (2.81)$$

la Ec 2.80 se transforma

$$d^3_{av} = \frac{6}{\pi} \frac{(c_1 + c_2)}{(n_{u1} + n_{u2})} \quad (2.82)$$

donde

n_{u1} y n_{u2} : número de granos por centímetro cúbico de un lecho fluidificado con materiales de tamaño d_1 y d_2 (por peso y conteo)

Puesto que c_1 y c_2 son el volumen por centímetro cúbico de lecho que ocupa cada tipo de medio, el número de granos en este volumen será

$$n_1 = \frac{c_1}{\frac{\pi}{6} d_1^3} \quad (2.83)$$

y

$$n_2 = \frac{c_2}{\frac{\pi}{6} d_2^3} \quad (2.84)$$

Al combinar las Ec 2.82, 2.83 y 2.84 se obtiene el valor promedio de d^3

$$d^2_{av} = \left[\frac{d_1^3 n_{u1} + d_2^3 n_{u2}}{n_{u1} + n_{u2}} \right]^{2/3} \quad (2.85)$$

2.6.4 Pérdida de carga durante el lavado.

La pérdida de carga de un lecho fluidificado es constante e igual a

$$\Delta H = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} (1-c) L \quad (2.86)$$

donde

ΔH : es la pérdida de carga en mca

2.7 Principales sistemas de distribución.

Para efectuar el lavado existen diversos tipos de bajodrenes cuya función es distribuir los fluidos (ya sea el agua o el aire) y captar el agua filtrada. Cuando los drenes están mal diseñados y no distribuyen uniformemente el agua de lavado desacomodan la arena y la grava.

Los sistemas de bajodrenes se clasifican en tres tipos como se muestra en la FIG 2.17.

Tuberías perforadas	}	a. Para trabajo con grava
		b. Para trabajo con bloques y grava.
Falsos fondos	}	a. Tipo Weeler
		b. Tipo Leopold
		c. Boquillas
Placas porosas	}	a. Bloques Carborundum

FIG 2.17 Clasificación de los bajodrenes

En la práctica, es muy difícil que la distribución del agua de lavado sea perfecta. El sistema de distribución del agua debe ser tal que minimice los caminos preferenciales y evite zonas con importantes diferencias de velocidad. Debe distribuir adecuadamente aire a velocidades de 9 a 91 m/h y agua a velocidades de 12 a 120 m/h a través de 15 m de longitud y con desviaciones menores al 5%. Además, la pérdida de carga total no debe exceder de 30 a 50 cm.

Por otra parte, los orificios de salida deben ser menores que los tamaños de los granos pero, como sistemas de este tipo con frecuencia se obstruyen se deben diseñar para limpiarlo con frecuencia sin tener que quitar el empaque. En cuanto al material de construcción debe ser tal que permita el lavado con ácido sulfúrico concentrado o un álcali fuerte (para flóculos de aluminio) en intervalos de varios meses a cada dos años (Gregory 1972).

A continuación se describen los bajodrenes más utilizados en México.

2.7.1 Falso fondo tipo Leopold.

Es un sistema de distribución modular cuyo principal distribuidor es la Leopold Company, la cual asegura que distribuye uniformemente tanto el agua como el aire en longitudes superiores a 35 m. El módulo que emplea agua y aire se denomina del tipo

Lateral-Paralelo-Dual y está dividido en dos compartimientos: el inferior que sirve de conducto de distribución para el agua y el superior, comunicado con el inferior mediante un orificio de una pulgada de diámetro para el aire. Con este tipo de drenes se puede disminuir el espesor de la grava (FIG 2.18).

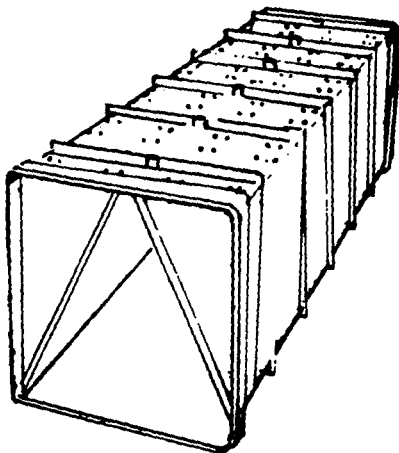


FIG 2.18 Falso fondo tipo Leopold

Los módulos Leopold son resistentes a la corrosión debido al polietileno de alta densidad con que están fabricados. Tienen orificios de 6.3 mm de diámetro espaciados cada 5 cm. Cada bloque pesa aproximadamente 6.8 kg (15 lb) y mide 30.48 cm (12 in) de alto, 27.94 cm (11 in) de ancho y 91.44 cm (36 in) de largo. Se instalan uniéndose con grapas especiales de tal forma que se impidan fugas (de agua o aire) en las uniones aún cuando se desalinien hasta 2° en una junta.

La alimentación lateral debe tener una sección transversal de por lo menos 387 cm² (60 in²) para asegurar velocidades bajas del agua y aire de lavado. Por cada 930 cm² (1 ft²) de filtro se requieren dos orificios para el agua de 1.91 cm (3/4 in) de diámetro y cuatro para el aire de 4.8 mm (3/16) conectados al compensador y al alimentador lateral, respectivamente. Estos orificios producen aproximadamente 15 cm de pérdida de carga a velocidades de lavado

de 37 m/h de agua. Los orificios para el aire producen pérdidas de carga de aproximadamente 7.6 cm para velocidades de 55 m/h. La descarga del flujo al filtro de agua y aire se lleva a cabo mediante 23 orificios de 6.3 mm de diámetro por cada 930 m² de filtro.

2.7.2 Espreas microranuradas.

El sistema de boquillas consiste de una losa perforada colocada sobre un falso fondo de 10 a 60 cm de profundidad en la cual se atornillan las boquillas, cuyos diseños son muy variados (FIG 2.19). Las espreas están provistas de ranuras, a través de las cuales pasa el agua o el aire. Se usan, especialmente para el lavado con aire y agua y son el sistema preferido por las compañías europeas.

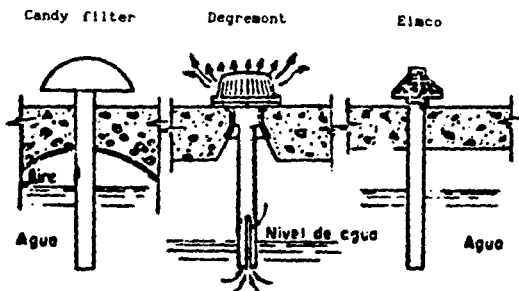


FIG 2.19 Modelos de boquillas

De acuerdo con los fabricantes, muchas boquillas son diseñadas para disminuir o incluso evitar la grava y por ello sus aperturas de distribución son muy finas provocando que se taponen con frecuencia. Su colocación es según las instrucciones del fabricante y debe colarse la losa específicamente para este propósito.

Las espreas generalmente, son de plástico y tienen dos orificios: el primero localizado en la parte inferior es para la entrada de agua y el segundo, más pequeño y que está en la parte superior es para el aire. El aire hace bajar el nivel del agua en el falso

fondo o los laterales y así el agua entra por el orificio o ranura que está en el vástago. Cuando el espacio entre boquillas es grande (a partir de 20 cm) se crean zonas muertas. Como resultado, la velocidad del flujo se incrementa en ciertas zonas arrastrando finos hacia el sistema de distribución durante el lavado. En la FIG 2.20 se muestran las boquillas cola larga Degremont, que es el sistema empleado en La Planta de "Los Berros".

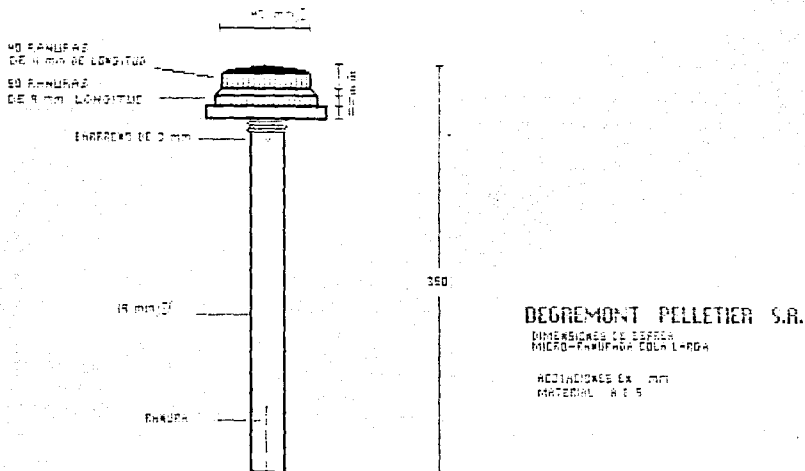


FIG 2.20 Boquilla cola larga (empleada en Los Berros)

2.7.3 Grava

Los británicos acostumbran distribuir el aire mediante la capa de grava. En ocasiones, emplean tuberías separadas de agua y aire. la distribución es buena, pero según Cleasby et al, 1975 se debe a la menor cantidad de aire empleada (20 a 27 m/h contra 37 a 49 en la práctica americana). Por otra parte, los europeos han encontrado que las tasas de aire empleadas en EUA mueven la gravilla de 2 a 3 mm por ello Baylis propuso una capa soporte con gradación en doble sentido.

2.8 Problemas de operación.

Como proceso unitario, la filtración a profundidad del agua consta de dos etapas: una de ensuciamiento del medio y otra de regeneración del mismo. La primera determina básicamente la calidad del efluente y la segunda la cantidad de agua producida. En consecuencia, la eficiencia de un filtro es función de ambas. La práctica ha demostrado que la operación de lavado de un filtro llega a perjudicar enormemente la eficiencia global del proceso. Entre los principales problemas generados por un mal lavado se encuentran los siguientes:

- a. Formación de aglomerados ("Bolas de lodo")
- b. Agrietamiento del lecho
- c. Formación de zonas con presión negativa
- d. Pérdida de medio filtrante
- e. Desplazamiento de la grava

2.8.1 Aglomerados

Cuando un filtro ha funcionado durante largo tiempo y no ha sido lavado correctamente los sólidos retenidos se aglutinan con el medio filtrante formando aglomerados. Tradicionalmente estas formaciones han recibido el nombre de bolas de lodo o de barro como traducción al término "mudballs"; sin embargo, se considera que el término aglomerado los describe en forma más precisa y por ello se empleará en este texto. El tamaño de los aglomerados va desde 1 a 10 cm; su densidad es generalmente menor a la del medio por lo que se acumulan en la superficie dejando pasar a los sólidos con el efluente.

Se forman como resultado de operar con condiciones que permiten la sedimentación de parte del material que se desprendió después del lavado, como es el caso de duraciones insuficientes o el empleo de tasas inferiores a la requerida para transportar los flóculos hasta la canaleta de lavado. Para remover este tipo de formación se debe emplear una velocidad de 549 m/h o usar aspiradoras de alberca (Camp, 1971).

Los aglomerados no tenderán a sedimentar en un lecho fluidificado a menos que su densidad sea mayor que la de la mezcla de los granos con el fluido (ρ_m), la cual se calcula mediante la Ec 2.78.

Para prevenir o eliminar los aglomerados se pueden utilizar los siguientes procedimientos:

- a. Mientras se mantiene agua de lavado a baja velocidad, se tamizan las capas superficiales del lecho filtrante con cribas de diámetro mayor que el de los granos de arena y se extrae las bolas

de las capas superficiales. Este procedimiento no elimina las bolas pequeñas.

b. Se hace un fuerte lavado superficial con chorros a presión para producir una agitación violenta de la arena, raspando al mismo tiempo la superficie con rastrillos metálicos. Luego se lava el filtro con velocidades elevadas de agua y aire.

c. Se efectúa un lavado químico. En este último caso se emplea sosa (1 o 2 %), cloro (200 a 300 mg/l) o cloruro de sodio (2%) y es necesario mantener la solución en contacto por lo menos dos horas antes de efectuar un buen enjuague.

d. También se puede picar la superficie de la arena y lavar luego cuidadosamente el filtro.

Para detectar este problema se recomienda efectuar en forma periódica un análisis granulométrico de la superficie hasta 15 cm de profundidad. La muestra se tamiza en mallas del No. 8 y 10 y se calcula el por ciento en volumen que ocupan los aglomerados retenidos. La calidad de la arena se establece según la TABLA proporcionada por Baylis (TABLA 2.12)

TABLA 2.12 CALIDAD DEL MEDIO FILTRANTE

% de aglomerados	Clasificación
0.0 a 0.1	Excelente
0.1 a 0.2	Muy bueno
0.2 a 0.5	Bueno
0.5 a 1.0	Regular
1.0 a 2.5	Mediocre
2.5 a 5.0	Malo
>5	Muy malo

FUENTE: Baylis, 1975

2.8.2 Agrietamiento.

Es un proceso similar al de las bolas de lodo. El material gelatinoso acumulado entre los granos de arena, forma una pasta con ellos, abriéndose grietas más o menos profundas. Estas se producen al principio en la superficie pero a medida que el agua pasa a gran velocidad por ellas sin filtrarse, se van ensanchando y haciéndose más hondas. Cuando un filtro se encuentra en estas condiciones prácticamente no se realiza el proceso de filtración.

2.8.3 Formación de zonas con presión negativa.

Esta existe cuando la presión en el lecho filtrante es menor a la atmosférica. En estas condiciones el filtro queda sometido internamente a un vacío parcial y el aire que se encuentra disuelto en el agua se libera y es retenido en forma de burbujas dentro de la arena, llenando los poros con lo cual el filtro pierde capacidad.

Para evitar este inconveniente se debe efectuar el lavado a tiempo. La mayoría de los filtros operan con cargas negativas una vez que se ha terminado la carga disponible. Si en este momento no de determina el fin de corrida se puede dar la "embolia" del filtro.

2.8.4 Pérdida de medio filtrante.

En algunos casos se pierde arena durante el lavado y debe ser repuesta cada vez que la altura del lecho disminuya en 10 a 15%. La pérdida de arena se debe a:

- el empleo de gastos muy elevados
- canaletas de recolección muy bajas
- modificación del peso específico del medio
- movimiento de la gravilla soporte que hace que la arena se escape por el fondo.

2.8.4.1 Tasa de lavado excesiva.- La expansión del lecho filtrante debe mantenerse bajo un riguroso control para evitar velocidades excesivas y perjudiciales que pueden sacar parte del medio filtrante.

2.8.4.2 Posición de las canaletas de lavado.- Normalmente las pérdidas sólo se producen cuando el filtro está relativamente nuevo. Posteriormente no tiene porque perderse arena. Si ello continua, la solución consiste en elevar las canaletas ya que si se expande menos el lecho se corre el riesgo de no lavar adecuadamente.

2.8.4.3 Cambio del peso específico.- El peso específico de la arena se modifica cuando se le adhiere material menos denso. Este caso es frecuente cuando se procesa el agua para ablandarla con cal y sosa y la recarbonatación es incompleta o cuando se alcaliniza el agua antes de filtrarla. El carbonato de calcio se precipita y se adhiere a la arena fuertemente, por lo cual quedan los granos más abultados. En estas condiciones, la expansión del lecho es más grande.

2.8.4.4 Desplazamiento del medio filtrante o de soporte.- La resistencia que presenta el lecho filtrante al paso del flujo no es igual en toda la superficie del filtro. En los lados junto a las paredes, por ejemplo, es mucho menor que en el centro y en las capas de encima es mayor que en las de abajo. Todo esto crea una serie de corrientes verticales y horizontales que desestratifican la arena empujándola hacia arriba a lo largo de las paredes. En algunos casos se llega incluso a desacomodar la grava.

2.9 Criterios de operación

De acuerdo con Cleasby et al., 1975 los principales problemas relacionados con el lavado de filtros se deben a :

- a) La diversidad tanto de los tipos de medio empleados como de los diseños de filtros
- b) Los bajo drenes para la distribución del aire que requieren un diseño y mantenimiento más complicado.
- c) Los intervalos tan amplios señalados en la literatura para los gastos de agua y aire por emplear.

Dada la diversidad de factores que intervienen durante el lavado de un filtro es conveniente que cada planta cuente con un manual que defina sus propios criterios de operación, los cuales se deben determinar en instalaciones piloto.

A continuación se tratarán los dos principales criterios de operación para el lavado de filtros.

2.9.1 Expansión

El lavado de un filtro tiene por objeto remover los sólidos de los granos y dilatar el lecho para sacarlos. El flujo de agua y/o aire debe ser suficiente para realizar las funciones anteriores sin desacomodar la capa de grava o sacar el medio filtrante por el efluente. Es decir, la velocidad de operación debe permanecer entre ciertos límites. Beaudry, 1984 señala que el parámetro más adecuado para controlar el proceso es el porcentaje de expansión del lecho, calculado mediante la ecuación:

$$E = \frac{L_e - L}{L}$$

(2.93)

donde

L_e : espesor del lecho durante el lavado

Es costumbre aceptar como expansión mínima del lecho 15 % y se prefiere operar dentro del intervalo de 20 a 50 %. Si se excede este límite se perderá medio por el efluente, se desacomodará la grava y disminuirá la eficiencia del lavado.

Las FIG 2.21, 2.22 y 2.23 son gráficas del índice de recuperación en función de la expansión del lecho. Cuando en estas curvas se acercan al 100 % de recuperación la expansión correspondiente es de 35 % para cualquier tamaño del medio (Toregas, 1983). Por lo que esta expansión sería la recomendable.

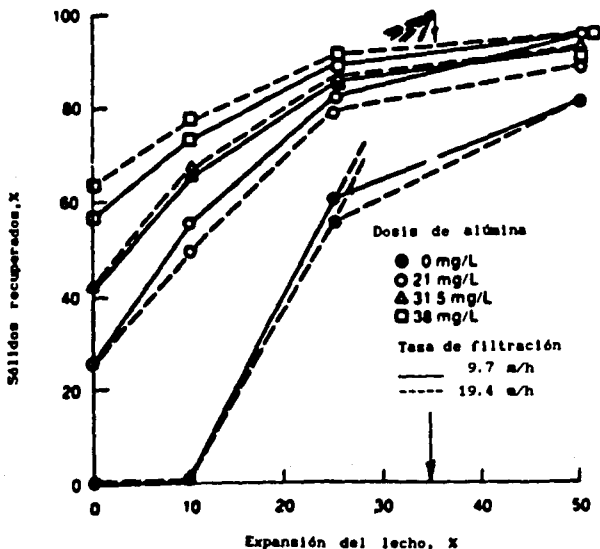


FIG 2.21 Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.93 mm.

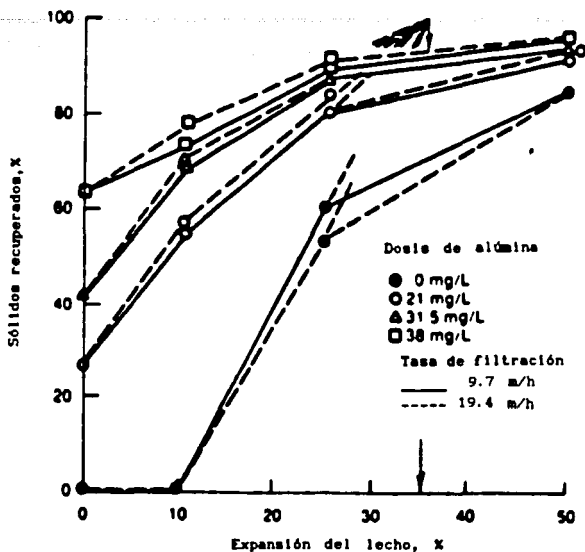


FIG 2.22 Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.69 mm.

