



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA  
REHABILITADA DE AGUA POTABLE SANTA LUISA DE LA EMPRESA  
MUNICIPAL DE AGUA (EMPAGUA) DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

**GERMAN RAFAEL REYES VELA**

ASESORADO POR ING. MARIO RENÉ FIGUEROA CABALLEROS

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA  
REHABILITADA DE AGUA POTABLE SANTA LUISA DE LA EMPRESA  
MUNICIPAL DE AGUA (EMPAGUA) DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GERMAN RAFAEL REYES VELA**

ASESORADO POR ING. MARIO RENÉ FIGUEROA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL PRIMERO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL SEGUNDO	Líc. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL TERCERO	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL CUARTO	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL QUINTO	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Lionel Alfonso Barillas Romillo
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA REHABILITADA DE AGUA POTABLE SANTA LUISA DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA (EMPAGUA) DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de octubre de 2002.

**GERMAN RAFAEL REYES VELA**

Guatemala, febrero de 2004

Ingeniero  
Carlos Salvador Gordillo García  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil  
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ingeniero Gordillo:

Por este medio me permito comunicarle que he asesorado el trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA REHABILITADA DE AGUA POTABLE SANTA LUISA DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA (EMPAGUA) DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, del estudiante, German Rafael Reyes Vela, previo a optar el título de Ingeniero Civil.

El trabajo presentado cumple con los objetivos y contenidos en su programación de trabajo de graduación, por lo cual cuenta con mi aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Mario René Figueroa Caballeros  
Asesor

## **Dedicatoria**

### **A mis padres**

German Rafael Reyes y María Luisa Vela, quienes a través de su amor, comprensión y su ayuda económica supieron guiarme en el camino de la vida para hacer de mí, hombre de bien y poder alcanzar este momento tan especial para mi vida.

### **A mi esposa**

Silvia Patricia Rodríguez, por su comprensión y paciencia en los momentos críticos de nuestro caminar en la vida.

### **A mis hijos**

Andrea, German, Heber, Fernando (Q.E.P.D.) , por haber llegado a mi vida y ser un motivo especial para seguir adelante con deseo de dar un ejemplo de superación.

### **A mis hermanos**

Silvia, Aura, Mayra (Q.E.P.D.), Julia, Brenda, Kreybi, con cariño sincero.

### **A mis amigos**

Con respecto y afecto.

### **Facultad de ingeniería**

Por la enseñanza impartida.

## **Agradecimiento**

**A Dios todopoderoso**

por darme la oportunidad de tener a mis padres con vida en el momento de alcanzar la meta trazada.

**Ing. Mario René  
Figueroa Caballeros**

por su asesoría y amistad.

**Inga. Carmen Marina  
Mérida Alva**

por su valioso tiempo que dedico en la revisión.

**Ing. Walter Rafael  
Herrera Morales**

por su entusiasmo y colaboración directa en el presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	III
<b>GLOSARIO</b> .....	V
<b>RESUMEN</b> .....	VI
<b>OBJETIVOS</b> .....	VIII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	IX
<b>1. ANTECEDENTES</b>	
1.1 Fuentes.....	4
1.2 Capacidad de producción .....	6
1.3 Investigaciones especiales del sistema de filtración.....	7
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA PLANTA SANTA LUISA</b>	
2.1 Descripción del funcionamiento de las unidades.....	9
2.2 Vertederos .....	9
2.3 Dosificación de productos químicos .....	10
2.4 Floculadores .....	19
2.5 Sedimentadores.....	22
2.6 Filtros.....	25
2.7 Tanque de distribución .....	25



<b>3. TEORIA DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN</b>	
3.1 Definición .....	27
3.2 Mecanismo de filtración .....	28
3.3 Lecho filtrante .....	30
3.4 Funcionamiento de los filtros .....	30
3.5 Proceso de filtración rápida.....	32
<b>4. FUNCIONAMIENTO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA SANTA LUISA</b>	
4.1 Descripción .....	36
4.2 Lavado de superficie.....	39
4.3 Retrolavado.....	42
<b>5. ENSAYOS DE EVALUACIÓN Y RESULTADOS</b>	
5.1 Velocidad y caudal de filtración.....	45
5.2 Velocidad de lavado.....	51
5.3 Duración del proceso de lavado.....	54
5.4 Bolas de barro.....	57
5.5 Perfil del lecho filtrante.....	60
5.6 Expansión del lecho filtrante .....	74
5.7 Granulometría y espesor del lecho filtrante.....	78
<b>CONCLUSIONES</b> .....	86
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	87
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	88
<b>ANEXOS</b> .....	89

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	III
<b>GLOSARIO</b> .....	V
<b>RESUMEN</b> .....	VI
<b>OBJETIVOS</b> .....	VIII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	IX
<b>1. ANTECEDENTES</b>	
1.1 Fuentes .....	4
1.2 Capacidad de producción .....	6
1.3 Investigaciones especiales del sistema de filtración .....	7
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA PLANTA SANTA LUISA</b>	
2.1 Descripción del funcionamiento de las unidades .....	9
2.2 Vertederos .....	9
2.3 Dosificación de productos químicos.....	10
2.4 Floculadores .....	19
2.5 Sedimentadores .....	22
2.6 Filtros .....	25
2.7 Tanque de distribución.....	25

<b>3.</b>	<b>TEORIA DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN</b>	
3.1	Definición .....	27
3.2	Mecanismo de filtración .....	28
3.3	Lecho filtrante .....	30
3.4	Funcionamiento de los filtros .....	30
3.5	Proceso de filtración rápida .....	32
<b>4.</b>	<b>FUNCIONAMIENTO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA SANTA LUISA</b>	
4.1	Descripción .....	36
4.2	Lavado de superficie.....	39
4.3	Retrolavado .....	42
<b>5.</b>	<b>ENSAYOS DE EVALUACIÓN Y RESULTADOS</b>	
5.1	Velocidad y caudal de filtración .....	45
5.2	Velocidad de lavado .....	51
5.3	Duración del proceso de lavado .....	54
5.4	Bolas de barro .....	57
5.5	Perfil del lecho filtrante .....	60
5.6	Expansión del lecho filtrante.....	74
5.7	Granulometría y espesor del lecho filtrante .....	78
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	86
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	87
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	88
	<b>ANEXOS</b> .....	89

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Sistema Santa Luisa .....	3
2.	Vertederos de ingreso a la planta .....	6
3.	Sistema de dosificación .....	13
4.	Sistema de inyección de cloro .....	18
5.	Sistema de floculación .....	21
6.	Sistema de sedimentación A .....	23
7.	Sistema de sedimentación B .....	24
8.	Filtro.....	31
9.	Proceso de filtración .....	38
10.	Proceso de lavado superficial .....	41
11.	Proceso de retrolavado.....	44
12.	Equipo para realizar el ensayo de bolas de lodo .....	58
13.	Varilla metálica graduada y perfil de grava .....	61
14.	Ubicación de puntos para determinar la altura de grava filtro 1.....	63
15.	Ubicación de puntos para determinar la altura de grava filtro 2.....	64
16.	Ubicación de puntos para determinar la altura de grava filtro 4.....	65
17.	Ubicación de puntos para determinar la altura de grava filtro 5.....	66
18.	Ubicación de puntos para determinar la altura de grava filtro 6.....	67
19.	Topografía de un lecho de grava filtro 1 .....	68
20.	Topografía de un lecho de grava filtro 2 .....	70
21.	Topografía de un lecho de grava filtro 4 .....	70
22.	Topografía de un lecho de grava filtro 5 .....	71
23.	Topografía de un lecho de grava filtro 6 .....	72

24. Equipo para medir la expansión de la arena durante el lavado .....	74
25. Plano de ubicación de instalaciones y zona de captación .....	90
26. Plano de ubicación paneles de control .....	91
27. Plano hidráulico .....	92

## TABLAS

I. Velocidad de filtración 1 .....	48
II. Velocidad de filtración 2 .....	48
III. Velocidad de filtración 4 .....	48
IV. Velocidad de filtración 5 .....	49
V. Velocidad de filtración 6 .....	49
VI. Promedio de velocidad de filtración .....	49
VII. Velocidad de lavado .....	53
VIII. Turbiedades (UNT) medidas en el proceso del retrolavado .....	56
IX. Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de barro .....	60
X. Espesores máximos y mínimos en las unidades de filtración .....	73
XI. Expansión del lecho filtrante .....	75
XII. Calidad de agua filtrada, Turbiedad y Ph .....	77
XIII. Granulometría de filtros .....	79
XI. Granulometría de filtros .....	80
XV. Granulometría de filtros .....	81
XVI. Granulometría de filtros .....	82
XVII. Granulometría de filtros .....	83

## GLOSARIO

<b>Afluente</b>	En un sistema de abastecimiento de agua, se entiende como el caudal que está ingresando a uno de sus elementos.
<b>Agua Potable</b>	Es el agua cuyas características físicas, químicas y microbiológicas la hacen adecuada al consumo humano.
<b>Caudal</b>	Es el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo en un determinado punto de observación, en un instante dado.
<b>Cloración</b>	Es la aplicación de cloro al agua, generalmente con fines de desinfección.
<b>Cloro residual</b>	Es la cantidad total de cloro (libre o combinado) que queda en el agua después de un período de contacto.
<b>Contaminación</b>	Es un término general que significa la introducción al agua de microorganismos, que la hacen impropia para el consumo humano.
<b>Filtración</b>	Proceso que consiste en pasar un líquido a través de un medio filtrante, con el propósito de eliminar la materia suspendida o coloidal, de un tipo que generalmente no puede eliminarse por sedimentación.