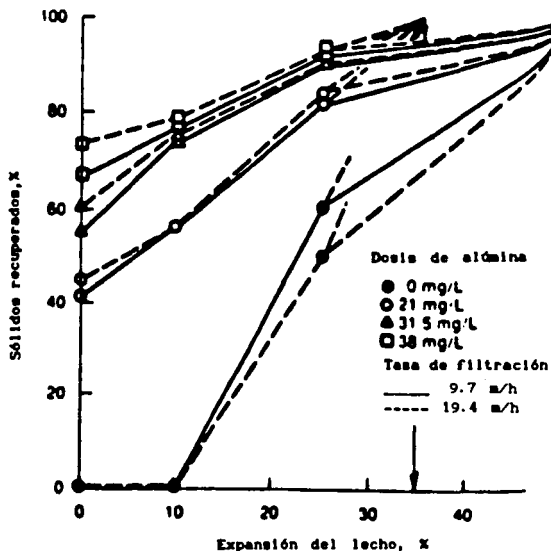


FIG 2.23 Índice de recuperación de sólidos en función de la expansión del lecho para arena de 0.35 mm.

En otras palabras, se requiere una expansión suficiente para suspender toda la capa de arena que depende del tamaño de los granos y de su densidad. Pero una expansión exagerada de arena no beneficia el lavado, ya que impide la fricción entre los granos, y el desplazamiento de las partículas adheridas a ellos. En cambio si la expansión no es suficiente, el floculo retenido en el lecho no puede salir de entre los granos y alcanzar la canaleta de lavado.

Sin embargo, Camp *et al.*, 1971, al realizar varios experimentos de lavado con aire y agua, notaron que el espesor del lecho variaba después de cada lavado. De esta forma demostraron que se puede tener expansiones de 20% en lugar de 41 % con las mismas condiciones y como consecuencia consideran que el criterio de expansión no es un criterio confiable recomiendan guiarse por el de velocidad de lavado.

2.9.2 Velocidad de lavado de agua

Dado que la expansión del lecho depende de condiciones muy difíciles de controlar en la práctica, se recomienda guiarse por el criterio de la velocidad del agua. La velocidad del aire no es un factor limitante ya que como quedó demostrado anteriormente se necesita gastos muy elevados de éste para lograr fluidificar el lecho (84 veces el gasto del agua).

El gasto óptimo de lavado debe ser determinado en el laboratorio para encontrar la tasa de lavado que produzca la expansión adecuada a diferentes temperaturas (Gregory, 1972).

3. DESCRIPCION DE LA PLANTA

La Planta Potabilizadora Los Berros del Sistema Cutzamala, se localiza en el km 53 de la carretera No. 15 Toluca-Zitácuaro. Tiene como objetivo, suministrar agua potable a la ciudad de Toluca (0.5 m³/s) y al Distrito Federal (9 m³/s). Las principales fuentes de abastecimiento son la presa de Villa Victoria que suministra el agua (4.0 m³/s) por medio de un canal de 13 km y la de Valle de Bravo (6.1 m³/s) que suministra el agua por medio de tuberías, canales y túneles con una longitud total de 29.1 Km (FIG 3.1). El Sistema Cutzamala cuenta con ocho estaciones de bombeo para transportar el agua a través de los 117 km de la red de conducción.

El diseño contempla la construcción de seis módulos de potabilización para tratar 20.3 m³/s actualmente se han construido tres que producen 10.3 m³/s y el resto aún se encuentra en construcción.

El diseño es del tipo de potabilización convencional (floculación, sedimentación y filtración). El sistema consiste en un cárcamo de recepción de aguas crudas con una capacidad de 7600 m³, seis rejillas para retención de sólidos gruesos, seis canales Parshall, equipo dosificador de reactivos, y tres módulos de potabilización. Cada módulo contiene cuatro floculadores, cuatro sedimentadores, un canal de distribución de agua clarificada, y cuatro filtros rápidos de arena. Posterior a ello se tiene un vertedor, y el tanque de sumergencia (colector de agua potable) que tiene una capacidad de 42000 m³ (FIG 3.2).

3.1. Descripción de las principales etapas del proceso de potabilización.

3.1.1 Rejillas.- Tienen 1.5 cm de abertura, son del tipo de limpieza manual y se localizan en la entrada del canal Parshall para impedir el paso de sólidos gruesos. Están colocadas verticalmente y sujetas con ángulos de fierro que permiten deslizarlas hacia arriba para facilitar su limpieza.

3.1.2 Dosificación de reactivos.- Se agregan de 3 a 3.5 p.p.m. de cloro con un equipo dosificador al inicio del canal Parshall y 19 de sulfato de aluminio añadidos en la garganta del Parshall para su mezcla rápida (FIG 3.3).

3.1.3 Canal Parshall (FIG 3.3).- Tiene una garganta de 3.75 m. El canal consta de una sección de entrada de 5.60 m, una contracción de 1.05 m de paredes paralelas con pendiente hacia abajo, una sección de recuperación de 1.90 m con paredes divergentes. La medida de la pérdida de carga se lleva a cabo en la zona de calma.

Después de los canales Parshall el agua pasa por gravedad a los módulos de Potabilización a través de tuberías sumergidas de 1.83 m de diámetro.

3.1.4 Módulos de Potabilización.

Cada módulo cuenta con:

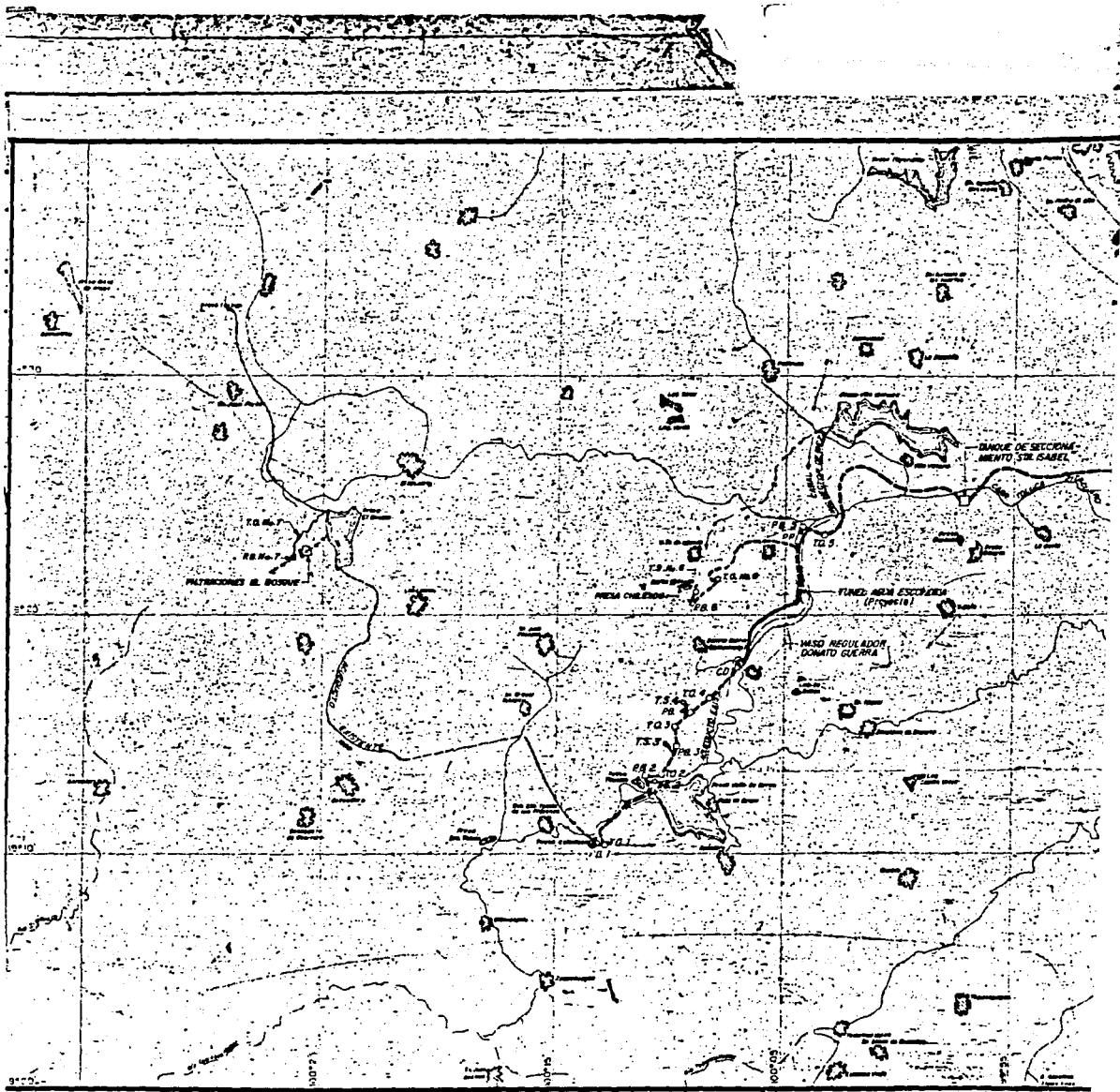
- Cuatro floculadores de tipo hidráulico-mecánico, con dimensiones de 21.6 m por 18.6 m y mamparas de concreto, colocadas cada 4.15 m de longitud (FIG 3.4). Simultáneo al sistema de agitación hidráulica, funciona un sistema de agitación mecánica que consiste de paletas accionadas por motores de 20 y 10 H.P y una velocidad de 1165 y 1160 r.p.m. respectivamente. En esta etapa se completa la reacción de coagulación hasta alcanzar las condiciones que permiten aumentar el tamaño del flóculo y favorecer la sedimentación.

- Cuatro sedimentadores de alta tasa conectados en serie con los floculadores (FIG 3.5). Los sedimentadores son estructuras rectangulares de 54 por 18.6 m con 8 canaletas de 54 m de longitud. El agua, que proviene de los floculadores, fluye con un gasto de 1.0 m³/s, en esta etapa el material suspendido cae y se deposita en el fondo, para disminuir el tiempo de sedimentación se tiene placas paralelas con una inclinación de 60°. Los sedimentadores cuentan con un Clariback como sistema de remoción mecánica de sólidos. El agua clarificada por este método pasa a los filtros por medio de un canal que es común a cada módulo.

- Ocho filtros rápidos de arena de 16 X 11 m (FIG 3.6) cuyo suministro de agua es por medio de un vertedor individual colocado en el nivel 39.16. En el diseño se considera que los filtros consisten de un lecho de arena que teóricamente tiene un espesor de 1.30 m de espesor colocado sobre un lecho de grava de 0.10 m . La arena empleada tiene una talla efectiva (T.E) de 0.95 mm y un coeficiente de uniformidad (C.U) de 1.6 aproximadamente. El sistema de distribución para el lavado es el de boquillas ranuradas (ó boquilla cola larga).

La duración de las corridas de filtración es de 30 a 50 h para una velocidad de operación 11 m/h. El agua filtrada se concentra en un canal común con 87 m de longitud que conduce el agua hacia el tanque de sumergencia a través de un vertedor de 48 m de longitud.

Para la transportación del efluente se cuenta con un sistema de bombeo (PB5) que transporta el agua desde el nivel 2531 hasta la torre de oscilación en el nivel 2701.84 que es el punto más alto del Sistema Cutzamala, a partir de ahí se conduce por gravedad hasta el lugar de consumo. Para esta operación la Planta de Bombeo utiliza seis bombas de 4.0 m³/s y 10000 H.P.



CA-0-13-7223

PERIODO DE
M.C. ESTADIA RESERVA DE
ACOSTO DE HABR.

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESQUERÍA
INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

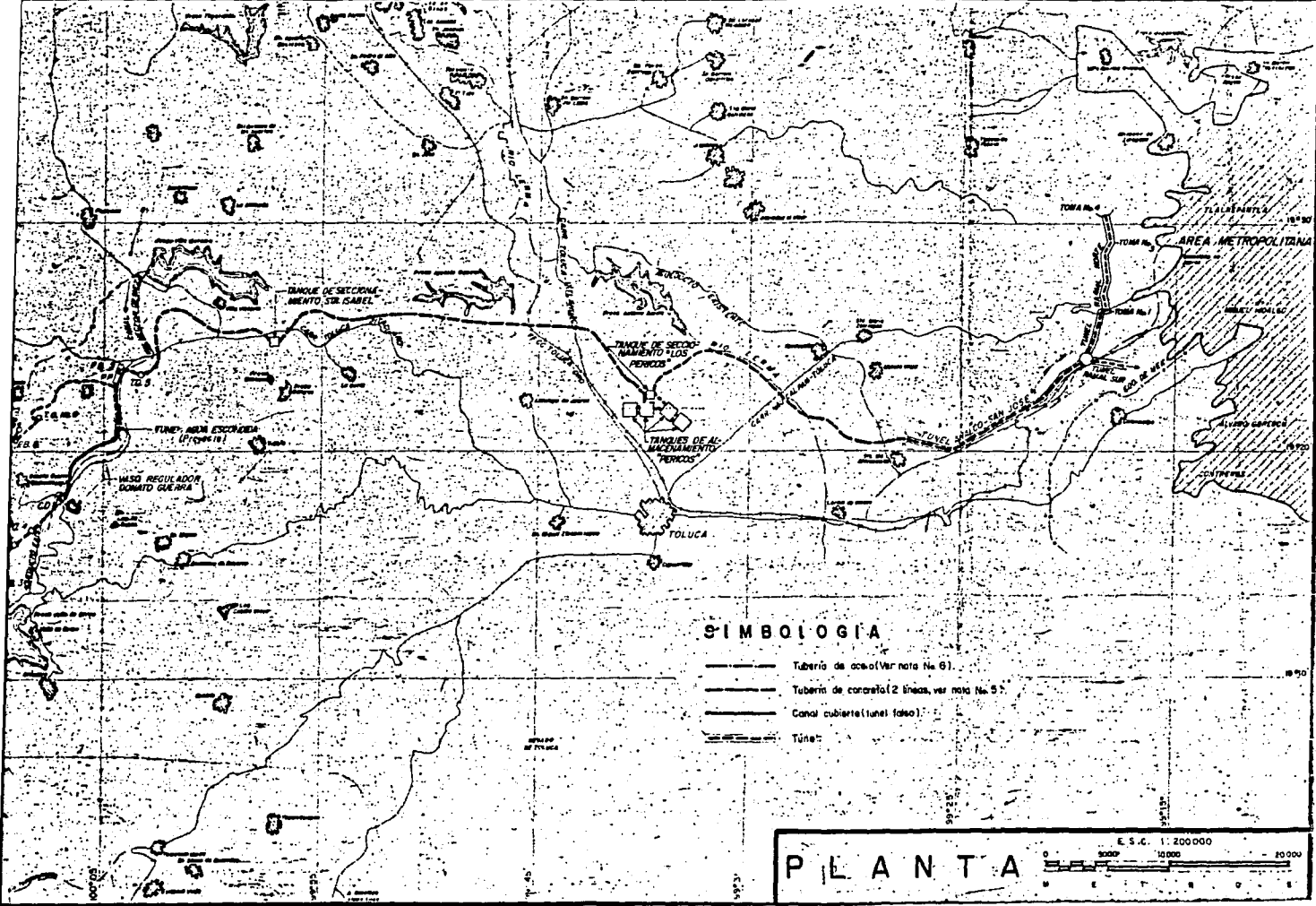
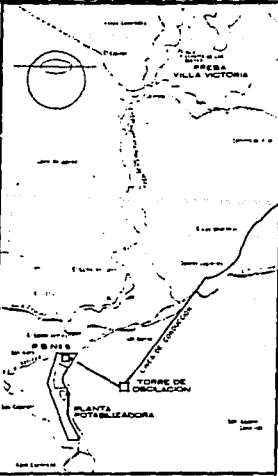
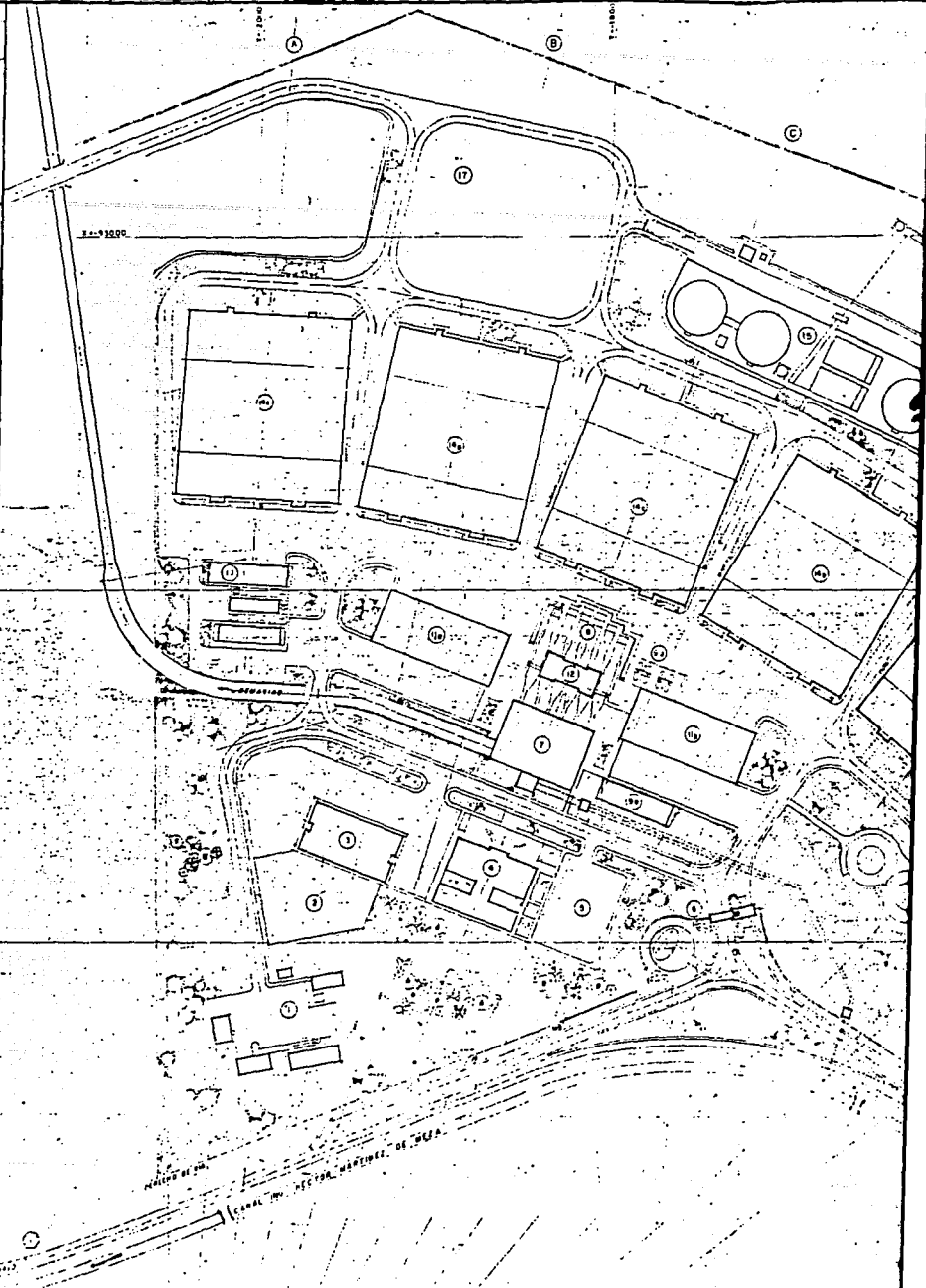
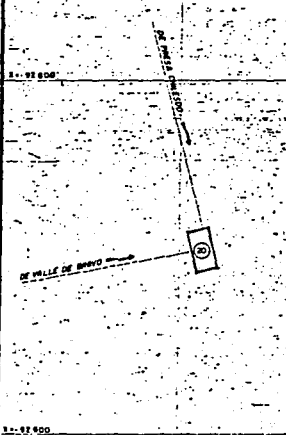
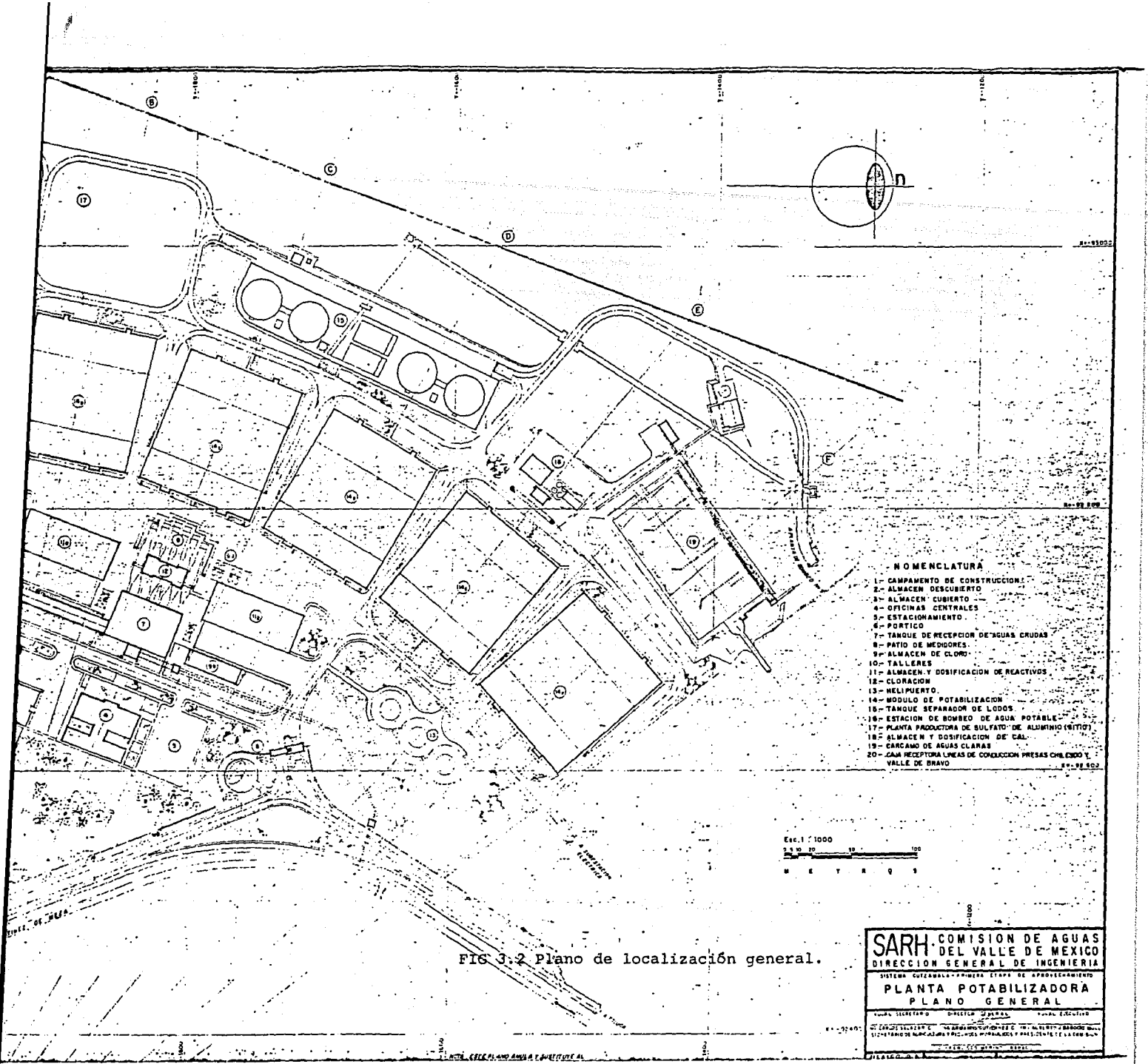


FIG 3.1 Principales fuentes de abastecimiento



LOCALIZACION ESC. 1:50000



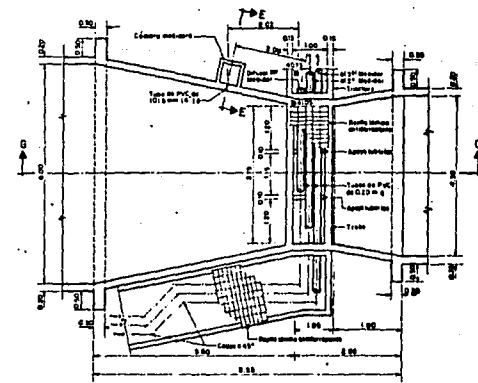
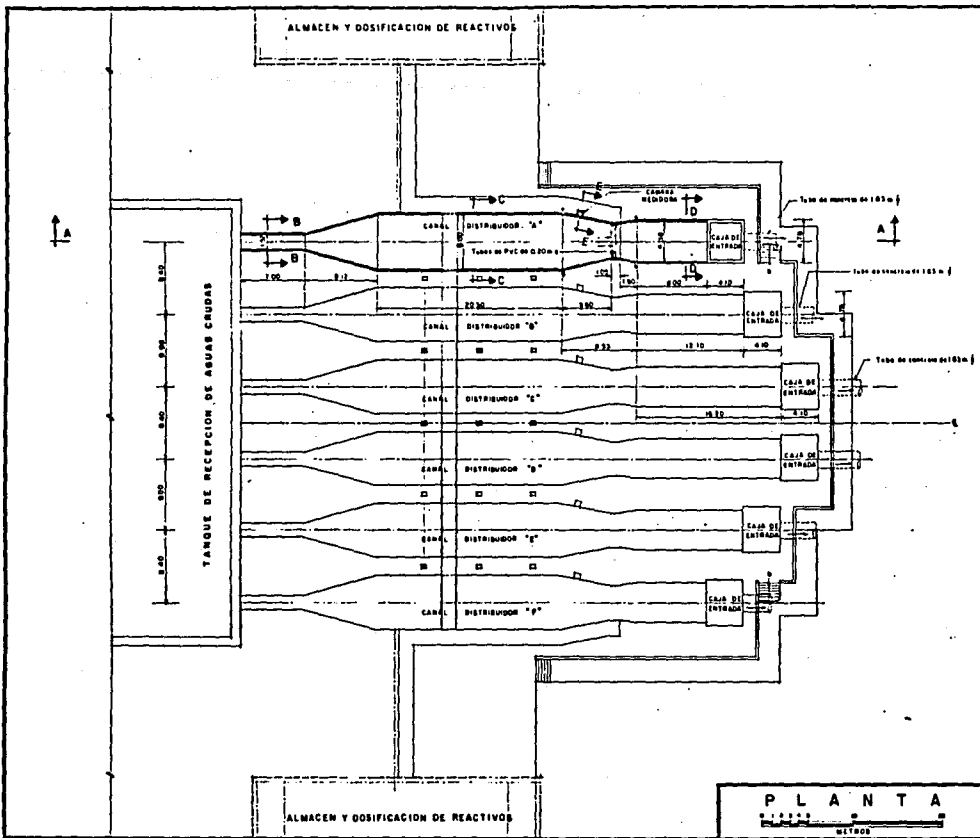


- NOMENCLATURA**
- 1- CAMPAMENTO DE CONSTRUCCION
 - 2- ALMACEN DESCUBIERTO
 - 3- ALMACEN CUBIERTO
 - 4- OFICINAS CENTRALES
 - 5- ESTACIONAMIENTO
 - 6- PORTICO
 - 7- TANQUE DE RECEPCION DE AGUAS CRUDAS
 - 8- PATIO DE MEDIDORES
 - 9- ALMACEN DE CLORO
 - 10- TALLERES
 - 11- ALMACEN Y DOSIFICACION DE REACTIVOS
 - 12- CLORACION
 - 13- MELIPIERTO
 - 14- MODULO DE POTABILIZACION
 - 15- TANQUE SEPARADOR DE Lodos
 - 16- ESTACION DE BOMBEO DE AGUA POTABLE
 - 17- PLANTA PRODUCTORA DE SULFATO DE ALUMINIO (STIPI)
 - 18- ALMACEN Y DOSIFICACION DE CAL
 - 19- CARGAMO DE AGUAS CLARAS
 - 20- CANAL RECEPTOR LINEAS DE CONDUCCION PRESAS CHILCENDU Y VALLE DE BRAVO

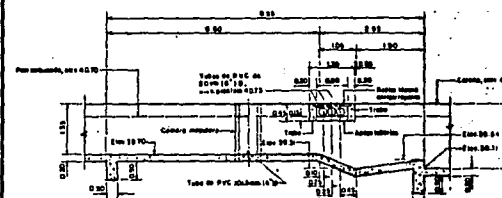
Esc. 1 : 1000
 0 20 40 60 80 100
 M E T R O S

FIG 3:2 Plano de localización general.

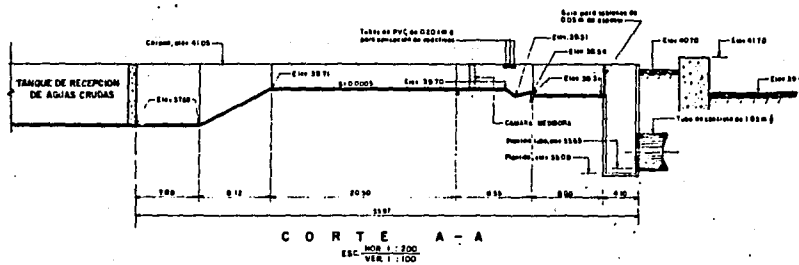
SARH COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO		
DIRECCION GENERAL DE INGENIERIA		
SISTEMA CUICUILCAN-PRIMERA ETAPA DE APROVECHAMIENTO		
PLANTA POTABILIZADORA		
PLANO GENERAL		
SECRETARIO	DIRECCION GENERAL	SECRETARIO
SECRETARIO	DIRECCION GENERAL	SECRETARIO



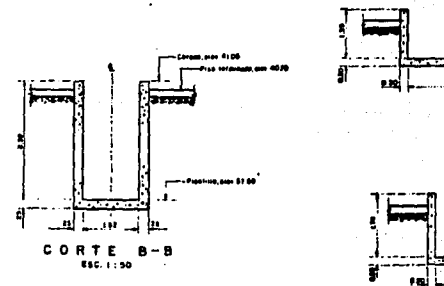
PLANTA
MEDIDORES PARSHALL
ESC. 1:50



CORTE G-G
ESC. 1:50



CORTE A-A
ESC. 1:100
VER. 1:100

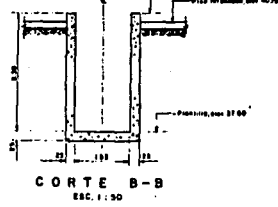
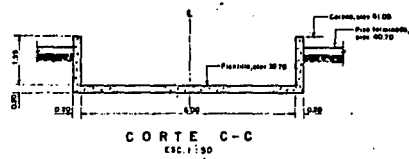
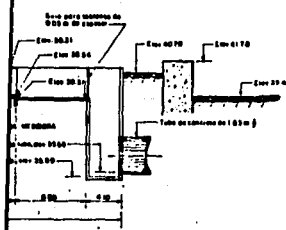
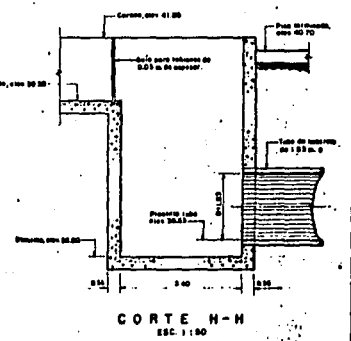
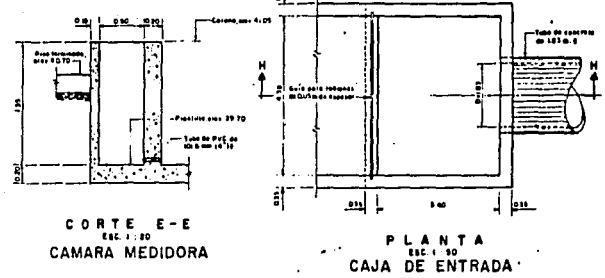
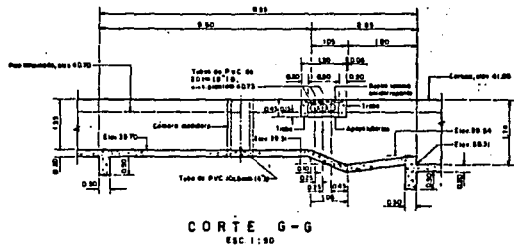
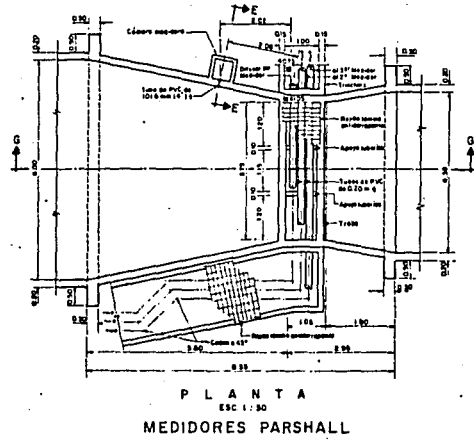
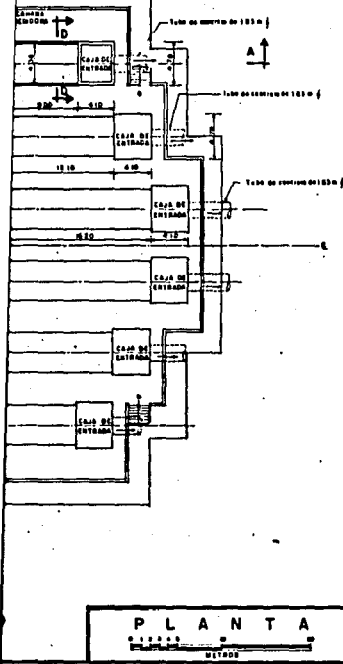


CORTE B-B
ESC. 1:50

Propiedad de S.A. de C.V. Dirección de Estudios y Diseños
 Autor: [Illegible] Diseñador: [Illegible]
 Aprobado: [Illegible] Verificado: [Illegible]
 No. de Proyecto: [Illegible] No. de Hoja: [Illegible]

CANALES DISTRIBUIDOS

FIG 3.3 Canal Parshall y sistema de reactivo



NOTAS:
1 - Acotaciones y alineamiento de canales
2 - Para referir las elevaciones de Bordo Sólido de Arrieta, cota 2500 m.

FECHA: M O D I F I C A C I O N REVISADO REVISOR APROBADO

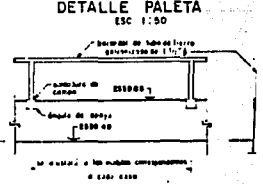
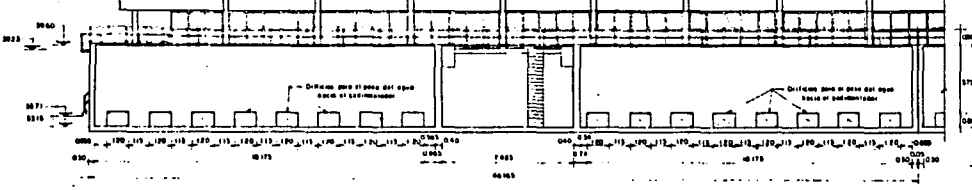
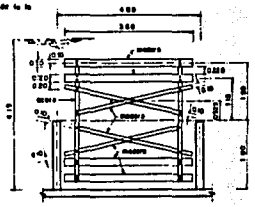
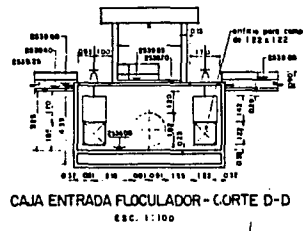
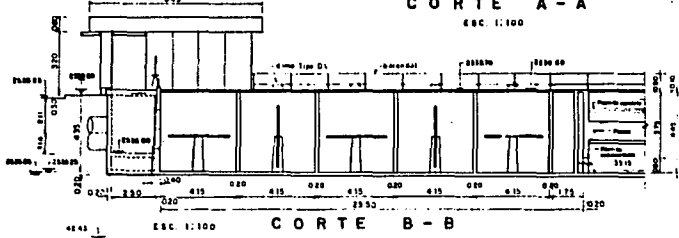
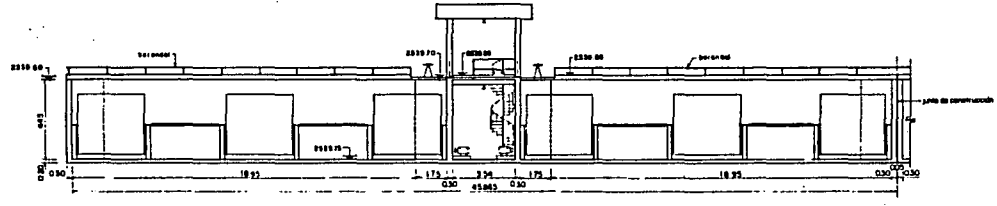
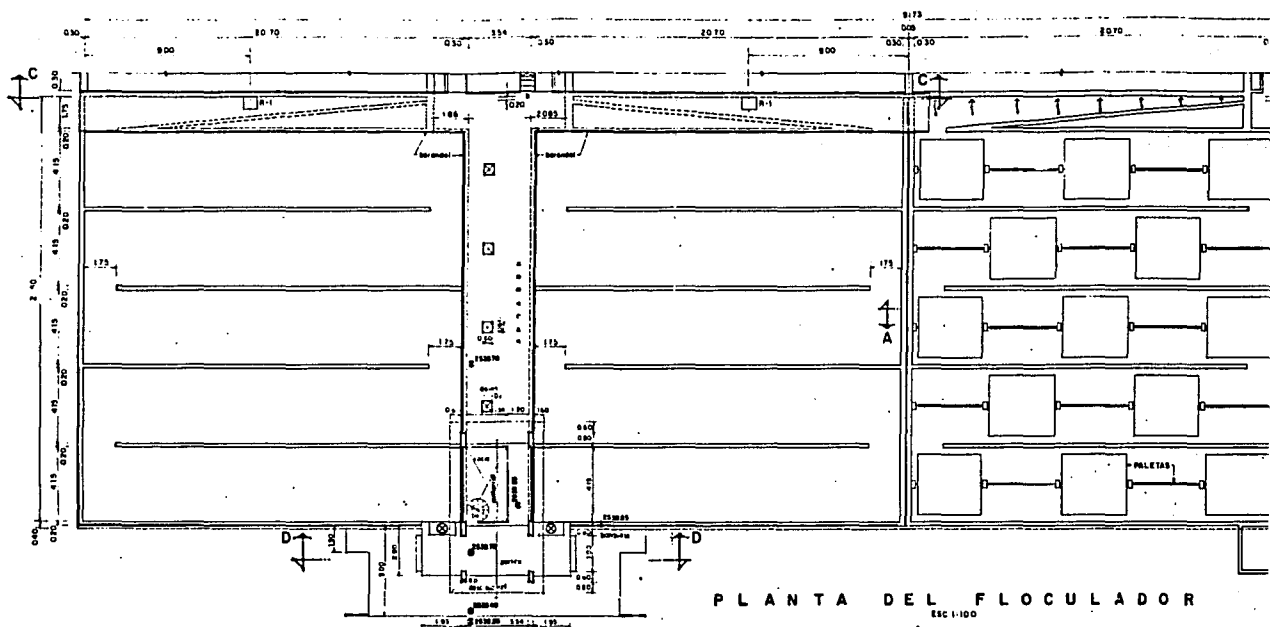
SARH. COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO
DIRECCION GENERAL DE INGENIERIA