**PH (Potencial  
Hidrógeno)**

Es una expresión de la concentración de los iones hidrógeno, varía de 1 a 14 grados de PH.

**Retrolavado**

Es el sistema principal para el lavado de los filtros de flujo descendente y se consigue haciendo circular el agua en sentido inverso, ya sea por la carga de las otras unidades o bien utilizando un tanque elevado.

**Turbiedad**

Es la condición de un líquido debido al material visible, finamente dividido en suspensión, que puede o no, ser de tamaño suficiente para distinguirlo en partículas aisladas a simple vista, pero que impide el paso de la luz a través del líquido.

## RESUMEN

La presente evaluación del proceso de filtración de la planta rehabilitada de agua potable Santa Luisa de la empresa municipal de agua (EMPAGUA) de la ciudad de Guatemala, tiene por objetivo conocer las variables que afectan el problema de la colmatación en el lecho filtrante de los mismos. Esta planta de tratamiento es una de las tres plantas que ha sido rehabilitada, de las seis que abastecen a la ciudad capital. Esta planta de tratamiento fue diseñada para producir 400 litros por segundo.

En este estudio se recopilaron los datos históricos de los análisis físicos químicos que realiza el laboratorio de EMPAGUA en el periodo 2003-2004, para conocer los porcentajes de remoción en los filtros y realizar el análisis estadístico de turbiedad y pp. Dando como resultado que el 80 por ciento del tiempo se obtienen valores, por debajo del límite máximo permisible establecido por la norma COGUANOR 29-001, para los parámetros antes mencionados, en la salida de los filtros. Así mismo, se obtuvieron los caudales de entrada a la Planta Santa Luisa para el año 2004, con los cuales se realizó el análisis estadístico respectivo, con el objetivo de conocer el caudal promedio con que opera la planta de tratamiento. Los resultados nos informa que en promedio la planta de tratamiento opera con un caudal 288 l/s.



En la evaluación en campo de las unidades de filtración se utilizaron para ello los procedimientos propuestos por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria CEPIS. Contenido en el manual IV: Evaluación, Filtración Rápida, Tomo III: Procesos–Tecnología Convencional, las pruebas efectuadas fueron las siguientes: velocidad de filtración, velocidad de lavado, duración del proceso de lavado, bolas de barro, perfil del lecho de grava, expansión del lecho filtrante, granulometría y espesor del lecho filtrante.

Estableciéndose que el promedio de la velocidad de filtración se ubica debajo del rango de diseño, la velocidad de lavado es muy alta provocando elevadas expansiones del lecho filtrante, la duración del proceso de lavado es igual al tiempo manejado para el lavado de los filtros, el lecho filtrante carece de bolas de barro y espesor recomendado, el diámetro efectivo resulto por debajo del rango recomendado, lo cual explica la finura de la arena. El problema de la colmatación se debe a que el lecho filtrante está constituido por arena muy fina. Este problema se agudiza en la época de invierno donde las corrientes de agua arrastran grandes cantidades de sólidos, el cual incide en el ingreso de elevadas turbiedades a la planta de tratamiento.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar el proceso de filtración de la planta de tratamiento Santa Luisa ya rehabilitada.

### **Específicos**

1. Analizar datos de caudales de entrada del año 2002 para conocer el caudal promedio diario que existe en la planta.
2. Determinar la capacidad y eficiencia en el proceso de filtración.
3. Evaluar por medio de ensayos las características del proceso de filtración.

## INTRODUCCIÓN

La elaboración del presente trabajo es dar a conocer el proceso de filtración al cual es sometida el agua en la planta de tratamiento, éste es bastante complejo y reúne una serie de mecanismos cuya acción es simultánea y que se muestra a través de las unidades de filtración, la que determina la calidad del efluente, mediante el estudio de parámetros relativamente fáciles de determinar como son la turbiedad y la pérdida de carga.

Las características del medio filtrante desempeñan un papel importante en la eficiencia del proceso, principalmente la granulometría del material filtrante. El objetivo básico es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.

Las características del agua aplicada a los filtros, determinan la calidad del efluente, principalmente a través de la concentración, naturaleza, tamaño y propiedades de adherencia de las partículas.

Recientemente la planta Santa Luisa fue reacondicionada para mejorar su eficiencia, al momento los resultados no han sido los esperados. A finales de 1997 se construyó una batería de seis filtros en sustitución de las antiguas unidades de filtración que las constituían 19 filtros a presión.

Las pruebas se efectuaron en cinco de los filtros de un total de seis, debido a que el filtro No.3 se encontraba fuera de operación en el momento de la evaluación del proceso de filtración.

# 1. ANTECEDENTES

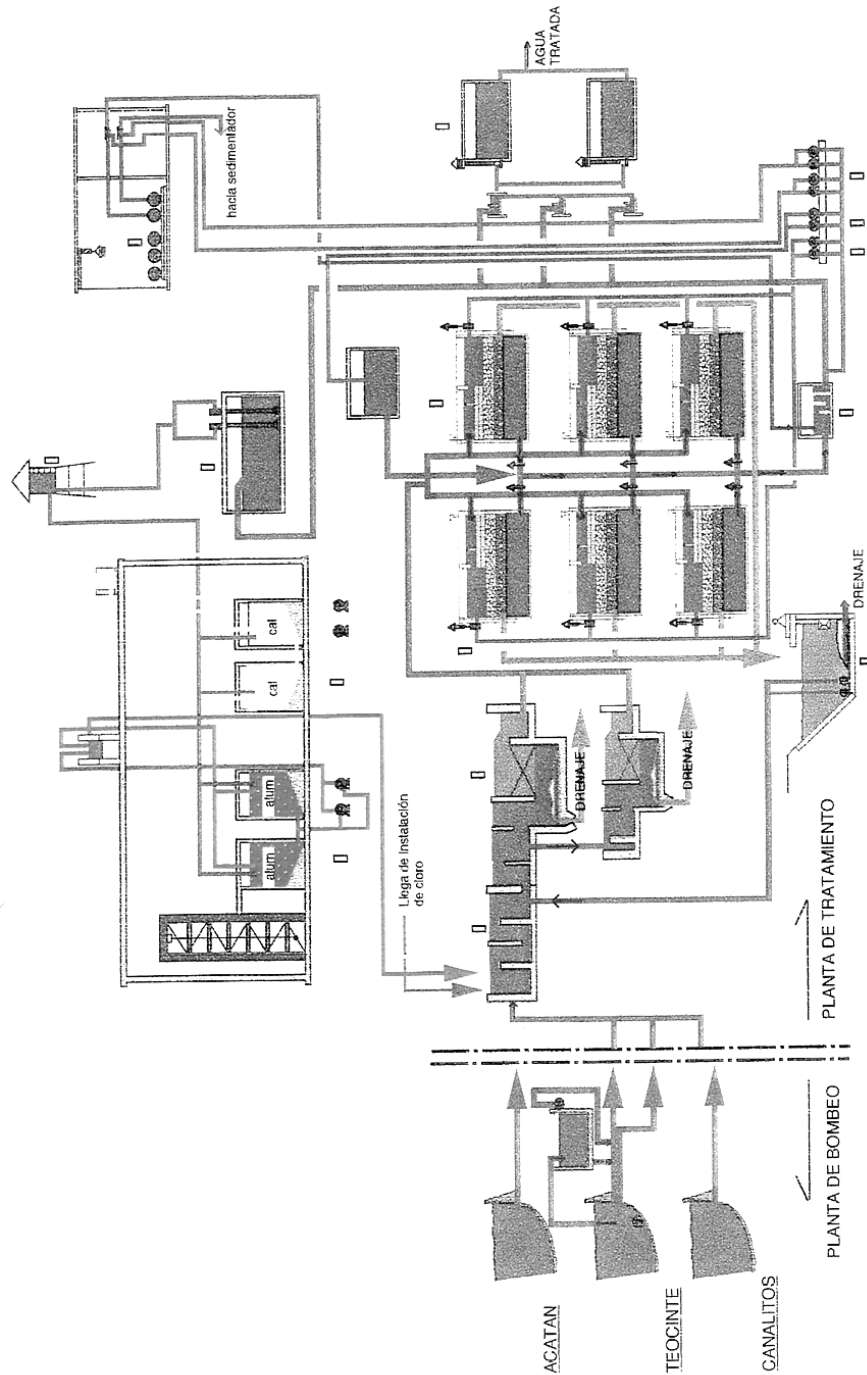
La planta de tratamiento de agua, Santa Luisa está hacia el este del centro de la ciudad (zona 16) y fue construida en 1938. Diseñada para tratar  $18,000\text{m}^3/\text{día}$  pero en 1958 ésta fue ampliada para producir  $45,000\text{m}^3/\text{día}$ , con un nuevo canal de mezcla, dos sedimentadores en paralelo que representan un volumen total de 14,175 metros cúbicos, así mismo, se incluyen 10 divisiones de filtros a presión y el tanque de distribución de Acatán.