SISTEMA CUIFANAL - PRIMERA ETAPA DE APROVECHAMIENTO
PLANTA POTABILIZADORA
CANALES DISTRIBUIDORES DE AGUAS CRUDAS Y MEDIDORES PARSHALL

VOCAL SECRETARIO DIRECTOR GENERAL VOCAL EJECUTIVO

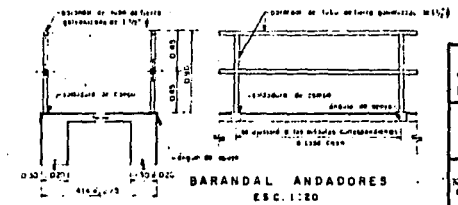
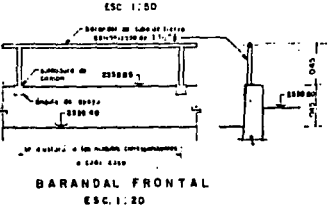
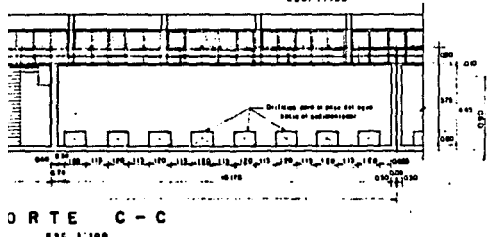
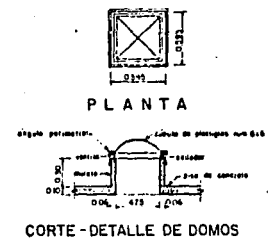
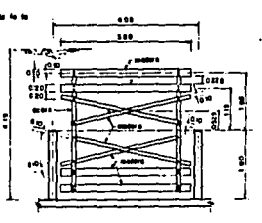
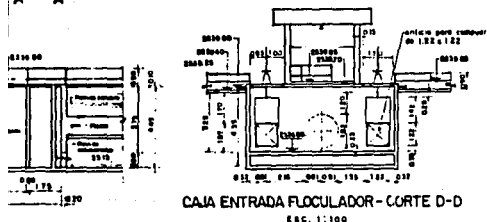
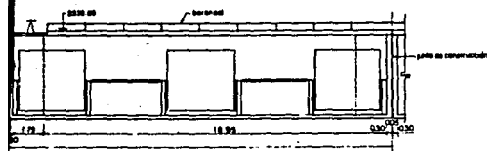
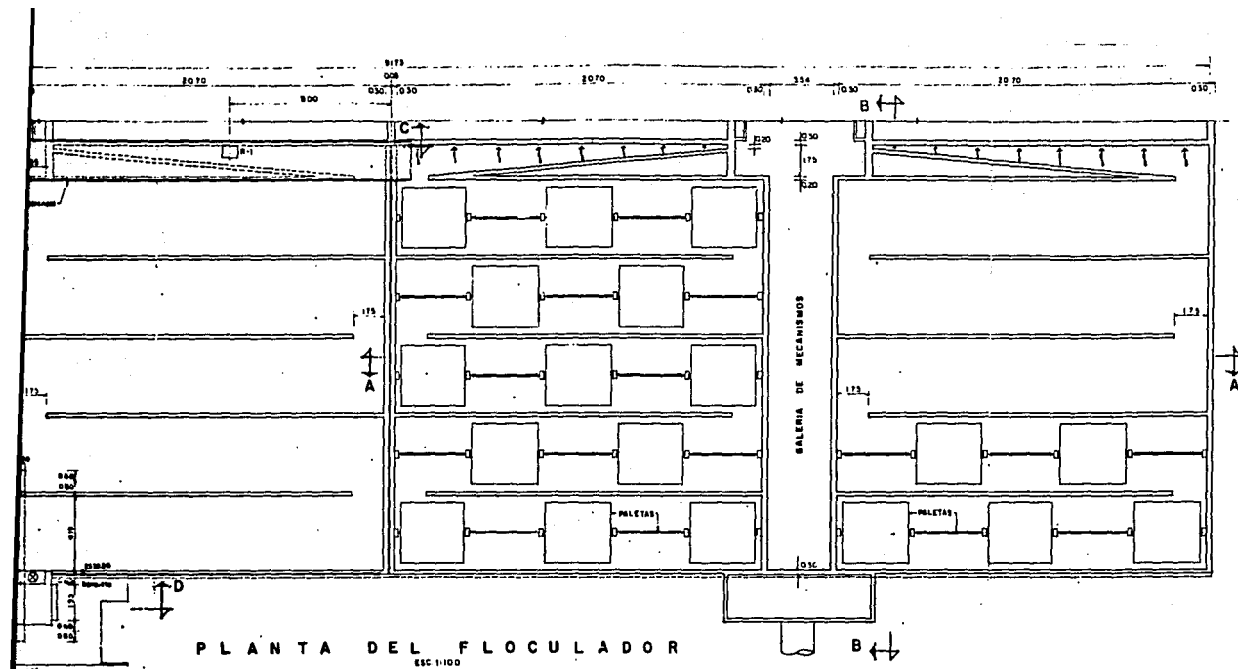
MEXICO, D.F. MARZO - 1976 CA-D-13-1176

CANALES DISTRIBUIDORES
FIG 3.3 Canal Parshall y sistema de dosificación de reactivos.



Propiedad Sr. JAVIER CUADERO MORENO D. Prop. Sr. JUAN RAMON MARTINEZ	DIRECCION DE ESTUDIOS Y DISEÑOS Sr. RICARDO FRECHMAN CADIZ Sr. RAMON F. P. GARCIA	NOTA: ESTE PLANO ANULA Y SUSTITUYE AL DE DICIEMBRE DE 1978, CA-0-13-1138
---	---	--

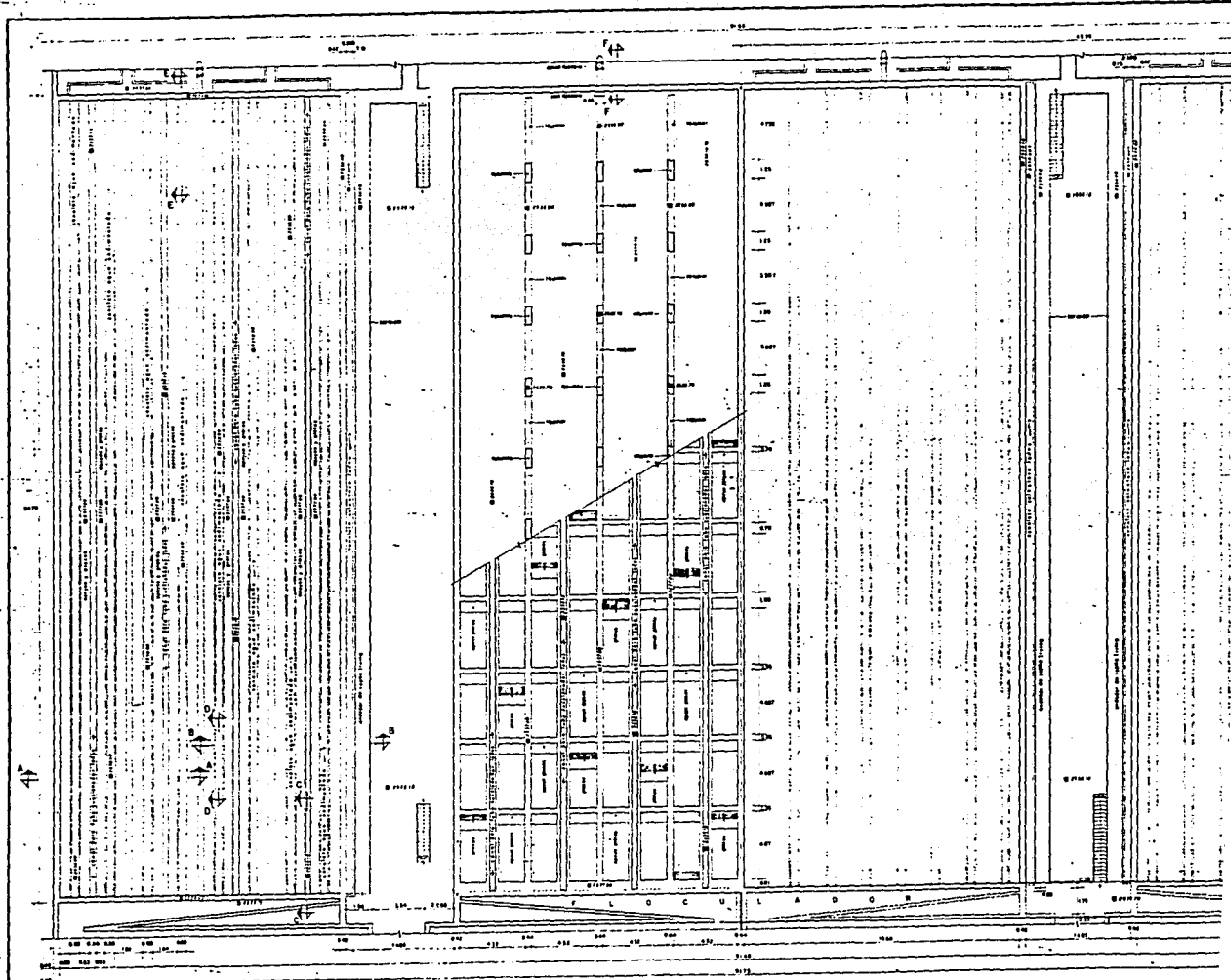
FIG 3.4



PLANO ANEXO Y SUSTITUYE AL DE DICIEMBRE DE 1976, CA-D-13-1139

SARH - COMISION DE AGRI		
DEL VALLE DE MEJ		
DIRECCION GENERAL DE INGENI		
PLANTA POTABILIZADOI		
FLOCULADOR		
FUNCIONAL		
VICEL SECRETARIO	DIRECTOR GENERAL	SECRETARIO
SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRICOS Y PREVENCIÓN DE LA		
P. FRANCISCO MENDOZA ROSAS		
MIÉRCOLES 7	FEBRERO 1980	CA-D-13-1

FIG 3.4 Plano general de los floculadores.



P L A N T A G E N E R A L

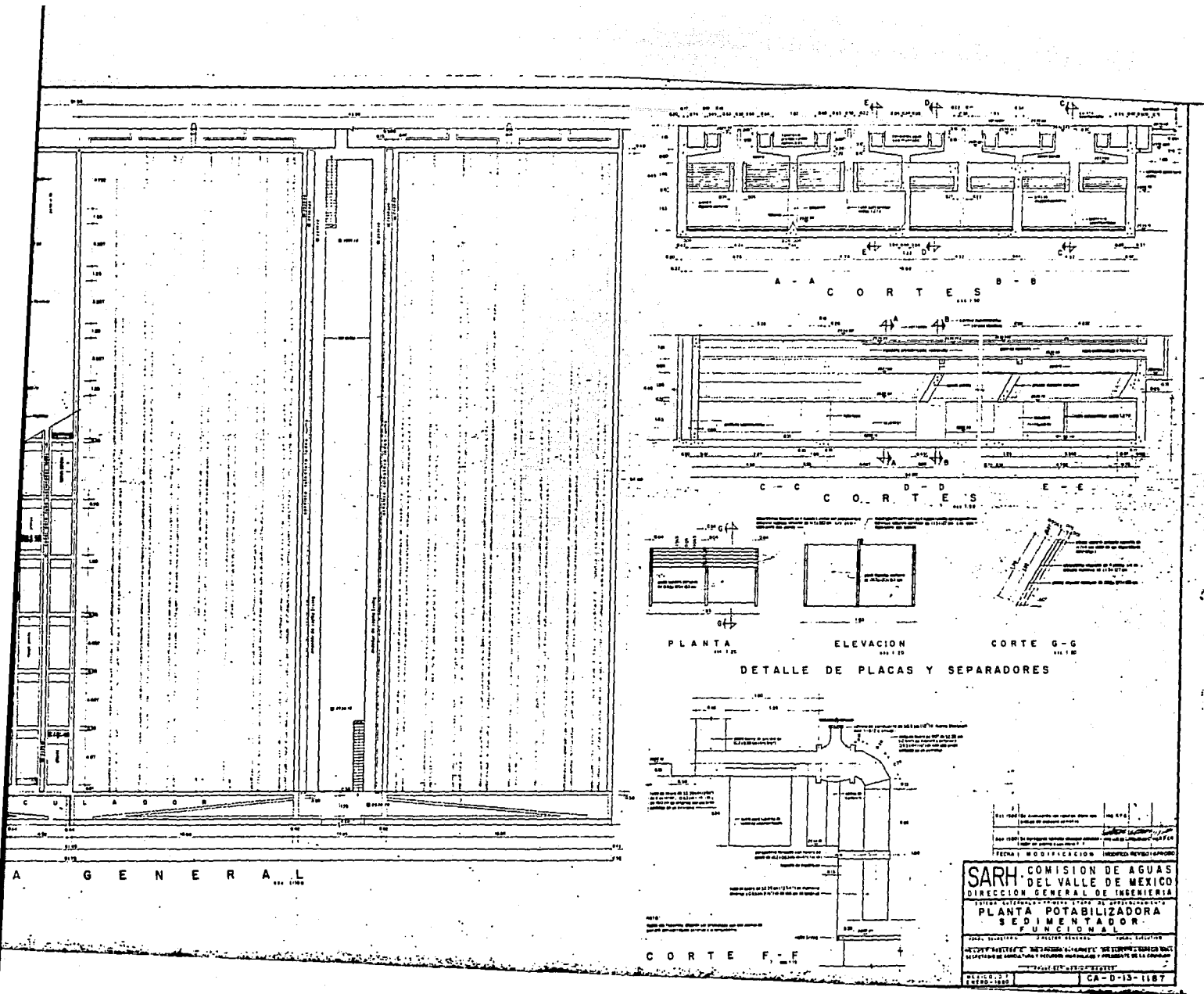


FIG 3.5 Plano general de los sedimentadores.

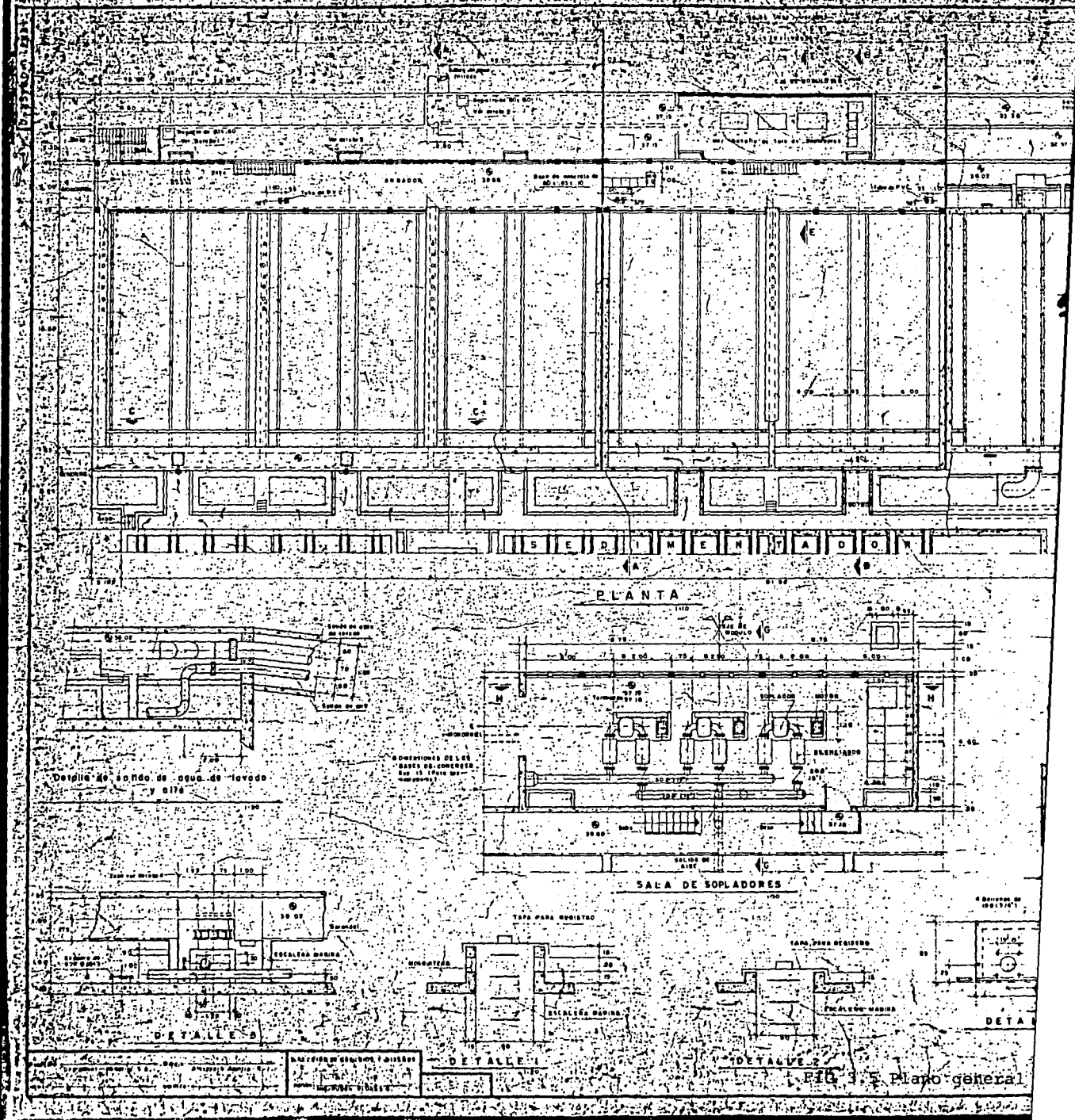
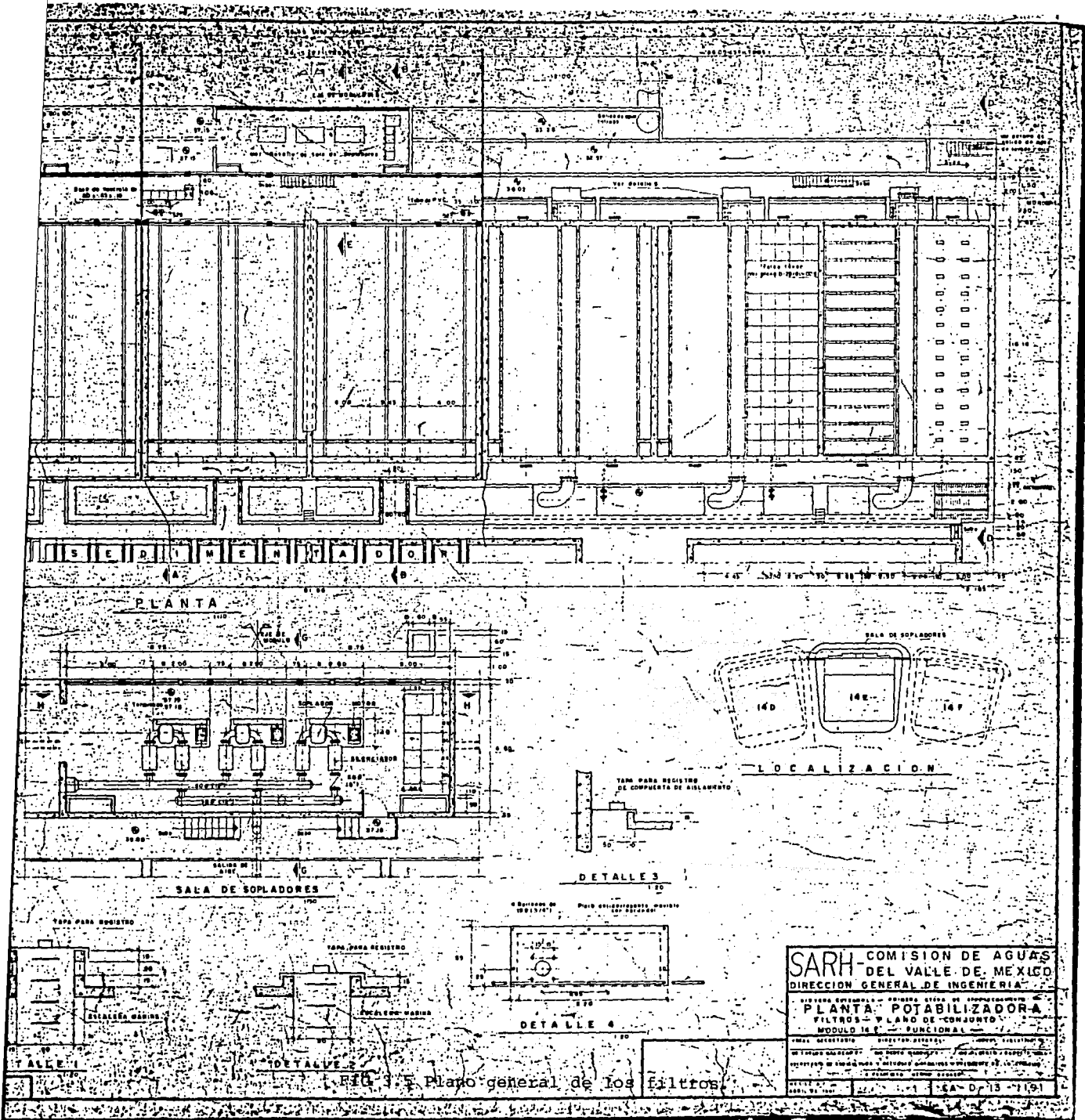


FIG. 3. Plano general



SARH - COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO
DIRECCION GENERAL DE INGENIERIA

PLANTA POTABILIZADORA
FILTROS - PLANO DE CONJUNTO
MODULO 14 - FUNCIONAL

PROYECTO: ...
 DISEÑO: ...
 EJECUCION: ...
 APROBADO: ...
 FECHA: ...

13-1191

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental tuvo como objeto definir las tasas de lavado de agua y aire más adecuadas para la planta de Los Berros en función de la expansión del medio filtrante y de la pérdida de arena. Con este fin se simularon las condiciones de los filtros de la planta en un piloto del Instituto de Ingeniería.

4.1 Descripción del filtro piloto.

El sistema experimental consta de:

- Una columna de filtración.
- Línea de alimentación de agua de lavado.
- Línea de alimentación del aire de lavado.
- Línea de descarga del agua de lavado.
- Trampa de arena.

4.1.1 Columna de filtración.

La columna de filtración es un cilindro de acrílico de 15 cm. de diámetro y 3.0 m de altura que descansa sobre una estructura de hierro colado. La parte inferior de la columna tiene dos entradas una para el aire y otra para el agua. En la parte superior, a 2.50 m, se encuentra la salida del agua la cual simula la canaleta de lavado (FIG 4.1 y 4.2).

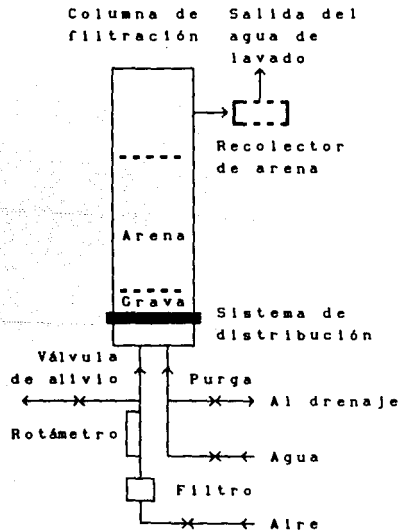


FIG 4.1 Diagrama del sistema experimental de filtración y fotografía del filtro piloto.

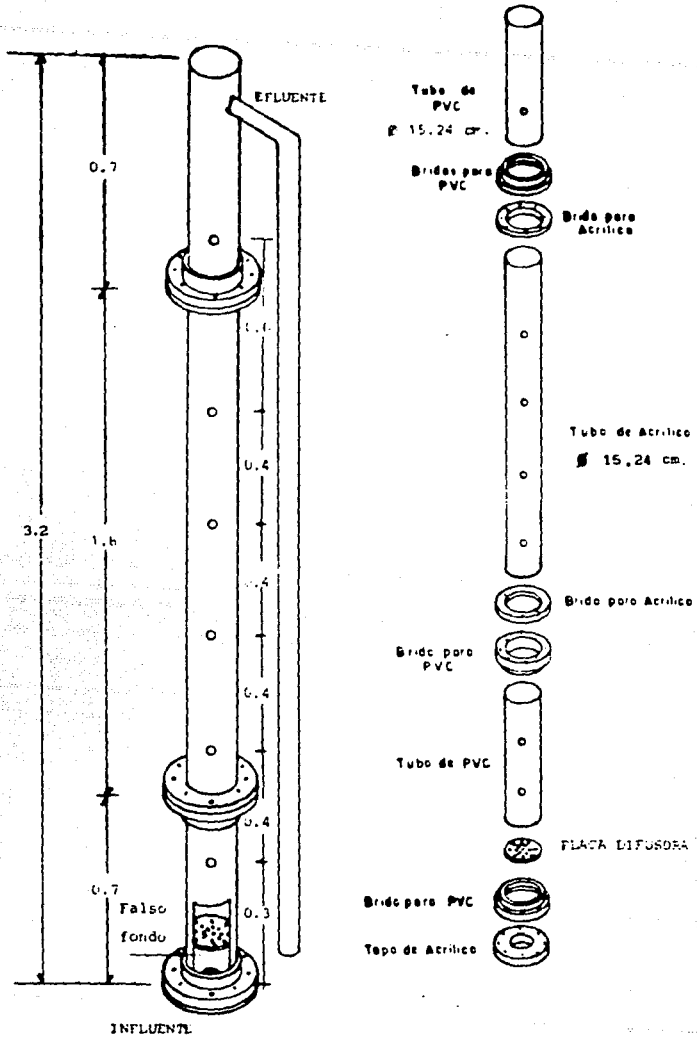


FIG 4.2 Esquema del filtro.

El sistema de distribución es similar al que tienen los filtros de La Planta (espreas) y, para que el sistema de distribución fuera equivalente, de acuerdo con el área disponible en la columna se colocó sólo una boquilla. La boquilla que se utilizó (boquilla cola larga) es igual a la que tienen los filtros.

El filtro se llenó con arena de un lote de repuesto que tienen en La Planta y cuyas características son: T.E. = 1 C.U. = 1.51 ρ = 2.65. El análisis granulométrico se efectuó de acuerdo con la metodología propuesta en el ANEXO.

La altura del lecho se varió con el objeto de representar exactamente las condiciones que existen en La Planta, ya que la altura de los lechos varía en cada filtro.

4.1.2 Línea de alimentación de agua de lavado.

La alimentación se tomó de la red de agua potable de Ciudad Universitaria, por medio de una tubería de 3.81 cm de diámetro y dos válvulas de compuerta que controlaron la entrada de agua y la purga. El gasto se determinó mediante la ecuación de continuidad

$$Q = v * A \quad (4.1)$$

donde

Q: gasto, m³/h

v: velocidad, m/h

A: área, 0.182 m²

La velocidad se calculó a partir del tiempo en que tardaba en correr el agua una distancia de un metro en la columna de acrílico.

4.1.3 Línea de alimentación de aire de lavado.

Para la alimentación de aire se utilizó un compresor de 5 Hp de potencia, con un tanque de 302 L de capacidad que permite mantener una presión de 12 kg/cm². Para la conducción se utilizó tubería de PVC de 2.54 cm. La dosificación de aire se efectuó con un rotámetro con escala de 9 a 46 L/min y válvula de regulación.

4.1.4 Línea de descarga del agua de lavado.

Esta línea (3.81 cm de diámetro) se encuentra conectada a la parte superior de la columna y lleva el agua del lavado al drenaje. Tiene la función equivalente a la canaleta de lavado.

4.1.5 Trampa de arena.

Es una malla de poliestireno que se encuentra sujeta a un aro de acrílico de 15 cm de diámetro colocada a la salida de la línea de descarga. Se empleó para recolectar la arena que sale durante el lavado y cuantificar las pérdidas.

4.2 Procedimiento experimental.

Se realizaron 128 ensayos, 88 de los cuales simularon lavados con agua-aire en forma simultánea manteniendo constante la tasa de agua (a 14 m/h que es la que se tiene en Los Berros) y variando la tasa de aire en un intervalo de 30 a 100 m/h. Los otros 40 ensayos simularon lavados sólo con agua variando la tasa de lavado en un intervalo de 10 a 50 m/h. En ambas corridas se variaron los espesores del lecho.

4.2.1 Variables experimentales.

4.2.1.1 Altura del lecho.

Las alturas del medio filtrante en el filtro piloto fueron: 0.18 m, 0.43 m, 0.50 m, 0.80, 1.00, 1.20 y 1.30. Alturas que fueron seleccionadas de acuerdo con las condiciones en que se encuentran los filtros de "Los Berros".

4.2.1.2 Tasa de aire y agua de lavado.

Ambas tasas se seleccionaron tomando como base las empleadas actualmente en la planta. Las velocidades de aire aplicadas fueron de 30, 40, 50, 55, 60, 80, 90 y 100 m/h, las dos últimas (90 y 100 m/h) se emplearon únicamente con alturas de lecho de 0.80, 1.00 y 1.30 m. Las tasas de agua estudiadas fueron de 14 y 25 m/h.

4.2.2 Corridas experimentales.

Para cada altura del lecho se hicieron tres tipos de ensayos (TABLAS 4.1 y 4.2). Las condiciones se basaron en lo siguiente:

- a) Velocidad de agua constante e igual a 14 m/h y tasa de aire variable.
- b) Tasa de agua constante (25 m/h) y la tasa de aire variable.
- c) Lavar con sólo agua a velocidad variable.

TABLA 4.1 CORRIDAS EXPERIMENTALES CON TASA DE AGUA CONSTANTE.

ALTURA DEL LECHO (m)	TASA DE AGUA (m/h)	TASA DE AGUA (m/h)	TASAS DE AIRE (m/h)
0.40	25	14	30 40 50 55 60 80
0.50	25	14	30 40 50 55 60 80
0.80	25	14	30 40 50 55 60 80 90 100
1.00	25	14	30 40 50 55 60 80 90 100
1.20	25	14	30 40 50 55 60 80 90 100
1.30	25	14	30 40 50 55 60 80 90 100

TABLA 4.2 CORRIDAS EXPERIMENTALES CON TASA DE AGUA VARIABLE.

ALTURA DEL LECHO (m)	TASA DE AGUA (m/h)
0.40	40 45 49 52
0.50	10 14 20 30 40 50
0.80	10 14 20 30 40 50
1.00	10 14 20 30 40 50
1.20	10 14 20 30 40 50
1.30	10 14 20 30 40 50

4.2.3 Parámetros de seguimiento.

Para conocer el efecto de las diferentes tasas de agua y aire empleadas en cada altura del lecho se determinó la expansión y la pérdida de arena para cada combinación de variables.

4.2.3.1 Expansión.

Se determinaron las expansiones mínimas, media y máxima para cada corrida utilizando un expansómetro de 1.30 m de altura con vasos colectores de arena cada 5 cm (FIG 4.3). Para determinar las expansiones se introdujo el expansómetro a la columna de filtración antes de aplicar los gastos de lavado y se midieron las alturas alcanzadas por la arena durante el lavado.

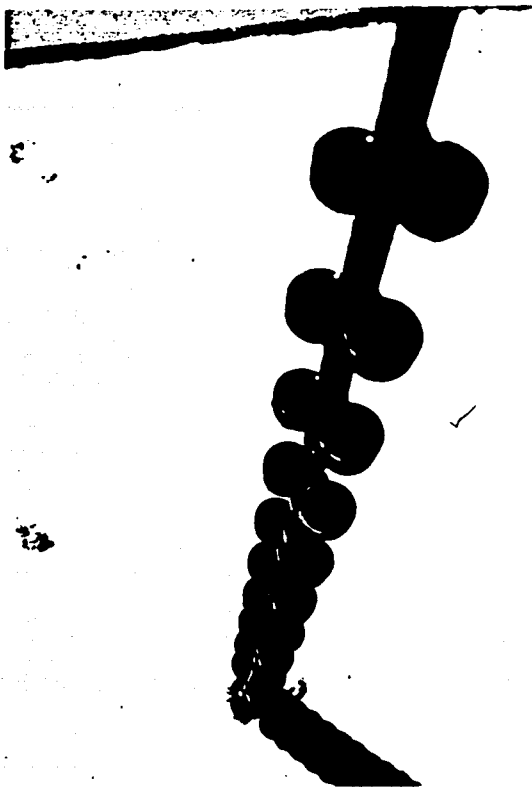


FIG 4.3 Expansómetro.

La expansión se determinó mediante la siguiente formula

$$\% E = \frac{L_e - L}{L} \quad (4.2)$$

donde

- % E : por ciento de expansión
- L_e : espesor inicial del lecho
- L : espesor del lecho expandido

Para tasas de agua sola inferiores a 40 m/h no se observó expansión.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.2.3.2 Pérdidas de arena.

La arena perdida se recolectó en una malla de acrílico y se cuantificó mediante diferencia de volumen.

4.3 Resultados.

Los principales resultados se encuentran en el capítulo 5. En la FIG 4.4 se presenta la altura que alcanza el lecho con relación a la canaleta para una velocidad de agua de 19 m/h y de aire de 30 a 100 m/h.

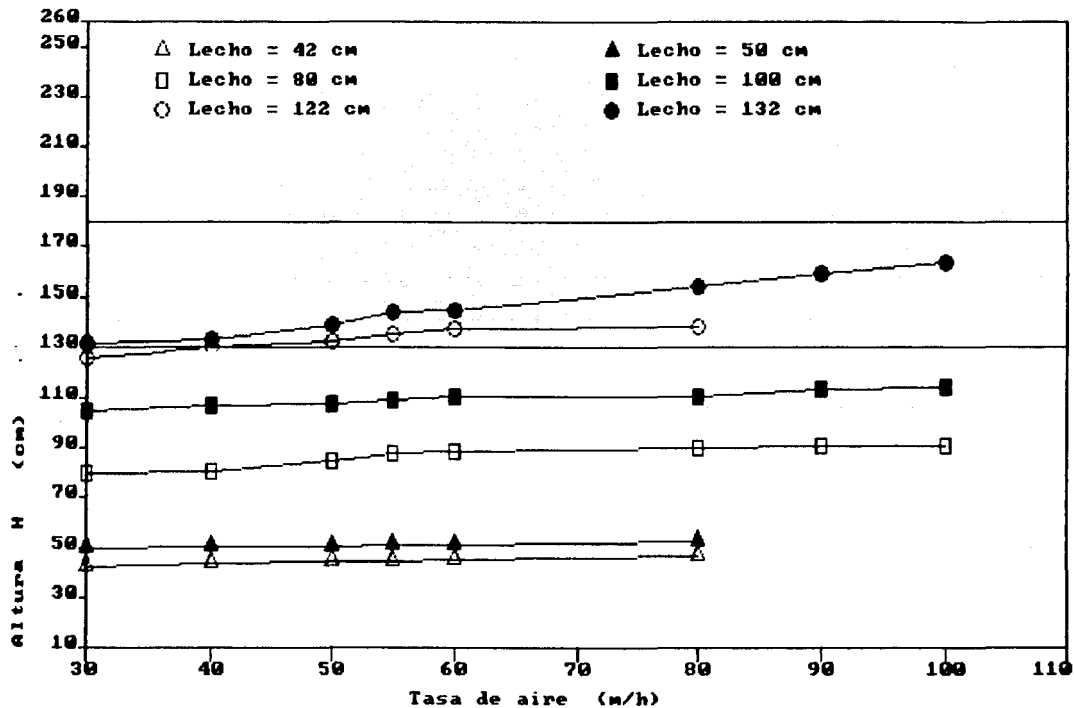


FIG 4.4 Altura del lecho con tasa de agua de 19 m/h.

5. EVALUACION DE LA OPERACION DE LA PLANTA LOS BERROS CON BASE EN LA REVISION BIBLIOGRAFICA, LA EXPERIMENTACION EN EL LABORATORIO Y EL TRABAJO DE CAMPO.