El terremoto de 1976 destrozó más de la mitad del depósito y fue parcialmente rehabilitado al año siguiente. En 1978 se agregó un depósito de sedimentación de tipo placa oscilante inclinada. El sistema de tratamiento de agua emplea un depósito de formación de flóculos de tipo flujo circulante, un depósito de sedimentación por coágulos de tipo flujo lateral y un tanque de filtrado por presión. La capacidad de procesamiento, según las especificaciones del diseño fue de  $40,000\text{ m}^3/\text{día}$  de acuerdo a los datos estadísticos registrados desde 1986 hasta julio de 1993, el volumen procesado diario fue de  $26,130\text{ m}^3/\text{día}$ , es decir, un 65 por ciento del valor estimado.

Sin embargo, durante los últimos años la planta de tratamiento Santa Luisa, empezó a sufrir serios deterioros en sus instalaciones, así como en el equipo mecánico y eléctrico, situación debida al tiempo de operación, altas turbiedades en invierno y falta de mantenimiento preventivo y correctivo. Causando problemas en los distintos procesos de tratamiento, disminuyendo en gran porcentaje la calidad y producción de agua.

Debido a ello EMPAGUA se vio en la necesidad de hacer un estudio profundo de la situación de la planta, para luego encontrar las vías de funcionamiento internacional que pudieran dar solución al problema, fue el Gobierno de Japón quien brindó la ayuda económica, y soporte técnico, el equipo mecánico y eléctrico, para la rehabilitación de dicha planta. Ésta se inicio en 1997 y finalizó en el siguiente año.

Figura 1. Sistema Santa Luisa



Fuente: Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

## **1.1 Fuentes**

### **a) Acatán (1898)**

Presa derivadora de caudal, que reúne varias fuentes de pequeños ríos aproximadamente distantes, 7 Km. Llegando a Santa Luisa por dos conductos 16" y 12". El gobierno del general José María Reina Barrios llevó a cabo la introducción de las aguas del río Acatán a la ciudad de Guatemala, iniciando el proyecto el 1 de enero de 1894 y terminándolo el 15 de septiembre de 1895; luego en 1938 se constituyó como planta de tratamiento de agua potable Santa Luisa, introduciendo las aguas de la presa el Teocinte, ampliándose en 1958 para tratar más caudal.

### **b) Teocinte I y II (1,936 y 1,952)**

Presa de embalse que reúne las aguas de los ríos: La Manguita; Montecristo; Agua Viva; San Antonio y la Piedrona, San José Pinula, a 14.2 Km. Al este de Santa Luisa, la presa permanece azolvada casi en un 80 por ciento.

Los caudales que circulan han disminuido considerablemente por causa del estado actual de las tuberías.

El agua tiene una turbiedad a veces elevada, especialmente en invierno y en estas condiciones se obliga a reducir el caudal de la planta.



### **c) Canalitos (1958)**

Toma de agua con desarenador, captación de bombeo, 3 bombas elevan el agua hasta Santa Luisa, distante 2.6 Km., por una tubería de 18”H.F.

El agua es muy contaminada por desperdicios de basura y por afluente de aguas negras que se descargan sobre el río Canalitos, aguas arriba de la toma. Por lo que está desechada como fuente de agua superficial, en la actualidad bombea el caudal de un pozo ubicado dentro de sus instalaciones, obteniéndose una producción de 30 lts/seg.

### **d) Pozo Canalitos**

Un pozo construido dentro del perímetro de la planta Santa Luisa, descarga después, de los sedimentadores, dando un caudal aproximado de 5 lts/seg.

### **e) Pozo emergencia I**

Se está construyendo un nuevo pozo en las instalaciones de la planta por parte del proyecto Emergencia I.

Figura 2 Vertederos de ingreso a la planta



## 1.2 Capacidad de producción

La producción máxima disponible es 0.334 m<sup>3</sup>/seg., inferior a la capacidad teórica de 0.548 m<sup>3</sup>/seg. La limitación no se debe a la planta de tratamiento, donde la mayoría de sus elementos tienen una capacidad mayor que la necesaria, sino que al aporte de las fuentes que lo alimentan.

### **1.3 Investigaciones iniciales del sistema de filtración**

Las investigaciones iniciales efectuadas en la planta Santa Luisa han sido las siguientes:

- Estudio de las variaciones de caudal de entrada y de calidad de agua cruda de filtración.
- Análisis estructural e hidráulico de los filtros a presión para conocer el estado de los conductos y del lecho filtrante.



## **2. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA PLANTA SANTA LUISA**

### **2.1 Descripción del funcionamiento de las unidades**

El proceso de potabilización en la planta de tratamiento Santa Luisa es de tipo convencional, utilizando sulfato de aluminio como coagulante y ocasionalmente se emplea cal para regular la alcalinidad y pH del agua, seguido de floculación, sedimentación, filtración y la desinfección. Además se tiene por práctica común realizar una pre-cloración (2–10 mg/l) antes de la aplicación del sulfato de aluminio.

### **2.2 Vertederos**

Existen cuatro vertederos rectangulares de pared delgada, donde se realizan las mediciones de caudales de entrada. En éstos se unifican los caudales provenientes de Teocinte, Canalitos y Acatán.

### **2.3 Dosificación de productos químicos**

En la planta Santa Luisa, se lleva a cabo los procesos de tratamiento para lograr la potabilización del agua. Entre los componentes principales están los siguientes:

- **Dosificación de sulfato de aluminio**

El sulfato de aluminio se mezcla con los sólidos suspendidos que están en el agua cruda, formando flóculos y en consecuencia se elimina la turbiedad del agua cruda. El aluminio era enviado al tanque pequeño disuelto por él alimentado de aluminio tipo seco proveniente de Estados Unidos, pero el tiempo para disolver el producto químico no era suficiente, por lo cual se modificó el sistema totalmente y se introdujo la dosificación en solución, lo que implica la construcción del cuarto de químicos, tanque de succión, e instalación del sistema de bombeo.

El método de dosificación de sulfato de aluminio empleado durante años en la planta, había sido granular seco, aplicado por gravedad, a través de dos tolvas, con dosificadores de solera giratoria, los cuales estaban equipados con un tanque de disolución.

Al inicio de su operación, este equipo era posible graduarlo con el regulador de la solera giratoria, para obtener la cantidad de onzas por minuto de químico necesario para la dosificación. Con el correr de los años fue perdiendo su exactitud, a tal grado que muchas veces se paraba sin previo aviso, provocando descontrol en el proceso de tratamiento.

Asimismo, era necesario auxiliarse de una balanza y de un cronómetro, para obtener la dosificación más acertada.

Este sistema fue sustituido por un sistema volumétrico de solución diluida, con aplicación por bobeo y rotámetro de litros por minuto, lo que hace que la aplicación de la solución sea más exacta y eficiente.