5.1. Condiciones de lavado.

De acuerdo con el CEPIS 1987 y los operadores de la planta la metodología que se usa en Los Berros es la siguiente:

- a) Introducción de aire a 55 m/h durante 1 minuto aproximadamente.
- b) Lavado con agua a 15 m/h y aire a 55 m/h durante 5 minutos según el CEPIS 1987 y 2 minutos de acuerdo con los operadores.
- c) Enjuague con agua a 15 m/h durante 5 minutos y barrido superficial durante un tiempo variable.

Sin embargo, a partir de las mediciones en campo se encontró que:

- a) La tasa de aire durante la primera etapa varía de 28 a 88 m/h.
- b) En la segunda etapa el agua entra a razón de 19 m/h y el flujo de aire aumenta ligeramente.
- c) El enjuague se realiza a la misma velocidad acompañado de un barrido superficial a 3.7 m/h.

Las duraciones de cada etapa son variables de tal forma que el tiempo total de lavado oscila entre 7.5 y 15 min.

Durante las primeras visitas el tiempo de lavado era de 25 a 30 minutos el cual se redujo a la mitad con el objeto de perder una cantidad menor de arena. Esta medida es adecuada a corto plazo no obstante, puede conducir a un mayor ensuciamiento del lecho con el tiempo (formación de bolas de lodo, grietas y distribución deficiente de fluidos).

5.1.1 Tasa de aire.

Se observa una diferencia muy grande (de hasta 68 % ó 60 m/h) en la tasa como resultado de la posición de los filtros con respecto a los compresores y si se emplean los dos o uno solo. En efecto, los filtros que están más cerca de los compresores (3E y 5E, y en general todo el módulo E) son los que registran las velocidades más altas; los filtros más alejados (2D y 6F) presentan valores bajos.

5.1.2 Lavado con agua-aire.

En esta etapa al introducir el agua, la tasa de aire generalmente aumenta con excepción del filtro 3E, que presentó una mala distribución en la mitad de la cámara A probablemente debido a un taponamiento de espreas. La tasa de agua es constante e igual a 19 m/h para todos los filtros.

Lo más relevante de esta etapa -que de acuerdo con la literatura es la más efectiva para el lavado- es que tiene una duración variable entre 2 y 3 minutos y puede ser insuficiente para una buena remoción y transporte de sólidos (debe ser de 3 a 10 minutos). Durante esta etapa se observó que se perdía la mayor cantidad de arena.

En la FIG 5.1 se muestra que en el laboratorio (con buena distribución y arena limpia) no se sale el empaque para ningún gasto de aire (30 a 100 m/h) ni aún con agua a 25 m/h.

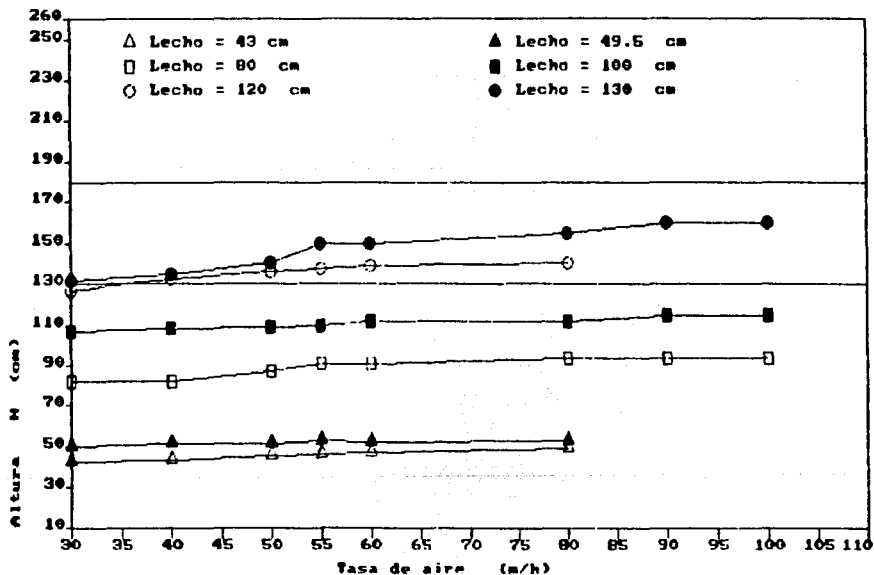


FIG 5.1. Altura de expansión del lecho en relación con la posición de la canaleta para una velocidad de agua de 25 m/h y aire de 30 a 100 m/h.

5.1.3. Lavado auxiliar y enjuague.

El lavado auxiliar empleado en la planta de Los Berros no corresponde con los comúnmente citados en la bibliografía (torniquetes hidráulicos, difusores estáticos, etc.). En la planta se utiliza una canaleta perforada colocada en las dos paredes del filtro que tienen el mismo sentido que la canaleta de lavado, y más que actuar como un auxiliar de abrasión, actúa como un método de barrido superficial.

La tasa de agua empleada en este sistema es de 3.7 m/h que resulta inferior al intervalo de 5 a 10 m/h señalado en la revisión bibliográfica. Además, este sistema no proporciona agua a presión como lo recomiendan los métodos tradicionales (7.0 mca Arboleda, 1969) y no favorece la fricción entre los granos.

Adicionalmente, se observó que se forman corrientes como producto de las direcciones de los flujos principales, a saber el de enjuague y el de barrido, llegando incluso a provocar zonas muertas. Por lo que se concluye que la entrada de agua por la canaleta no es un método de lavado auxiliar eficaz.

Con respecto al enjuague (introducción de agua en sentido ascendente a 19 m/h), en los métodos de lavado con aire y agua su finalidad es sacar las burbujas de aire retenidas en el empaque más que limpiar el medio de sólidos, por lo que una duración de 5 a 10 min es suficiente.

5.1.4 Lavado en general.

El método empleado en la planta no corresponde a ninguno de los dos tipos de lavado con aire reportados en la literatura (capítulo 2), sino que es una combinación de los dos.

Se constató durante las visitas de campo que no se cumple estrictamente una metodología pues, comúnmente, se alteran los procedimientos omitiendo etapas y variando los tiempos. Las causas de esta falta de estandarización son los desperfectos en motores de válvulas y aireadores. De tal forma, que aún cuando los filtros fueron diseñados y equipados para realizar el lavado en forma totalmente automatizada, el deterioro en estos equipos y la falta de mantenimiento han hecho que los operadores tengan que participar cada vez más en el proceso (control manual de válvulas y compuertas).

5.2. Altura del lecho

La altura de diseño del lecho filtrante es de 1.30 m, que cumple con las especificaciones para filtros rápidos con medio simple (Jiménez, *et al* 1988). Durante las visitas de campo y las campañas de medición se encontró que sólo dos filtros en una de

sus cámaras tienen el lecho completo (1F-A y 8D-A) y que en otros dos (2D-A y 5E-A) la arena se ha perdido totalmente (TABLA 5.1, visita No. 2).

Además, note como el espesor del lecho fue disminuyendo a lo largo del estudio debido a la pérdida de arena. En la TABLA 5.1 se presenta el porcentaje de pérdida registrada entre la visita No. 2 (1 de marzo, 1990) y la campaña No. 2 (5 de julio 1990), observe que varió de 4 % a 48 % y de 13 a 83 m³ en volumen. También se muestra el costo que representa esta pérdida. El costo unitario considerado para el cálculo es el reportado por el personal de la planta (276,811 \$/m³) para julio de 1990. Únicamente considerando los filtros en los cuales se llevó a cabo el muestreo salieron de ellos un total de 447.6 m³ de arena con un costo de 124'110,328 pesos en cuatro meses aproximadamente. En promedio por filtro y por lavado se pierden 621 L/lavado.

TABLA 5.1 ALTURA DEL LECHO FILTRANTE (m).

Filtro	Lecho	Visita No. 2	Visita No. 3	Campaña No. 1	Campaña No. 2	% P	Volumen (m ³)	Costo (\$)
1E	A	1.10	1.10	1.07	1.00	15	57.6	15'944 314
	B	1.25	1.25	1.05	0.99			
1F	A	1.30	1.30	1.23	1.21	10	40.0	11'072 440
	B	1.20	1.20	1.08	1.04			
2D	A	0.00	0.40	0.45	0.17	37	59.2	16'387 211
	B	1.00	0.60	0.65	0.46			
3D	A	1.20	1.20	1.18	1.18	31	83.2	23'030 675
	B	0.50	0.50	0.45	0.00			
4E	A	1.10	1.10	1.02	1.02	4	12.8	3'543 181
	B	1.10	1.10	1.10	1.10			
5E	A	0.00	0.20	0.12	0.08	27	43.2	11'958 235
	B	1.00	0.80	0.67	0.65			
6F	A	1.25	1.25	1.17	1.20	5	19.2	5'314 771
	B	1.20	1.20	1.10	1.13			
8D	A	1.30	1.30	1.09	0.90	18	67.2	18'601 699
	B	1.10	1.10	0.95	1.08			
8E	A	0.43	0.43	0.36	0.20	48	65.2	18'158 802
	B	0.43	0.43	0.38	0.25			

% P: Pérdidas como porcentaje de la altura inicial.

A partir de los datos recabados en campo se encontró que, por un lado, los lechos cuyo espesor es menor tienden a perder una cantidad mayor de arena (filtros 8E y 4E, TABLA 5.1 campañas 1 y

2) y por otro, que para un mismo filtro la cámara con menor espesor de lecho será la que pierda más empaque (filtro 3D, TABLA 5.1).

De acuerdo con la literatura se debe agregar empaque a los filtros cada vez que el espesor del lecho disminuya en 10 a 15% (de 13 a 20 cm en la Planta Los Berros). Esta regla no fue observada en la planta ya que, como se mostró en la TABLA 5.1 (Filtros 2D y 5E cámara A) se llegaron a medir espesores nulos en las primeras visitas. Situación que fue remediada por los operadores en las visitas subsiguientes al palear medio de una cámara a otra. Sin embargo, pudimos constatar que esta tarea es ardua ya que para elevar unos cuantos centímetros un lecho es necesario emplear 6 operadores una jornada. Por la falta de arena de repuesto ésta es tomada de la cámara contigua disminuyendo la altura del otro lecho. Por lo anterior se recomienda siempre contar con arena de repuesto y con un método eficiente de transporte y disposición en los filtros (grúa volante).

5.3. Expansión

En la TABLA 5.2 se presentan algunas de las expansiones medidas en la planta, que van desde 20% hasta 600%. Las expansiones son superiores al 100% para espesores de lecho inferiores a 0.5 m, mientras que para espesores superiores a 1 m, se encuentran en un intervalo de 20 a 35%. Estos resultados son de esperarse ya que ha sido demostrado que la expansión es una función inversa del espesor del lecho (Jiménez et al, 1989).

TABLA 5.2 PORCIENTO DE EXPANSION EN CUATRO FILTROS

Filtro	Cámara	Espesor del lecho, m	% de Expansión agua-aire *	% de Expansión aire *
D2	A	0.45	100	177
	B	0.65	38	92
E4	A	1.02	32	27
	B	1.10	22	18
E5	A	0.12	608	233
	B	0.67	27	10
E8	A	0.36	275	219
	B	0.38	255	202

* Lavado con un sólo soplador de aire

5.4. Problemas de operación.

Entre los principales problemas generados por un mal lavado se encuentran los siguientes:

- a) Pérdida de medio filtrante.
- b) Formación de aglomerados ("bolas de lodo").
- c) Agrietamiento del lecho.
- d) Formación de zonas con presión negativa.
- e) Desplazamiento de grava.

En la planta de los Berros se observaron estas anomalías, con excepción de la formación de zonas con presión negativa, como se ilustra en las fotografías de las FIG 5.2 a 5.4 y de las observaciones en campo en donde se encontró grava en la superficie (Ej. filtro 6F).

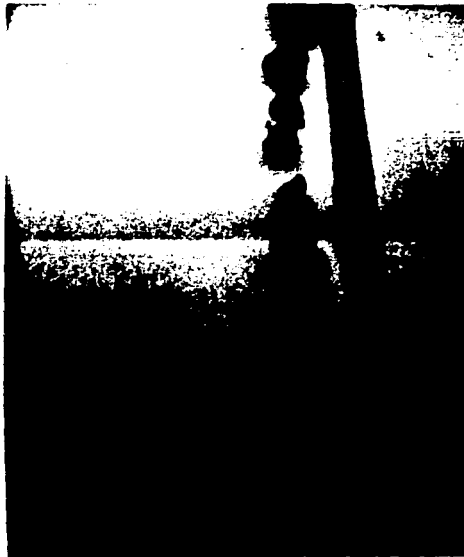


FIG 5.2 Aglomerados o "bolas de lodo " encontradas en los filtros.



FIG 5.3. Canaleta de lavado cubierta con arena después de un lavado.



FIG 5.4 Grietas en el lecho filtrante.

5.4.1. Pérdida de medio filtrante.

La medición de la altura del lecho permite conocer de forma rápida cuáles filtros pierden mayor cantidad de medio. En la sección 5.2 (TABLA 5.1) quedó cuantificado el problema.

Con el objeto de determinar las características de la arena que se pierde se efectuó un ensayo puntual cuyos resultados se muestran en la TABLA 5.3. La cantidad de arena perdida se determinó mediante una mampara colocada a un metro del tubo de salida del agua de lavado (FIG 5.5), la cual retuvo la arena, permitiendo su cuantificación.

TABLA 5.3 CANTIDAD DE ARENA PERDIDA DURANTE EL LAVADO (L)

FILTRO	ARENA (LITROS)	PORCENTAJE DE ARENA *
2D	140	0.277
8D	13	0.0082
3E	18	0.0095
5E	7	0.0132
2F	71	0.0484
4F	5	0.0028
5F	22	0.0286
6F	2.5	0.0013
TOTAL	278.5	

*porciento en relación al volumen total de arena contenido en el filtro durante el lavado

En la TABLA 5.1, visita No. 2 el filtro 2D presenta la mayor diferencia de altura entre cámaras (1 m) y el mayor registro de pérdida de arena durante un lavado (140 L). Por otra parte el filtro 6F presenta la menor diferencia de espesor entre lecho (0.07 m) y el menor registro de arena perdida (2.5 L) como se muestra en la TABLA 5.3. Este fenómeno se debe a la menor resistencia al flujo que existe en los lechos de menor espesor sin que se observe ninguna relación entre la pérdida de arena y la ubicación del filtro con respecto a los aireadores.

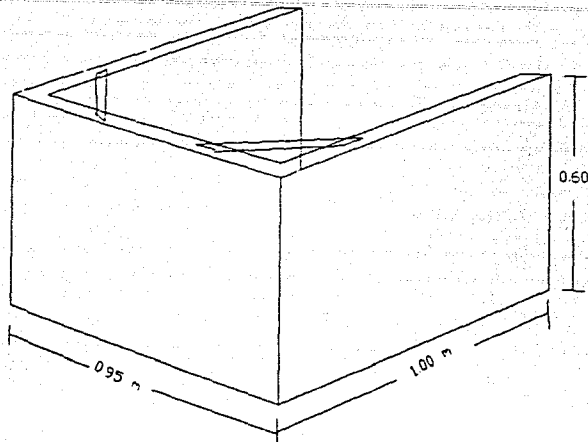


FIG 5.5 Mampara para recolección de arena.

Las características de la arena que se pierde durante el lavado se presenta en la TABLA 5.4. Se puede observar que se pierde arena de TE y densidad ligeramente superior a la especificada para el medio filtrante. Asimismo, no necesariamente se pierden los finos y en cuatro casos de siete la arena que sale tiene una densidad menor a la especificada. Más aún hubo casos donde se encontró grava en el efluente de lavado, por ejemplo en el filtro 5F, el 21 % del peso es > a 2.38 mm.

De acuerdo con la literatura la pérdida de arena se debe a:

- Altas tasas de lavado.
- Canaletas de recolección muy bajas.
- Modificación del peso específico del medio.
- Movimiento de la gravilla soporte que hace que la arena se escape por el fondo.

TABLA 5.4 CARACTERISTICAS DE LA ARENA QUE SE PIERDE DURANTE EL LAVADO

FILTRO	DENSIDAD (g/ml)	TAMANO EFFECTIVO (mm)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
8D	2.62	0.867	1.37
3E	2.63	0.818	1.47
5E	2.58	1.094	1.29
2F	2.55	1.012	1.26
4F	2.55	0.941	1.23
5F	2.49	1.213	1.32
6F	2.61	0.734	1.57
Media	2.57	0.954	1.36
Des. std.	0.05	0.165	0.12

A continuación se analiza cada uno de los problemas.

5.4.1.1 Altas tasas de lavado.- El cálculo de la velocidad mínima de fluidificación para los diferentes tamaños de partícula que componen la arena de Los Berros se muestra en la TABLA 5.5. Como se observa, la velocidad empleada del agua (19 m/h) es insuficiente para sacar al medio, pero suficiente para fluidificar los finos (0.59 mm).

TABLA 5.5 VELOCIDADES MINIMAS DE FLUIDIFICACION CALCULADAS.

Diámetro partícula (mm)	Temperaturas °C				
	10	15	20	25	30
2.38	130.73	151.40	167.53	180.47	200.06
1.68	69.35	80.32	88.87	95.74	106.14
1.41	50.42	58.39	64.61	69.60	77.16
1.19	37.02	42.88	47.45	51.11	56.66
1.16	35.34	40.93	45.29	48.79	54.08
0.96	25.04	29.00	32.09	34.57	38.33
0.80	17.97	20.81	23.03	24.81	27.50
0.59	10.33	11.96	13.23	14.25	15.80

Las velocidades están expresadas en m/h

Mediante la experimentación en laboratorio, se corroboró que la tasa de lavado de agua empleada no expande el lecho como se observa en la FIG 5.6.

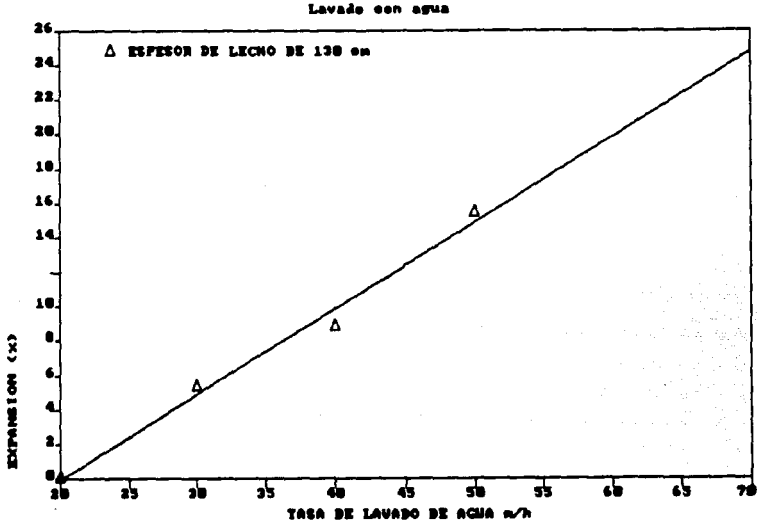


FIG 5.6 Expansión del lecho con diferentes velocidades de agua.

En el caso de alimentar aire (FIG 5.7) la máxima expansión posible (v agua de 19 m/h y v aire de 109 m/h) es de aproximadamente 30 % para un lecho de 1.30, es decir, la arena llegará hasta 1.69 m por debajo de la canaleta (1.80 m). Sin embargo, como 1.69 m es muy cerca de la salida es fácil que una burbuja de aire logre sacar arena. Por tanto, se recomienda no exceder de una expansión de 20% que para la tasa de agua de 19 m/h implica una velocidad máxima de aire de 90 m/h como máximo.

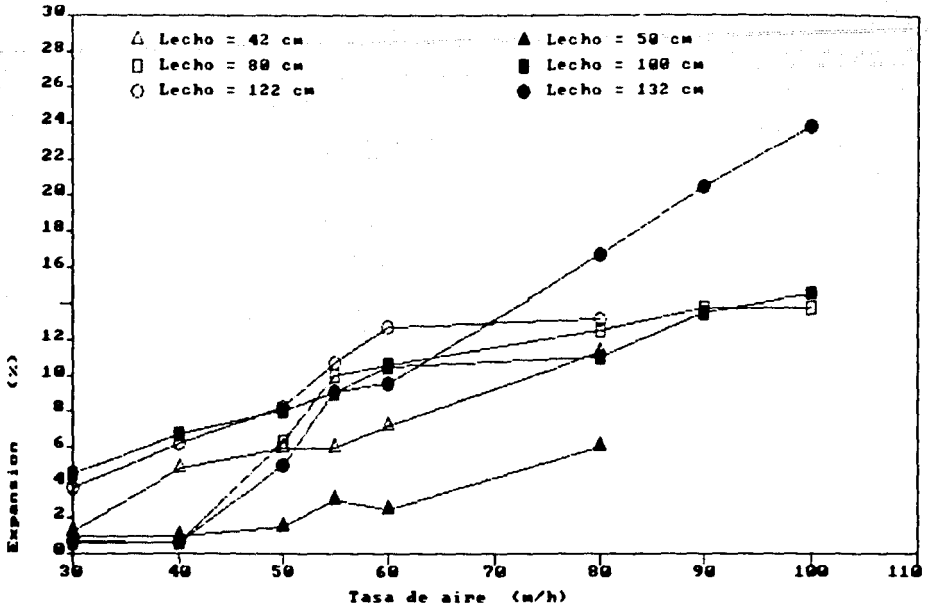


FIG 5.7 Expansión del lecho en función de la velocidad del aire con agua a 19 m/h.

5.4.1.2 Canaletas de recolección bajas.- Se realizó el análisis desde dos puntos de vista: en primer lugar, de acuerdo con la situación de diseño y en segundo, con base en las características actuales.

Situación de diseño:

Los filtros de la planta potabilizadora se construyeron considerando una altura mínima requerida por el falso fondo de 0.95 m, un espesor de arena de 1.30 m y un bordo libre para expansión de 0.50 m, que teóricamente permite expansiones hasta del 38%. Para el diseño se calculó la expansión del medio filtrante mediante la siguiente expresión (CEPIS, 1987)

$$\Delta E = \frac{e_e - e_o}{1 - e_o} \quad (5.1)$$

donde

e_o : porosidad inicial

e_e : porosidad del medio expandido.

c_e se estimó mediante la ecuación:

$$c_e = \left[\frac{v_a}{v_s} \right]^{0.22} \quad (5.2)$$

donde :

v_a : velocidad de lavado 0.4167 cm/s, (15 m/h).

v_s : velocidad de sedimentación de la partícula del medio filtrante de tamaño d_i , cm/s.

El CEPIS consideró como velocidad de diseño para el lavado 15 m/h en lugar de 19 m/h que fue el valor medido; partículas con tamaño efectivo de 0.95 mm, coeficiente de uniformidad de 1.6, espesor de lecho de 1.30 m y porosidad de 0.40. En la TABLA 5.6 se presenta el cálculo de expansión para estos valores.

TABLA 5.6 CALCULO DE EXPANSION DEL MEDIO FILTRANTE

No. de malla	d_i	v_s	v_a / v_s	$\left[\frac{v_a}{v_s} \right]^{0.22}$ (ki)	Ki- ϵ_0	Expansión
	2.0	27.70	0.0150	0.3972	-0.0028	-0.0163
10	2.0	25.48	0.0164	0.4046	0.0046	0.1472
12	1.68	23.70	0.0176	0.4111	0.0111	0.5936
14	1.41	19.40	0.0215	0.4296	0.0292	1.2650
16	1.19	16.60	0.0251	0.4446	0.0446	1.0349
18	1.00	15.20	0.0274	.4533	0.0533	0.1461
20	0.84	11.10	0.0375	0.4657	0.0857	0.9334
30	0.59	8.36	0.0498	0.5170	0.1170	0.0969
35	0.50	5.58	0.0747	0.5651	0.1651	0.0759
40	0.42	4.43	0.0941	0.5945	0.1945	0.0959
50	0.30	3.87	0.1077	0.6124	0.2124	0.2741
						ΔE 4.65%

Con base en la expansión calculada en el diseño (AE 4.65%) la altura de la canaleta de lavado es adecuada, pues el lecho alcanzaría una altura de 1.36 (44 cm de margen). Sin embargo, este procedimiento de cálculo no toma en cuenta el efecto del flujo de aire, el cual es significativo para tasas superiores tanto por aumentar la expansión como por arrastrar arena.

Posibilidades de emplear otros métodos de lavado.

Dependiendo de la velocidad de retrolavado con agua usada en el lecho filtrante se puede tener (Arboleda y Cleasby, 1979):

a) Todos los granos fluidificados, como producto de una alta velocidad de retrolavado, situación típica en Estados Unidos. Para el lavado con solo agua la velocidad de flujo se calcula de tal modo que sea capaz de iniciar la fluidificación de los granos más gruesos. Para la arena de los Berros, ésto implicaría una velocidad alrededor de 168 m/h a 20°C y por tanto la necesidad de un equipo de bombeo.

b) Granos finos fluidificados pero no los granos gruesos, a lo cual se le llama velocidad intermedia de retrolavado, practicada en La Gran Bretaña. El flujo de retrolavado se calcula para que la capa de la superficie se expanda un 20% aunque el material pesado localizado en el fondo no se expanda. La limpieza auxiliar con aire siempre se usa antes del retrolavado con agua a velocidad intermedia. Esto implicaría, para Los Berros, una velocidad de agua de 60 m/h.

c) Medio filtrante no fluidificado, se da cuando la velocidad de retrolavado es baja y se emplea en los países europeos. No hay expansión en las capas del fondo y muy poco en las capas superiores, por esta razón siempre se debe lavar con aire y agua simultáneamente. Este es el caso de la Planta Los Berros, dada la velocidad de lavado que se emplea (19 m/h).

Jiménez *et al.* (1989), desarrollaron una serie de modelos matemáticos para definir los criterios de diseño para el lavado de filtros en función del sistema de distribución. A continuación se presenta la ecuación correspondiente al volumen de arena perdido cuando se emplea boquillas cola larga y se lava con agua y aire.

$$\begin{aligned}
 Va = [& 1/510000 & (7609.986 & - 492.282*U_{\text{agua}} & + 25.702*U_{\text{aire}} \\
 & -1812.866*L & - 4766.1157*TE & + 7.961*U_{\text{agua}}^2 & + 1.013*U_{\text{aire}}^2 & + \\
 & 2395.436*L^2 & - 2.968*TE^2 & + 1.057*U_{\text{agua}}*U_{\text{aire}} & + 275.357*U_{\text{agua}}*L & - \\
 & 0.174*U_{\text{agua}}*TE & + 293.283*U_{\text{aire}}*L & - 413.204*U_{\text{aire}}*L & & - \\
 & - 413.204*U_{\text{aire}}*TE & + 5.113*TE*L] & & & (5.3)
 \end{aligned}$$

donde

Va : volumen de arena perdido/volumen de medio filtrante en un lavado, m^3/m^3

v : velocidad, m/h

L : espesor del lecho, m

TE : tamaño efectivo de la arena, mm

A partir de la ec 5.4 y al considerar que el volumen de arena en un filtro es igual a $160 m^2$ (área de filtración) multiplicado por el espesor de lecho se construyó la TABLA 5.7 donde se obtiene el volumen de arena perdido por lavado en los filtros de Los Berros y el número de lavados que deben transcurrir para que el filtro pierda 10 cm de lecho y sea necesario adicionar arena. La simulación se efectuó para dos espesores de lecho: 1.30 (espesor de diseño) y 1.20 m. Debido al costo y dificultad que representa modificar el gasto de agua, que se introduce por diferencia de niveles, y no por bombeo se decidió sólo variar la tasa de aire.

TABLA 5.7 CALCULO DE LA ARENA PERDIDA DURANTE EL LAVADO Y DEL NUMERO DE LAVADOS QUE SE PODRIAN EFECTUAR SIN NECESIDAD DE REPONER ARENA.

$$L = 1.30 \text{ y } L = 1.20 \text{ m}$$

$$v_{\text{agua}} = 19 \text{ m/h}$$

L = 1.30				L = 1.20			
v _{aire} m/h	Va m ³ /m ³	VaL m ³ /lav	No.L	v _{aire} m/h	Va m ³ /m ³	VaL m ³ /lav	No.L
100	0.0210	4.370	3.7	100	0.0160	3.33	4.8
80	0.0120	2.500	6.4	80	0.0080	1.66	9.6
60	0.0050	1.040	15.0	60	0.0020	0.42	38.0
55	0.0038	0.790	20.3	55	0.0012	0.25	64.0
40	0.0013	0.270	59.3	50	0.0001	0.01	1600.0
35	0.0000	0.000	-	40	0.0000	0.00	-

VaL : volumen de arena perdido por lavado
No.L: número de lavados

De la TABLA 5.7 se desprende que para el espesor de 1.30:

a) Se pierde mucha arena aún cuando se emplee una velocidad de aire de 40 m/h; la reposición de $16 m^3$ de arena ($0.10 m * 160 m^2$) se efectuaría cada 59 lavados, es decir, aproximadamente cada dos

meses si se lava diario o cuatro si es cada 48 h, con un costo de 4'428,976 pesos por filtro.

b) Para no tener pérdida de arena se debería emplear una velocidad de alrededor de 35 m/h que, muy probablemente, combinada con una tasa baja de agua (19 m/h) provoque un lavado deficiente del lecho (expansión de 1 %, FIG 5.7).

En cambio, si se disminuye el espesor del lecho en 10 cm, ($L = 1.20$) se puede emplear una velocidad de 50 a 55 m/h (expansión entre 8 y 10 % con posibilidad de ser mayor por el burbujeo) siendo necesario de 64 a 1600 lavados para perder 10 cm de lecho. Esta disminución, no afectará en mucho el rendimiento de filtración ni la duración de la corrida ya que de acuerdo con Kawamura (1975) el espesor activo de un lecho de 0.95 mm de T.E., y porosidad de 0.4 (especificaciones de la arena de Los Berros) es de 0.80 m.

5.4.1.3 Modificación del peso específico del medio.- El peso específico de la arena se modifica cuando se le adhiere material menos denso. Este caso es frecuente cuando se procesa el agua para ablandarla con cal y sosa y la recarbonatación es incompleta, o bien, cuando se alcaliniza el agua antes de filtrarla. En la planta de los Berros, se emplea sulfato de aluminio como floculante por lo que éste no es un problema que se presente como lo confirman los datos de la TABLA 5.4.

5.4.1.4 Movimiento de la gravilla soporte que hace que la arena se escape por el fondo.- La distribución irregular de los fluidos de lavado provoca el desacomodo del soporte de grava. En la planta se pudo corroborar la presencia de grava en la canaleta y en los tanques de recirculación. Pero, de acuerdo con la información proporcionada por personal de la planta, durante la supervisión del falso fondo de los filtros a los que se les ha dado mantenimiento casi no se encontró arena.

La salida de la gravilla (tamaño entre 4 y 8 mm) implica una velocidad mínima de fluidificación entre 436 y 1539 m/h que a primera vista resulta imposible de tener en los filtros. La inspección visual durante el lavado permitió explicar lo anterior. En efecto, la presencia de zonas donde salía una gran cantidad de agua (borbollón, FIG. 5.8) muestra que es posible alcanzar velocidades muy por encima del valor promedio calculado el cual, además considera que el tanque está vacío.



FIG 5.8 Borbollón.

Del análisis anterior se desprende que son tres causas las que explican la pérdida de arena:

a) Para el espesor de diseño del lecho (1.30 m) y las tasas de aire variables que se fueron empleando se tuvo en un inicio una pérdida importante del medio debido sobretodo a la falta de un dispositivo de medición que permita regular la cantidad de aire suministrado en función de la localización del filtro y del número de sopladores.

b) Posteriormente, al ir perdiendo espesor el lecho la cantidad de arena que salía fue aumentando como resultado de una menor resistencia del lecho al paso de los fluidos que favorecía una expansión mayor y tasas más altas de lavado. Más aún, la diferencia de niveles entre las cámaras del filtro provoca una distribución irregular entre éstas dos haciendo que la arena de la cámara con menor espesor saliera preferencialmente.

c) El tercer punto, que es también muy importante, es la distribución tan heterogénea de agua ocasionada por el mal estado del falso fondo: taponamiento, rompimiento y dislocación de espreas.

Adicional a lo anterior se tiene un efecto que con el tiempo se ha vuelto también causa de pérdida de arena y es la formación de aglomerados, agrietamiento y compactación del lecho que impiden una distribución correcta de los fluidos y disminuyen la eficiencia del proceso de filtración.

5.4.2. Aglomerados

Los aglomerados o bolas de lodo se forman como resultado de operar en condiciones que permiten la sedimentación de parte del material que se desprende después del lavado (tasa de 19 m/h), por duración insuficiente o el empleo de tasas inferiores a la requerida para transportar los flocúlos hasta la canaleta de lavado. En la TABLA 5.8 se muestran las velocidades de sedimentación de las partículas removidas en las diferentes etapas de lavado. Como puede verse, la velocidad del agua (19 m/h) es superior a la de sedimentación de partículas en casi 10 m/h. Con esta velocidad de ascenso (v_a), el tiempo requerido para transportar una partícula desde el fondo del lecho hasta la canaleta de lavado (T_L), es de :

$$T_L = 1.8 / (19 - 8.6) = 0.173 \text{ h} = 10.4 \text{ min} \quad (5.4)$$

por tanto, para esta tasa de lavado los 2 a 5 min agua-aire actualmente utilizados, resultan insuficientes y favorecen la formación de aglomerados. Debe considerarse que, en este análisis, no se toma en cuenta el efecto de choque entre partículas y arena, que incrementarían aún más el tiempo requerido.

TABLA 5.8 VELOCIDADES DE SEDIMENTACION DE PARTICULAS

Etapa de lavado	Duración min.	Velocidad de lavado, m/h	Velocidad de sedimentación, m/h
Aire	1	54	6.1
Aire-Agua	4	54 , 19	8.6
Agua	25	19	10.0

Por lo anterior se recomienda emplear una duración entre 10 y 15 min para el agua-aire y entre 5 a 10 min de enjuague. Lo que implica que la duración total del lavado será entre 15 y 25 min. La duración más conveniente deberá ser obtenida por los operadores en la práctica a partir de la turbiedad del agua de lavado como se señala en el manual de operación.

Por otra parte, se calculó el porcentaje que representa el agua de lavado al emplearla 25 min para la operación. Los valores obtenidos fueron de 3.3 % considerando un lavado al día ó 1.6 % para cada 48 h. Puesto que el valor recomendado en la literatura desde un punto de vista económico es de 2 % se sugiere que si las corridas de filtración duran la mayor parte del año 1 día se disminuya la duración máxima del lavado a 20 min siempre y cuando se demuestre en la práctica que este lapso es adecuado para la

completa remoción de sólidos.

En la Planta de los Berros se tiene una gran cantidad de aglomerados, pues de 6 filtros muestreados casi todos se calificaron como "muy malos" (TABLA 5.9) según el coeficiente de Baylis (capítulo 2). De acuerdo con la literatura, para remover este tipo de formación se debe emplear una velocidad de 549 m/h o usar aspiradoras de alberca (Camp, 1971).

TABLA 5.9 CLASIFICACION DE LOS FILTROS SEGUN BAYLIS

FILTRO	¿ AGLOMERADOS	CLASIFICACION
3D	3.1	Muy malo
1E	0.7	Regular
5E	14.3	Muy malo
8E	11.1	Muy malo
1F	1.9	Mediocre
6F	6.8	Muy malo

Tomando en cuenta la dificultad práctica para eliminarlos y el estado actual de los filtros (espesores de lecho diferentes, agrietamiento del empaque, arena revuelta con la grava y boquillas en mal estado), lo mejor es dar un mantenimiento intensivo que comprenda el cambio total de la arena, verificación del sistema de distribución y establecimiento de nuevas condiciones de operación.

5.4.3. Efecto de la temperatura en el lavado.

En la planta Los Berros, no existen registros diarios de temperatura, aunque se mide eventualmente y se ha observado que varía entre 10 y 25°C. Aplicando la ecuación de Beaudry, 1984 (capítulo 2), para este intervalo, las velocidades de lavado se encuentran entre 17.67 y 20.14 m/h, es decir, la variación es muy poca (19 m/h \pm aproximadamente 1 m/h).

5.4.4. Evaluación de la duración del lavado con base en la turbiedad.

Durante el lavado, la turbiedad del agua que sale disminuye progresivamente. Un lavado completo implicaría la salida del agua sin turbiedad; sin embargo, se considera que desde un punto de vista económico una turbiedad de salida de 75 UTN es conveniente (Beaudry, 1984).

En Los Berros se midió la turbiedad en las diferentes etapas de lavado, encontrando que durante el lavado con aire la turbiedad es

superior a 75 UTN, al término del lavado agua-aire la turbiedad es \leq 75 UTN y durante el enjuague, las turbiedades son menores a este valor. Al dar por concluido un lavado con base en este criterio e inmediatamente reiniciar el lavado del filtro, se encontró que los valores de turbiedad se mantienen por abajo de los 75 UTN y que la turbiedad disminuye hasta valores inferiores a 20 UTN, cuando se realizan dos lavados sucesivos. Como era evidente que la arena permanecía sucia después del lavado en algunos filtros se procedió a tomar una muestra y a someterla a lavado en el laboratorio.

A partir de los resultados se comprobó que la arena contenía entre 8 y 9 % en peso de impurezas (FIG 5.9). Cabe mencionar que la remoción de estos sólidos no fue fácil ya que tomó 15 días eliminarla bajo condiciones de agitación constante.

Para definir si las condiciones actuales de lavado podrían eliminar esta suciedad se procedió a efectuar en la planta tres lavados sucesivos en un mismo filtro midiendo la turbiedad de salida. Se encontró que el lavado era deficiente ya que a pesar de que la arena estaba sucia de acuerdo con los ensayos en laboratorio, el segundo y tercer lavado no mostraron un alto contenido de sólidos en el efluente.