Con este sistema, es posible hacer soluciones con distintas concentraciones, ya que permite conocer con facilidad el volumen total del tanque, como cualquier otro volumen inferior a éste, por medio de la escala volumétrica con que cuenta dicho tanque de solución. Por medio del densímetro es posible confrontar el porcentaje de la solución en el tanque de aplicación, para luego ser usado en la determinación de la aplicación de litros por minuto de solución necesaria para la adecuada dosificación.

Para la aplicación del sulfato de aluminio, en este momento, es necesario conocer el caudal ( $m^3/hora$ ) de entrada a la planta, la concentración de la solución en el tanque de aplicación y la dosificación óptima (mg/litro) de la prueba de jarras, ésta depende de la turbiedad de ingreso a la planta.

Al caudal de entrada es necesario aplicarle cierta cantidad de sulfato de aluminio, determinada ésta por medio de una prueba de jarras (mezcla de sulfato de aluminio en mililitros a cierto porcentaje, en un litro de agua cruda, por lo general es al 1 por ciento), para obtener la adecuada dosificación óptima y la floculación apropiada.

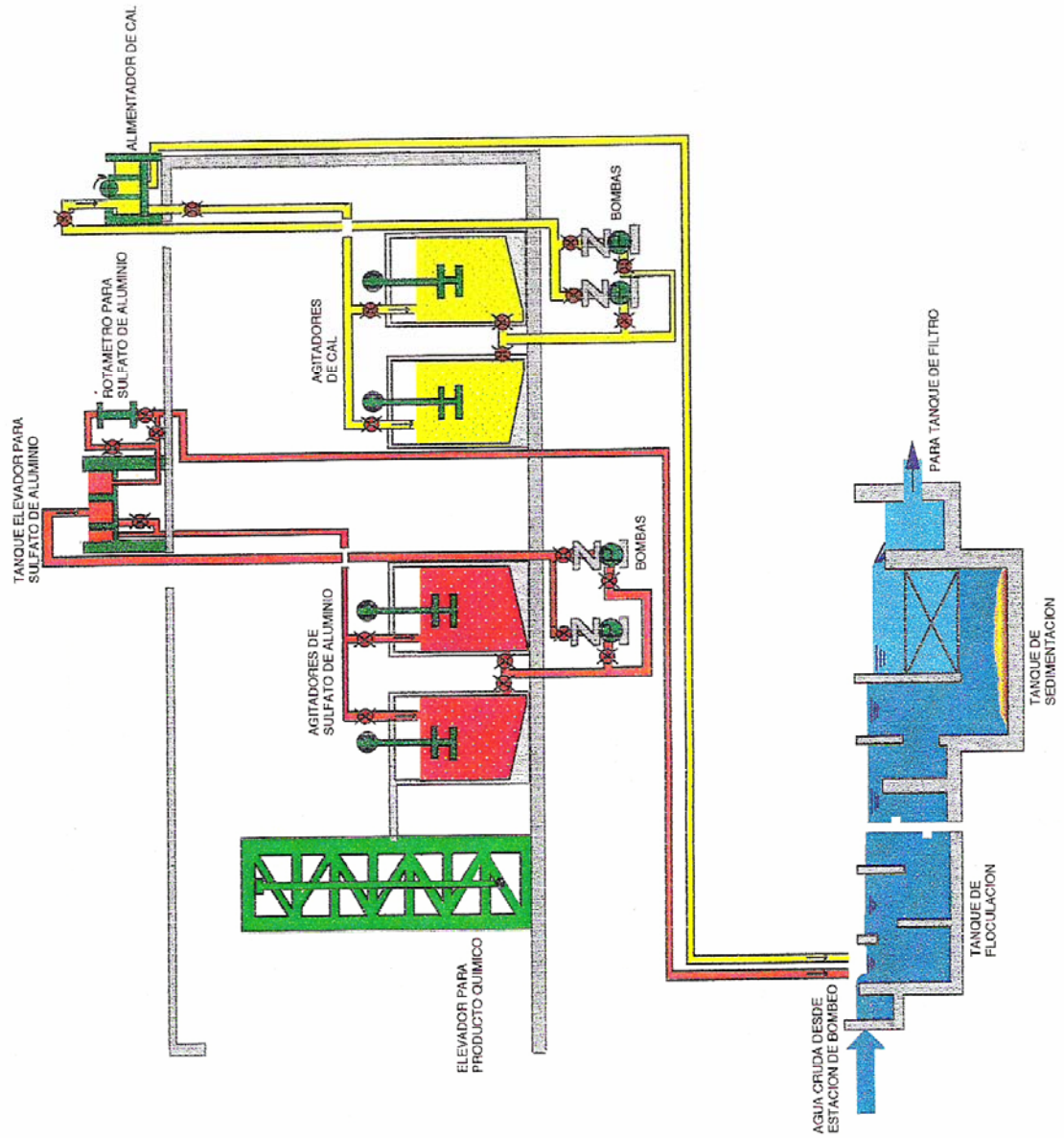
La mezcla de los coagulantes, principalmente el sulfato de aluminio, debe ser efectuada casi instantáneamente y en toda la masa líquida del agua, en forma uniforme.

Por lo tanto, las condiciones de mezcla son esenciales para dispersar uniformemente y proporcionar los choques entre las partículas.

Los tanques de mezcla tienen capacidad operativa de 6 m<sup>3</sup> cada uno.



Figura 3 Sistema de dosificación



Fuente: Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

- **Dosificación de cal**

La cal ayuda a optimizar el pH y evitar el exceso de uso de sulfato de aluminio, lo que implica la construcción del cuarto químico, tanque de solución e instalación del sistema de bombeo. Este sistema de dosificación era anteriormente realizado por el método granular seco, aplicado por gravedad, a través de una tolva con dosificadores de solera giratoria, los cuales estaban equipados con un tanque de disolución, con agitador y un regulador de entrada de agua para disolución.

Estos dosificadores quedaron fuera de servicio por el deterioro de su mecanismo, aumentando la problemática de tratamiento, debido a que era imposible controlar la acidez del agua, ya que la cal era utilizada para regular el pH.

Al inicio de su operación, dicho equipo era posible graduarlo con el regulador de la solera giratoria para obtener la cantidad de onzas por minuto de cal necesaria para la dosificación. Con el correr de los años fue perdiendo su exactitud, a tal grado de ser eliminado por deterioro físico.

Este sistema, fue sustituido por un sistema volumétrico de solución diluida, con aplicación por bombeo y alimentador de cal tipo *Rotodip*, que consiste en un tanque en el cual el nivel del líquido se mantiene por medio de una válvula de flote o vertedero y una rueda de inmersión.

Con este nuevo sistema es posible hacer soluciones con distintas concentraciones, ya que permite conocer con facilidad el volumen total del tanque, así como cualquier otro volumen inferior a éste, por medio de la escala volumétrica con que cuenta.

Asimismo, por medio del densímetro es posible confrontar el porcentaje de la solución en el tanque de aplicación, para luego ser usado en la determinación de los litros por minuto de solución necesaria para la aplicación que se determine en la prueba de jarras.

- **Dosificación de cloro gaseoso**

Se instalaron cuatro bombas nuevas, construcción del nuevo cuarto de clorador y equipo de cloración. Esta instalación se usa para precloración y postcloración.

La última etapa de tratamiento de la planta Santa Luisa es la potabilización con cloro líquido. Se inyecta éste después de medir cloro gas con rotámetro y se mezcla con agua a presión. La cloración es la última etapa para mantener cloro residual en el tanque y red de distribución. El objeto de la precloración es mejorar la operación de los filtros, por la reducción y equilibrio de la cantidad de bacterias y algas, además, por el control de formación de bolas de lodo, mejoría en la coagulación, reducción de materia en suspensión, causante de sabor y olor por oxidación, retardando su descomposición en los sedimentadores y para eliminar hierro y manganeso que están en el agua cruda. Por lo tanto, la precloración se hace antes de ingresar al tanque de floculación y se aplica adecuadamente cuando hay necesidad.

El equipo de cloración antes de la rehabilitación, ha sufrido daño durante el tiempo de operación de la planta, debido a la corrosión que causa la reacción del cloro sobre ellos.

El clorinador anterior era utilizado para inyectar cloro únicamente en la salida de agua filtrada, con una escala de 0-200 libras por día y si se quería preclorar se debía aplicar hipoclorito de calcio en un depósito colocado en la salida del sedimentador grande.

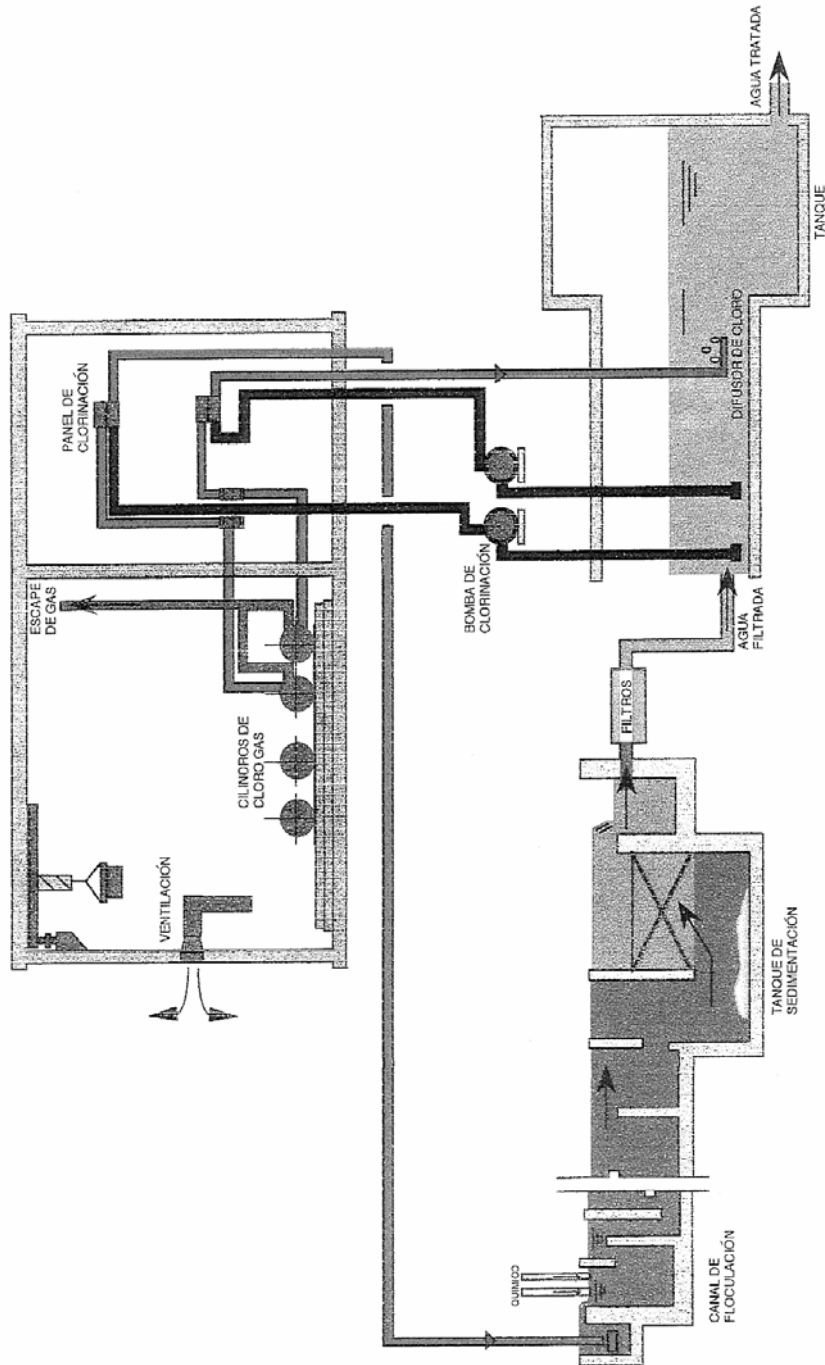
La operación del sistema de clorinación requiere la existencia de una presión de agua suficiente para operar el clorador de gas, y un control de arranque/parada, basado en el nivel de agua en el tanque de tratamiento. La presión en la tubería debe ser suministrada por una bomba, y el arranque/parada por medio de un guarda nivel que alimente o corte la corriente del motor de la bomba.

El diseño del sistema ofrece un modo económico de dosificación que funciona automáticamente cuando se utiliza el agua. Los dosificadores de gas son activados por un vacío creado por el flujo de agua o fluidos del proceso por el eyector remoto. El diafragma de resorte. Una vez abierta, la válvula de retención, el eyector permite que el vacío regrese por la tubería de vacío al regulador del sistema, montado en la válvula de gas de un tanque, gas cloro. Esto hace que la válvula de entrada se abra, iniciando el flujo de gas. En este punto, el vacío es regulado por un diafragma de resorte. El gas pasa por los rotámetros, las válvulas reguladoras de caudal y la tubería del sistema hasta el conjunto de válvula de retención del eyector. Aquí, éste se mezcla con el agua o fluido del proceso y se aplica en forma de solución.

Cada uno de los sistemas de clorinación está compuesto de los siguientes elementos o equipos:

- Dos bombas (una en operación y una de repuesto)
- Un filtro de línea
- Un inyector
- Un manómetro
- Un rotámetro (medidor de flujo)
- Adaptador para cilindro

Figura 4 Sistema de inyección de cloro



Fuente: Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

- **Postclorinación**

Nueva instalación. Se modificó el punto de aplicación de cloro al agua tratada para desinfectarla. El sistema de clorinación cuenta con dos rotámetros tipo área, con escala en Kg/hora y Lb/día. Uno de ellos es utilizado para postclorinación.

## **2.4 Sistema de floculación**

Las partículas coloidales, después de ser desestabilizadas, permiten ser reunidas para formar partículas más densas y mayores. La agitación en esta fase, debe ser controlada de tal forma que permita un contacto físico entre las partículas, para causar un agrupamiento y también para no romper o disgregar aquellos flóculos ya formados. En una agitación muy lenta, con poca energía, los flóculos formados tenderán a sedimentar en las cámaras de floculación y no en el sedimentador.

Los dos factores que deberán ser tomados en cuenta para que un floculador funcione bien son los siguientes:

- Tiempo de retención
- Agitación (gradiente de velocidad)

El tiempo de retención es importante, pues define en cuánto tiempo el agua permanece dentro de las cámaras de floculación, en agitación continua y gradual. Este tiempo varía de 30 a 45 minutos.

Otro factor preponderante es la intensidad de agitación necesaria para promover la fricción de las partículas dentro de la masa líquida. Esa intensidad de agitación es proporcionada por los mezcladores, por medio de pantallas, aprovechando la fuerza hidráulica del agua.

En esta parte se dosifica sulfato de aluminio para formar el flóculo. También en esta parte se aplica la precloración. Según sea la necesidad, dependiendo del valor del pH. La cal en pequeñas dosis favorece generalmente la floculación y actúa como un neutralizador, para la regulación del pH.

En la planta Santa Luisa el floculador es del tipo hidráulico de pantalla (dimensionado para  $60,000\text{m}^3/\text{día}$ ), el cual está proyectado para proporcionar un gradiente de velocidad decreciente, o sea una alta energía en la entrada de la cámara, perdiéndose gradualmente después, y luego preparándose para entrar en la cortina del sedimentador sin que haya quiebra de los flóculos formados.

- **Depósito de floculación**

A continuación del pozo de recepción, existe un depósito de floculación, con una capacidad de procesamiento de  $60,000\text{m}^3/\text{día}$ , con un método de canalización pro flujo circulante horizontal. La canalización tiene una pendiente inclinada rápida en la parte de flujo superior, para que pueda realizarse la mezcla de productos químicos y una pendiente lenta en la parte de la circulación inferior.



Estructuralmente, el tiempo de permanencia en la canalización inferior y debido a que la velocidad de flujo en la misma estaba retrasada con respecto a la capacidad de procesamiento, se producían flóculos en la canalización y parte de ellos se sedimentaron. Además, los flóculos que se degradaban en la canalización se pulverizaban en la parte de entrada del depósito de sedimentación, debido al gran movimiento del flujo de agua en esa etapa.

Por otro lado, el jabón mezclado en el agua cruda hacía que se produjera una gran cantidad de espuma en la parte inferior de la canalización.

Por lo tanto, se reajustó el punto de mezcla de productos químicos y se modificó el método de floculación , para evitar sedimentación de flóculos en el tanque.

Figura 5 **Sistema de floculación**



## **2.5 Sistema de sedimentación**

El objetivo del sedimentador es separar el agua clara de las partículas en suspensión, a través de la reacción del sulfato de aluminio; para que por medio de esta reacción se obtenga una coagulación adecuada, es decir, la formación de un floculo grande y pesado, sedimentado los floculos que se formaron en el canal de floculación.

La sedimentación se hace por medio de dos tanques de sedimentación. Se explica brevemente la parte rehabilitada, en este caso del sedimentador No.2 de flujo laminar.