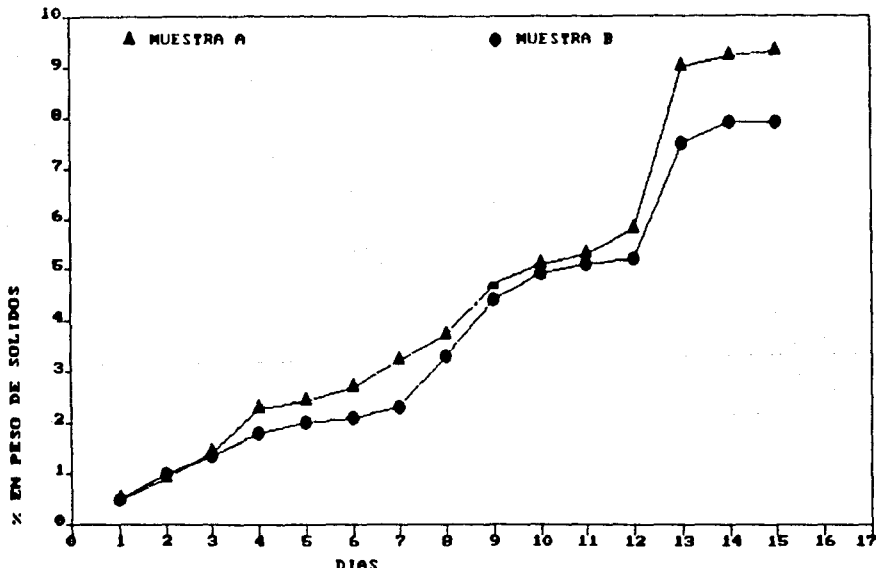


FIG 5.9 Porcentaje en peso de sólidos en la arena lavada.

De lo anterior se concluyó que:

a) El medio filtrante de Los Berros contiene suciedad con un alto grado de adhesión como producto de un largo periodo de lavados deficientes la cual no es posible eliminar bajo condiciones normales de lavado. Dado el tamaño de los aglomerados presentes en los filtros se recomienda mejor efectuar el cambio total de la arena que aplicar un lavado químico.

b) La prueba de Beaudry no se aplica a medios filtrantes cuyos sólidos tienen un alto grado de adhesión.

Así mismo no se pudo aplicar los criterios de Toregas, (índice de recuperación de sólidos, recuperación acumulada y velocidad de recuperación (capítulo 2) para evaluar el lavado debido a que la cantidad de sólidos que se desprenden durante el lavado (σ_{1j}) no necesariamente corresponden a los sólidos retenidos durante la filtración (σ_0), ya que esta cantidad está afectada por los sólidos que no fueron desprendidos en lavados anteriores.

El mejor criterio para la eficiencia de lavado según Amirtharajah (1988) es la calidad del agua filtrada, ausencia de suciedad en los filtros y de formación de bolas de lodo. Anomalías que sólo se observan después de un cierto tiempo de operación y que fueron encontradas en la planta.

5.5. Evaluación del sistema de distribución.

5.5.1 Consideraciones teóricas.

En la práctica, es muy difícil que la distribución del agua de lavado sea perfecta. El sistema de distribución del agua debe ser tal que minimice los caminos preferenciales y evite zonas con marcadas diferencias de velocidad. De hecho, debe distribuir adecuadamente aire a velocidades de 9 a 91 m/h y agua a velocidades de 12 a 120 m/h a través de 15 m de longitud y con desviaciones inferiores al 5%. Por otra parte, los orificios de salida deben ser menores que los tamaños de los granos pero, como sistemas de este tipo con frecuencia se obstruyen, se deben diseñar para limpiarlo sin tener que quitar el empaque. En cuanto al material de construcción, debe ser tal que permita el lavado con ácido sulfúrico concentrado o un álcali fuerte (para flóculos de aluminio), en intervalos de varios meses a cada dos años (Gregory 1972).

La resistencia que presenta el lecho filtrante al paso del flujo no es igual en toda la superficie del filtro. Cerca de las paredes y en aquellos lugares donde es menor el espesor del lecho la velocidad aumenta, creando una serie de corrientes verticales y horizontales que desestratifican la arena, la empujan hacia arriba y acrecentan la diferencia, llegando incluso a desacomodar la grava. Los drenes mal diseñados o en mal estado son el principal factor del desplazamiento del lecho (capítulo 2).

5.5.2 Evaluación.

El sistema de distribución de la planta de los Berros se clasifica como falso fondo de boquillas cola larga, en la FIG 2.19 se muestran las boquillas Dégremont utilizadas en la planta de los Berros. Dégremont garantiza que estas boquillas proporcionan la distribución mencionada en el inciso 5.5.1 siempre y cuando se respeten las condiciones de instalación.

En Los Berros, la losa perforada está colocada sobre un falso fondo de 0.95 m de profundidad en la cual se atornillan 56 boquillas/m², con un espaciamiento aproximado de 13.5 cm y un caudal unitario por espesa de 0.25 m³/h condiciones que satisfacen los requerimientos del fabricante. Por ello y a partir de estudios realizados en el laboratorio (Jiménez et al., 1988) se considera que la distribución obtenida con este falso fondo debió ser adecuada cuando estuvo en buen estado.

El material de las boquillas es menos flexible que las utilizadas en otros estudios (Jiménez et al., 1988), lo que las hace más quebradizas, debiendo tener precauciones especiales para su manejo (como no caminar directamente sobre el medio).

Experimentalmente, se probó si las espreas de la planta Los Berros pueden ser lavadas con un álcali fuerte (ya que se emplea sulfato de aluminio como coagulante) sin sufrir daños o quebraduras. La variación promedio observada en peso fue de 0.13 %, por lo que se considera que no sufren alteraciones significativas para soluciones alcalinas hasta de 5 % de concentración.

La mala distribución de los fluidos observada se debe al taponamiento, rompimiento y salida de lugar de espreas que incrementan la tasa de lavado en unas zonas y las disminuyen en otras. En la planta de los Berros este fenómeno se manifiesta por la frecuente presencia de borbollones y zonas muertas.

Para controlar este problema es necesario efectuar un mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de distribución aplicando la metodología presentada en el Manual de Operación que el Instituto de Ingeniería elaboró para el lavado de filtros de la planta.

5.6 Evaluación del equipo de control.

Inicialmente los filtros fueron diseñados y equipados para realizar el lavado en forma totalmente automatizada, sin embargo, a causa del deterioro en estos equipos y la falta de mantenimiento correctivo, los operadores participan cada vez más en el proceso de lavado de los filtros, lo que contribuye aún más a alterar la metodología de operación.

Como uno de los problemas detectados es la falta de control de la cantidad de aire que entra a cada filtro se debe, además de contar con manómetros en las líneas de aire (FIG 5.10) tener un sistema de registro y regulación de ella en los tableros.

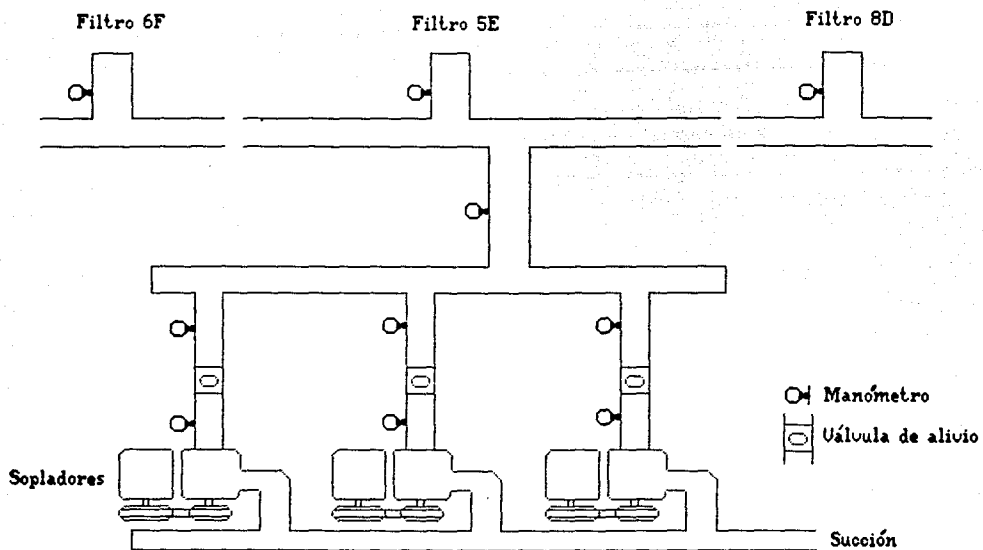


FIG 5.10 Localización de los manómetros de aire.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como conclusión de esta tesis se tiene que la pérdida de arena observada en la planta de Los Berros se debe a la falta de control de la tasa de aire empleada (la cual varía de 28 a 87 m/h), la altura del lecho, el taponamiento, rompimiento y dislocación de las boquillas (que ocasionan mala distribución de los fluidos de lavado), formación de bolas de lodo, agrietamiento del lecho, y la diferencia de altura entre los lechos en las cámaras de un mismo filtro. También se encontró que los efectos provocados por la pérdida de arena hacen que el fenómeno se favorezca a sí mismo.

Las soluciones a lo anterior se basan en tres aspectos:

- a) Modificación al método de lavado.
- b) Cambio del medio filtrante y disminución del espesor del lecho a 1.20 m.
- c) Aplicar una nueva metodología de mantenimiento preventivo y correctivo.

De acuerdo con el análisis efectuado y tomando en cuenta las condiciones de la planta, se recomienda que se emplee como criterio principal de operación la velocidad de lavado, para lo cual es necesario contar con dispositivos de medición. Como en el caso del agua el gasto es constante, basta con haber efectuado su valoración una sola vez (19 m/h) y, así el gasto por regular en la práctica será el de aire el cual debe ser igual a 55 m/h. Además se deberá disminuir la altura del lecho a 1.20 m.

En cuanto al lavado la mejor opción para la planta de Los Berros es el empleo de agua y aire en forma simultánea, sobre todo para evitar el necesidad de un sistema de bombeo de agua. La duración debe ser de 10 a 15 min para la etapa agua-aire y de 5 a 10 para la etapa de enjuague. Se recomienda el lavado aire-agua simultáneo por las siguientes razones:

- a) La tasa de agua para expandir el medio y arrastrar los sólidos es insuficiente.
- b) El empleo de aire previo al lavado con agua-aire produce una compactación del lecho.
- c) La mezcla aire-agua incrementa la expansión que favorece la salida de los sólidos.

Modificación del método de lavado.

Así, las etapas del nuevo método de lavado deben ser:

1ª Lavado con aire y agua simultáneos a razón de 55 m/h y 19 m/h respectivamente durante 10 a 15 min. Para tener control sobre la velocidad de aire es necesario colocar manómetros en la línea de distribución.

2ª Enjuague con agua durante 5 a 10 min a 19 m/h.

Cambio del medio filtrante

La modificación del método de lavado no es suficiente para remediar el problema de la planta de Los Berros sino que es necesario acompañarlo con otras actividades como:

- a) Reponer todo el medio por arena limpia.
- b) Respetar las especificaciones de la arena de reposición
 - Medio filtrante con TE de 0.95 mm
 - CU de 1.6
 - Peso específico de 2.6
 - Espesor del lecho de 1.20 m.
- c) Dar mantenimiento correctivo al sistema de distribución (reemplazamiento de espreas dañadas o taponadas y colocación en su lugar).

Mantenimiento preventivo y correctivo.

En las TABLAS 6.1 y 6.2 se propone un cuadro de acciones concretas en la operación y en el mantenimiento que se deben considerar.

TABLA 6.1 MEDIDAS PARA CONTROLAR LA PERDIDA DE ARENA.

MEDIDAS	OBJETIVO
<p>a) Operativas</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cambio de método de lavado: se propone el uso de agua-aire en forma simultánea durante 10 a 15 min y enjuague de 5 a 10. -Suministrar en forma gradual el agua y aire hasta alcanzar velocidades de 19 m/h y 55 m/h respectivamente. -Evitar que el nivel del agua en la caja del filtro impida la descarga libre en las canaletas del sedimentador, definiendo como límite máximo de la corrida de filtración el nivel 38.88. -Incluir en la práctica de lavado los registros de nivel del lecho filtrante, estado del filtro con base en el criterio de Baylis e inspección visual del lecho. 	<ul style="list-style-type: none"> Mejorar la eficiencia de lavado. Evitar la formación de burbujas que puedan arrastrar arena a la superficie o el desacomodo de grava que provoque fugas de arena al bajodren Reducir el paso de flóculos a los filtros, producido por la sumergencia de las canaletas de los sedimentadores. Mantener el lecho en buen estado.
<p>b) Mantenimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> -Mantener el espesor filtrante del lecho igual a 1.20 m y vigilar que la altura de éste sea igual en ambas cámaras de un mismo filtro. -Vigilar que la arena de reposición de los filtros cumpla los requerimientos específicos. -Verificar el buen estado de las espreas y su correcta colocación. Inspección visual de la distribución de fluidos. -Reemplazar las espreas averiadas y realizar un lavado químico una a dos veces por año. -Regularmente realizar un lavado intensivo a los filtros utilizando dos aeradores e incrementando el tiempo de lavado. 	<ul style="list-style-type: none"> Evitar desequilibrios que favorezcan mala distribución de fluidos. Evitar pérdidas de bidas a materiales más ligeros o modificación en el rendimiento o duración de corridas de filtración. Mantener una distribución homogénea de los fluidos. Evitar la distribución irregular de fluidos Destapar espreas y eliminar aglomerados pequeños.

TABLA 6.2 MEDIDAS DE MANTENIMIENTO.

Mantenimiento preventivo	Mantenimiento correctivo
<p>Limpieza de las paredes del filtro mensual</p> <p>Remoción de la capa de nata superficial del filtro diario</p> <p>Lavado químico semestral¹</p> <p>Pintar barandales y compuertas evitando escurrimiento de solventes y grasas a los filtros anualmente.</p> <p>Lubricación de partes móviles (puertas, válvulas. etc.) mensualmente.</p> <p>Verificación de los sistemas electromecánicos semestral</p> <p>Mantenimiento de los compresores.</p>	<p>Reposición de arena a lechos filtrantes cuando el espesor disminuya en 0.10 m</p> <p>Movimiento mecánico de arena en lechos compactados</p> <p>Reposición de boquillas</p> <p>Reposición de sellos en válvulas y compuertas.</p> <p>Reposición de bandas en aeradores</p>

Algunas recomendaciones puntuales pero que serían de gran ayuda para evitar la pérdida de la arena son:

- Emplear un sólo soplador para el módulo E y dos para los otros, si es necesario para introducir loa 55 m/h de aire requeridos.
- Especialmente, efectuar un mantenimiento correctivo en:
 - a) Todas las válvulas y compuertas del sistema de filtración.
 - b) Los dos compresores.
 - c) El tablero de control.
- Desarrollar un Manual de Operación.
- Instalar una grúa volante para carga y descarga de la arena de los filtros.

7. BIBLIOGRAFIA

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

Amirtharajah A. (1978) "*Optimum backwashing of sand filters*". Journal of the Environmental Engineer Division. Vol 104 : EE5. pp 917-931.

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

Arboleda J., Vargas F. y Correal H. (1969) "*Manual de tratamiento de aguas potables*". La Comisión Administradora. Programa de Educación. Caracas, Venezuela.

Arboleda J., Cleasby J. (1979) "*Velocity gradients in granular filter backwashing*". Journal of American Waters Works Association. Diciembre, pp 732-738.

Beaudry J.P. (1984). "*Traitement des eaux*". Le Griffon d'argile inc. Canadá.

Buitrón G. y Jiménez B. (1988). "*Manual de operación de filtros de arena*". Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Camp T.,(1965) "*Theory of water filtration*" (Discusión). Journal of Sanitary Engineering Division A.S.C.E. Vol 91, No. Sa5. octubre, pp 55-69.

Camp T., Graber D. y Conklin G. (1971) "Backwashing of granular water filters". Journal of Sanitary Engineering Division A.S.C.E. Vol 97, pp 55-69.

CEPIS (1973). "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua".

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

Cleasby J., Stangl E., Rice G. (1975) "Developments in Backwashing of granular Filters" Journal on the Enviromental Engineer Division. EE5, pp 713-727.

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

Cleasby J. y Fan K. (1981) "Predicting fluidization and expansion of filter media". Journal of the Enviromental Engineer Division. Vol. 101:EE3: Enero, p.p 455-471.

CNA, Sistema Cutzamala (1990). "Especificaciones de suministro y colocación de arena y grava para lechos filtrantes". Los Berros, Edo. de México.

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

Dharmarajah A. y Cleasby J. (1986) "Predicting the expansion behavior of filter media". Journal of American Waters Works Association. Diciembre, pp 66-76.

Dharmarajah A. y Cleasby J. (1989) "*Expansion of granular filters during backwashing*". Journal of the Enviromental Engineer Division. Vol. 115, p.p 455-471.

Gregory R. (1972) "*Backwashing of granular water filters*". Journal of Sanitary Engineering Division A.S.C.E. Vol 98, Agosto, pp 55-69.

Holman J. (1981). "*Métodos experimentales para ingenieros*". Mc.Graw-Hill, México.

Jiménez B., Buitrón G., Vega E., Silva A. y Becerril J. (1989) "*Proyecto funcional y análisis de diferentes tipos de bajodrenes para filtros de plantas potabilizadoras*". Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Kawamura S. (1975). "*Design and Operation of High-Rate Filters-Part 1*". Journal of American Waters Works Association. Octubre, pp 535-544.

Richardson J. y Zaki W. (1954) "*Sedimentation and fluidization*". Trans. Intitute of Chemical Engineers Vol 32, pp 35-53

Toregas G. (1983) "*Using backwashing kinetics to evaluate attachment mechanism and forces during filtration*". Journal of American Waters Works Association. Mayo, pp 254-260

ANEXO

ANALISIS GRANULOMETRICO.

Uno de los primeros trabajos para desarrollar una metodología de caracterización de la arena fue el de Allen Hazen en 1892. Este autor estableció dos factores -tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad- que es básico en la actualidad para describir un medio filtrante. Se entiende por tamaño efectivo (TE) el tamaño del grano (en milímetros) del tamiz que deja pasar el 10% en peso, de las partículas y el 90% retiene el restante es decir, el 90 % de las partículas son mayores que ese tamaño. El coeficiente de uniformidad (CU) es la relación entre el tamaño del tamiz que deja pasar el 60% de la muestra y el que sólo deja pasar el 10% más fino que él.

Para analizar la muestra, se pesa una cantidad de arena que se cierce en tamices de tamaño consecutivo y se va obteniendo el tanto por ciento total al peso retenido en cada tamiz. El resultado se dibuja en papel logarítmico de probabilidad.

La serie de tamices estandares se presenta en la siguiente TABLA

A.1

TABLA. A.1 SERIE AMERICANA DE TAMICES.

NUMERO DE SERIE	TAMAÑO DE ABERTURA (mm)
100	0.140
70	0.210
50	0.297
40	0.420
30	0.595
20	0.841
16	1.19
12	1.68
8	2.38
6	3.36
4	4.76
1/4"	6.36
3/8"	9.51
1/2"	12.7
3/4"	19.0
1	25.4