Este tanque es una de las partes que se rehabilitó instalando unas planchas inclinadas. Cada sección está separada por una compuerta. Éstas tienen un ángulo de 60 grados, con respecto a la horizontal. Al ingresar el agua, en la parte inferior del tanque, esta estructura detiene por peso los floculos y permite que el agua clara suba a la parte del tanque.

En este caso, como en el caso del sedimentador No.1, hay unos canales de rebalse de los tanques que normalmente permiten la salida del agua clara.

Estos canales llegan a un colector general, que se unen con los del tanque sedimentador No.1, y utilizan la misma tubería de 18" (pulgadas) para llevar el agua hacia los tanques de filtración.

- **Depósito de sedimentación por flóculación**

El depósito de sedimentación se compone del depósito construido originalmente y rehabilitado, denominado depósito de sedimentación No.1 y una ampliación posterior denominada depósito de sedimentación No.2.

El depósito de sedimentación No.1 fue parcialmente destruido durante el terremoto de 1976 y en su lugar se instaló una placa oscilante, inclinada en una parte del depósito, para mejorar la efectividad de la sedimentación. El depósito de sedimentación No.2 fue construido posteriormente y es una nueva estructura. La capa intermedia del depósito está formada totalmente por placas oscilantes inclinadas.

Figura 6 **Sistema de sedimentación A**



Figura 7 Sistema de sedimentación B



Estas obras fueron realizadas por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), con sus propios recursos y tecnología, utilizándose como placa oscilante el material de construcción básico más utilizado, es decir, placas de cemento reforzado con pedregullo y los soportes son de placas de madera y acero, lo que deja dudas sobre su durabilidad. Especialmente en el caso del depósito de sedimentación No.2, la placa oscilante inclinada se estaba hundiendo y las maderas de soportes se soltaban, haciendo que sea imprescindible una reparación general. En éste se realizó la reparación total, es decir el cambio del material de placas inclinadas, siendo ahora de PVC.

## **2.6 Sistema de filtración**

Nuevo sistema de filtros (6 cámaras filtrantes). La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final que se realiza en una planta de tratamiento de agua, y por consiguiente con los patrones de potabilidad.

Estas instalaciones están localizadas en la última parte de la planta de purificación para remover los componentes de turbiedad.

Utilizando el agua producida por la planta de tratamiento con una serie de instalaciones, incluyendo el tanque de mezcla de químicos, la formación de flóculos en el tanque de sedimentación, las instalaciones del filtro rápido, producen agua filtrada la cual limpia aplicando el principio de observar la limpieza del agua.

La filtración rápida, realizada por gravedad, es usualmente empleada en las plantas de tratamiento para fines de abastecimiento público. En este caso, que es de flujo descendente, la filtración rápida puede realizarse con tasa declinante o constante, en filtros de capa única de arena.

## **2.7 Tanques de distribución**

Cambio de 2 compuertas de los tanques de distribución e instalación de 2 medidores de nivel de salida, posteriormente el agua potabilizada se distribuye a cada sector.



### **3. TEORÍA DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN**

Los primeros diseños de filtros rápidos aparecen en Norteamérica a mediados del siglo pasado, bajo patente, los cuales fueron llamados filtro mecánico o americanos, en contraposición a los filtros ingleses.

El primer filtro rápido lo construyó Smith Hyatt en 1855 en la ciudad de Somerville. La gran innovación fue la limpieza del lecho filtrante, pues en lugar de hacerse raspando la capa superior del mismo, el cual era un sistema largo y costoso, se hacía invirtiendo el sentido del flujo, donde en el proceso de filtrado era de arriba hacia abajo y en el lavado de abajo hacia arriba. Esto facilitaba la operación casi continua del flujo.

Este sistema pasó a Bélgica, Alemania y Francia y pronto surgieron varias compañías que obtuvieron patentes para sus respectivos diseños. En los últimos sesenta años, tanto la teoría como la práctica de la filtración se han venido desarrollando notablemente, pero sin que se les hayan hecho modificaciones sustanciales al proceso inicial.

#### **3.1 Definición**

La filtración es un mecanismo en el cual se da la remoción de partículas suspendidas y coloidales a través de un medio poroso.

Una planta de filtración rápida por arena consiste fundamentalmente en un lecho de arena, relativamente gruesa, que elimine previamente los sólidos coagulados arrastrados después de la sedimentación.

### **3.2 Mecanismo de filtración**

En el proceso de filtración son considerados dos mecanismos: transporte y adherencia. El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico e incluye los mecanismos de impacto inercial, intercepción, sedimentación, difusión y acción hidrodinámica. En cambio los mecanismos de adherencia están gobernados principalmente por las características de las superficies de las partículas suspendidas y de los granos.

El mecanismo de impacto inercial. Pone de manifiesto que cuanto mayor es la velocidad y menor el diámetro de los granos, mejor será la posibilidad de que las partículas suspendidas dejen la línea de corriente y colisionen con los granos.

Respecto al mecanismo de intercepción, afirma que las partículas suspendidas tienen densidad aproximadamente igual a la del agua, ellas serán removidas de la suspensión cuando, con relación a la superficie de los granos del medio filtrante, las líneas de corriente están a una distancia menor que la mitad del diámetro de las partículas suspendidas.



Se ha observado que las partículas relativamente pequeñas presentan un movimiento errático cuando se encuentran suspendidas en un medio líquido, conocido como movimiento *Browniano*, debido al aumento de la energía termodinámica y a la disminución de la viscosidad del agua. Lo anterior es llamado mecanismo de difusión.

La acción hidrodinámica de las partículas suspendidas en un fluido con gradiente de velocidad constante, está sometida a velocidades tangenciales variables en dirección perpendicular al del escurrimiento, provocando una diferencia de presión en dirección perpendicular al escurrimiento, haciendo que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja.

- **Factores que influyen en la filtración**

La eficiencia de la remoción de las partículas coloidales en el lecho filtrante está relacionada con las siguientes características de la suspensión:

- El tipo de partículas suspendidas, la cual está relacionada con el tipo, tamaño y densidad de las partículas.
- Resistencia o dureza de las partículas en suspensión
- Temperatura del agua
- Concentración de partículas en el efluente
- Potencial zeta de la suspensión y pH del afluente

Las características del medio filtrante es otro factor importante que influye en la filtración, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Tipo y tamaño efectivo del medio filtrante
- Coeficiente de uniformidad, esfericidad específico de los granos del material filtrante
- Espesor del lecho filtrante

### **3.3 Lecho filtrante**

Las características del lecho filtrante que mayor influencia tienen en la eficiencia de los filtros son su granulometría, la porosidad del lecho filtrante y su profundidad.

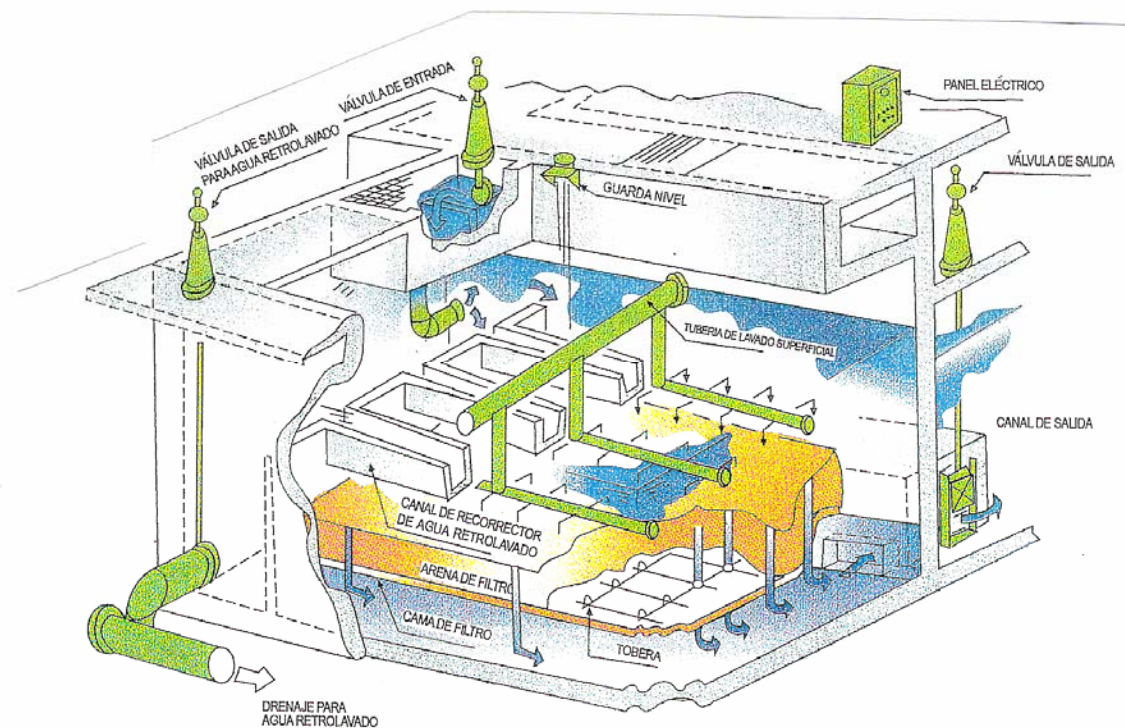
### **3.4 Funcionamiento de filtros**

La instalación del filtro rápido es una etapa muy importante del proceso de la planta de purificación, siendo su objetivo, remover los componentes más pequeños que causan la turbiedad. El agua proveniente de los tanques de sedimentación es conducida al filtro por medio de 2 tuberías (450 y 500 mm), a un foso central localizado en la entrada del mismo, éste se divide en 2 canales de distribución, los cuales distribuyen equitativamente el flujo de agua a cada uno de los filtros por medio de vertederos en la entrada a los filtros.

La batería filtrante consta de: 6 filtros de 45 m<sup>2</sup>, con capacidad de 40,000 m<sup>3</sup>/día. Lavado de los filtros mediante el retorno de agua e inyección de agua (retrolavado y lavado superficial).

El flujo de agua está siendo filtrada, como se observa en la figura que aparece a continuación. El agua cruda entra en la tubería del tanque de sedimentación, hace que el flujo de entrada hacia el tanque de sedimentación llegue por medio de la válvula de flujo de entrada.

Figura 8 **Filtro**



Fuente: **Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento**  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

En el tanque del filtro rápido el flujo de agua deberá ser interrumpido y el filtro de arena deberá ser regenerado por lavado, antes es imposible continuar con la función de filtrado en el flujo de agua, así, antes que la turbiedad en el agua exceda el límite o antes que el flujo de filtración sea imposible.

Es necesario que las instalaciones del filtro rápido sean limpiadas para permitir una operación normal de filtrado y lavado. Procesos como el retrolavado y lavado superficial son utilizados conjuntamente para la limpieza del filtro.

### **3.5 Procesos de filtración rápida**

Una planta de filtración rápida comprende los procesos de coagulación, sedimentación o decantación y filtración rápida. Los filtros hacen la labor de pulimento, generalmente no reciben más de 10 unidades de turbiedad. Con el fin de completar la remoción de microorganismo patógeno presentes en el agua cruda, se aplica la desinfección.

Una planta de filtración rápida está compuesta por procesos cuyos mecanismos de remoción son físicos y químicos, utilizando altas tasas de velocidad.

Se lavan aplicando un flujo ascensional de agua para expandir el lecho filtrante, método denominado, retrolavado; dicho método toma de 8 a 15 minutos como máximo, por lo que esta operación se puede ejecutar muy fácilmente (cada 50 a 70 horas).

Debido a esta ventaja, es que los filtros rápidos se pueden operar normalmente en un rango de velocidades de 80 a 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d (3.5– 2.5 m/h). Dependiendo la tasa óptima de las características del lecho filtrante y de la suspensión, requiriendo de áreas muy pequeñas con relación al filtro lento.

Las altas tasas de velocidad con las que funciona y el empleo de coagulación (proceso que demanda sumo cuidado en su operación), demanda de un recurso humano calificado y mayores recursos económicos y materiales para su operación y mantenimiento.

Los filtros rápidos pueden estar compuestos de arena natural de sílice, carbón de antracita triturado, magnetita (mineral) triturada y arenas de gránate. Las arenas naturales granulares y los minerales triturados que se emplean normalmente, difieren en tamaño y en distribución de tamaños, en forma y en variación de forma, así como en densidad y composición química.



## 4 FUNCIONAMIENTO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA SANTA LUISA

Las actuales unidades de filtración fueron construidos a finales de 1997 con fondos JICA (*Japan Internacional Cooperation Agency*), en sustitución de los antiguos filtros a presión.

Las unidades están constituidas por una batería de seis filtros rápidos de tasa constante y altura variable.

Los parámetros de diseño contenidos en el Manual de Operación y Mantenimiento elaborados por *Hitachi Plant Engineering & Construcción Co., Ltd* y *Kyowa Engineering Consultants Co., Ltd*, son los siguientes:

- Flujo de agua tratada: 400 l/s
- Método de filtración: filtración rápida por arena, de 600 mm de espesor
- Diámetro efectivo: 0.55 – 0.65 mm. coeficiente de uniformidad: < 1.7
- Área de cada unidad: 45 m<sup>2</sup>
- Tasa de filtración: 150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d
- Velocidad de retrolavado: 0.6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d

## 4.1 Descripción

El agua proveniente de los sedimentadores (convencional y de placas) es conducido a la batería de filtros por medio de dos tuberías (450 y 500 mm) un pozo central localizado en la entrada del mismo, éste se divide en dos canales de distribución, los cuales distribuyen equitativamente el flujo de agua a cada uno de los filtros por medio de vertederos rectangulares, ubicados en la entrada a los mismos.

El agua que ingresa a cada uno de los filtros, pasa a través del lecho filtrante de arriba hacia abajo. El agua que atraviesa la cama de arena se le denomina agua filtrada. Luego de pasar por la cama de arena se encuentran unas boquillas plásticas (5,760 unidades) que sirven para dejar que pase únicamente el agua hacia la parte inferior de la cámara de filtración. Cuando el nivel del agua dentro del filtro sube hasta donde se encuentra el electrodo del *Swith* de nivel, se enciende una luz en el panel eléctrico ubicado en el cuarto de operadores, la cual indica la necesidad del lavado en la unidad. Para proceder con el lavado, hay dos pasos a seguir: lavado superficial y retrolavado.

Actualmente el lavado de los filtros se realiza cuando completan una carrera de filtración de cuarenta y ocho horas, debido a los bajos caudales de entrada a la planta, con respecto al caudal de diseño.

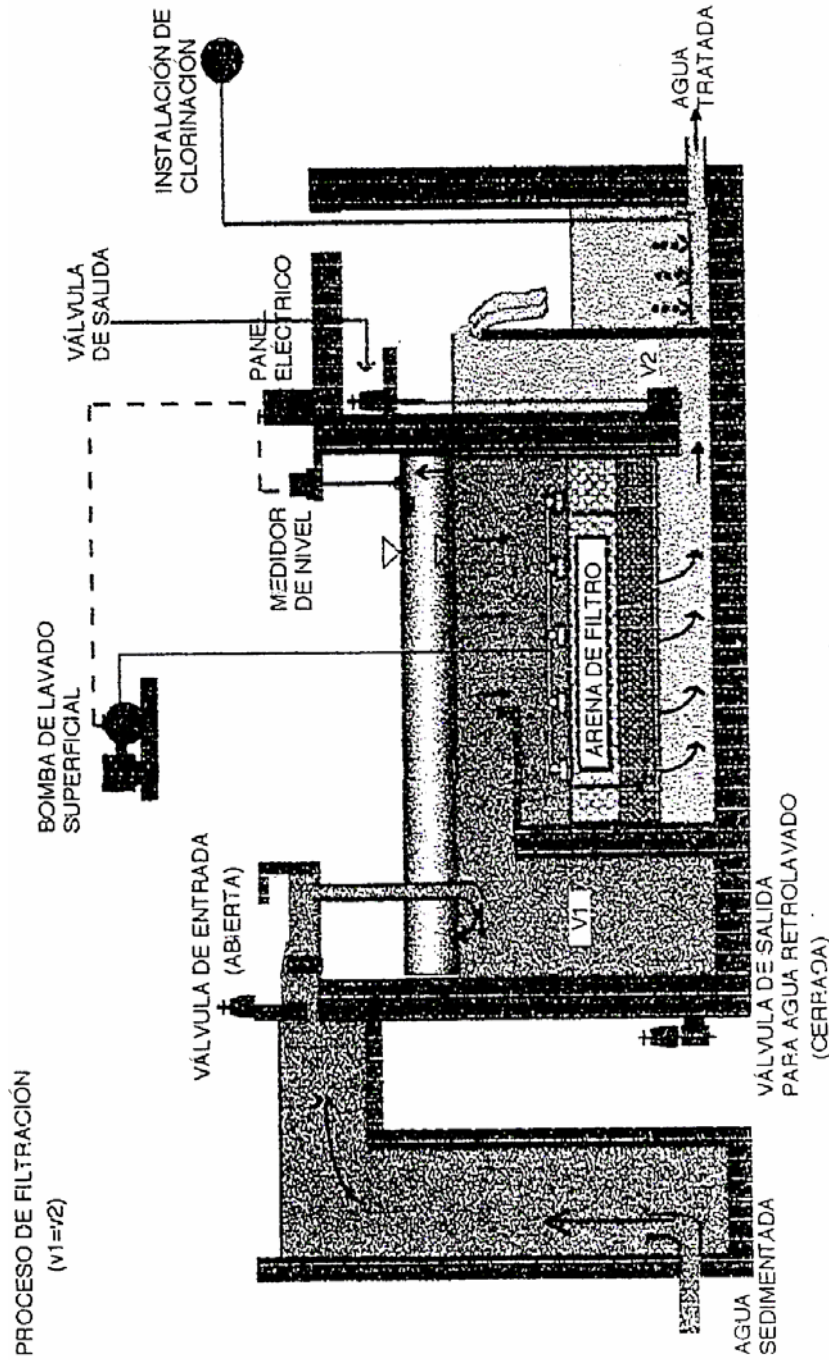
### ✓ **Proceso de Filtrado**

- Abrir totalmente la válvula de entrada al filtro (400 mm).



- Asegurarse que las válvulas de drenaje (700 mm) y de lavado de superficie (300 mm) estén cerradas.
- Esperar que el nivel de agua dentro del filtro llegue a la parte superior de los canales.
- Abrir totalmente las compuertas de salida del filtro.
- Esperar a que el nivel de agua rebalse el vertedero de salida del tanque de recolección.
- Observar que el nivel de agua al otro lado del vertedero de salida alcance dos metros de altura.
- Abrir las dos válvulas de salida (500 mm).

Figura 9 Proceso de filtración



Fuente: **Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento**  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

## **4.2 Lavado de superficie**

El lavado superficial se realiza por medio de una bomba de tipo horizontal con una capacidad de 9 m<sup>3</sup>/min., la cual inyecta agua a presión sobre la superficie del lecho filtrante para romper las bolas de barro. Existe un panel eléctrico, donde se da la señal de arranque a la bomba. Es importante señalar que este proceso se podrá realizar únicamente a un filtro a la vez.

El lavado superficial consiste en lo siguiente: la bomba impulsa el agua limpia hacia la unidad de filtración donde se encuentra una tubería de 300 mm a lo ancho de la unidad, a 30 cm del borde superior de las canaletas de lavado, distribuyendo el agua a través de una tubería de 100 mm de diámetro. El agua ingresa a la parte superior del lecho filtrante a través de unas boquillas de 25 mm de diámetro.

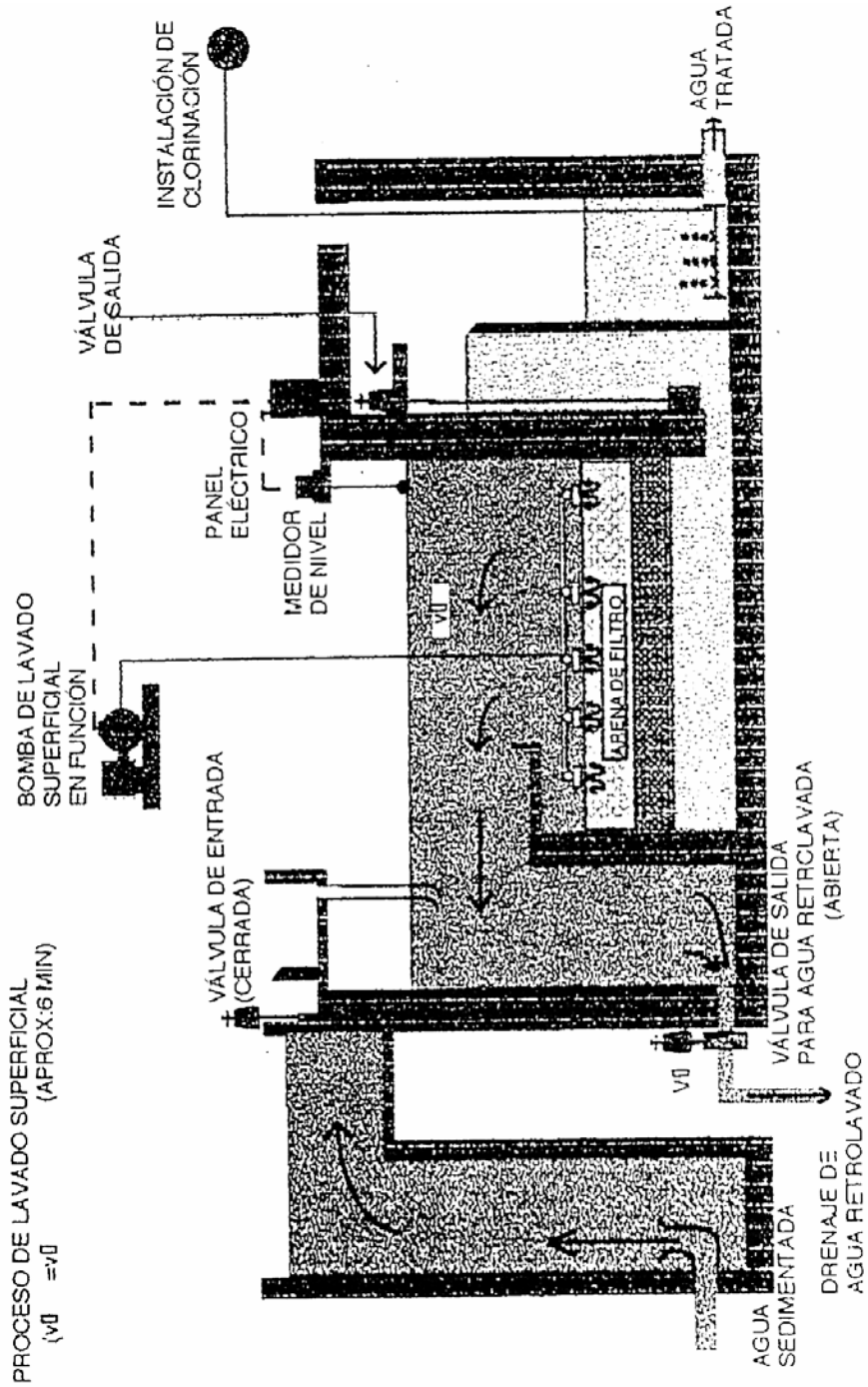
El tiempo de funcionamiento de las bombas es de aproximadamente seis minutos, tiempo estimado en el diseño.

### **Proceso de lavado de superficie**

- Abrir la válvula de lavado superficial (300 mm), del filtro que se está lavando.
- Cerrar la válvula de entrada de agua cruda.
- Abrir la válvula de drenaje hasta la marca aproximadamente de 1/8.
- Arrancar la bomba de lavado, en el panel de control, instalado en la parte superior del filtro rápido. La bomba de lavado superficial, se encuentra instalada en el cuarto de bombas. Verificar que las válvulas de succión y descarga estén abiertas.

- Esperar que la bomba de lavado de superficie pare automáticamente, aproximadamente 6 minutos.
- Cerrar la válvula de lavado de superficie.

Figura 10 Proceso de lavado superficial



Fuente: **Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento**  
Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

### **4.3 Retrolavado**

El proceso de retrolavado consiste en inyectar agua por la parte de abajo del filtro a través de unas boquillas, las cuales distribuyen el agua uniformemente en todo el lecho filtrante. El objetivo del proceso es provocar la expansión del lecho filtrante, los granos se froten y pueda desprender las partículas que han sido retenidas en la operación de filtrado.

Se hace utilizando el principio de gravedad por diferencia de niveles. Estando abiertas las compuertas que dan paso al agua entre la cámara de agua tratada y el tanque de filtración, se abre el drenaje del filtro totalmente, por diferencia de niveles el agua circula, en la dirección de la cámara de agua filtrada hacia dicho tanque. El proceso de retrolavado dura aproximadamente seis minutos, tiempo establecido por los ingenieros japoneses en el diseño de las unidades. El agua del lavado de la superficie y el agua del retrolavado son conectados en el drenaje y son descargados por la válvula de drenaje.

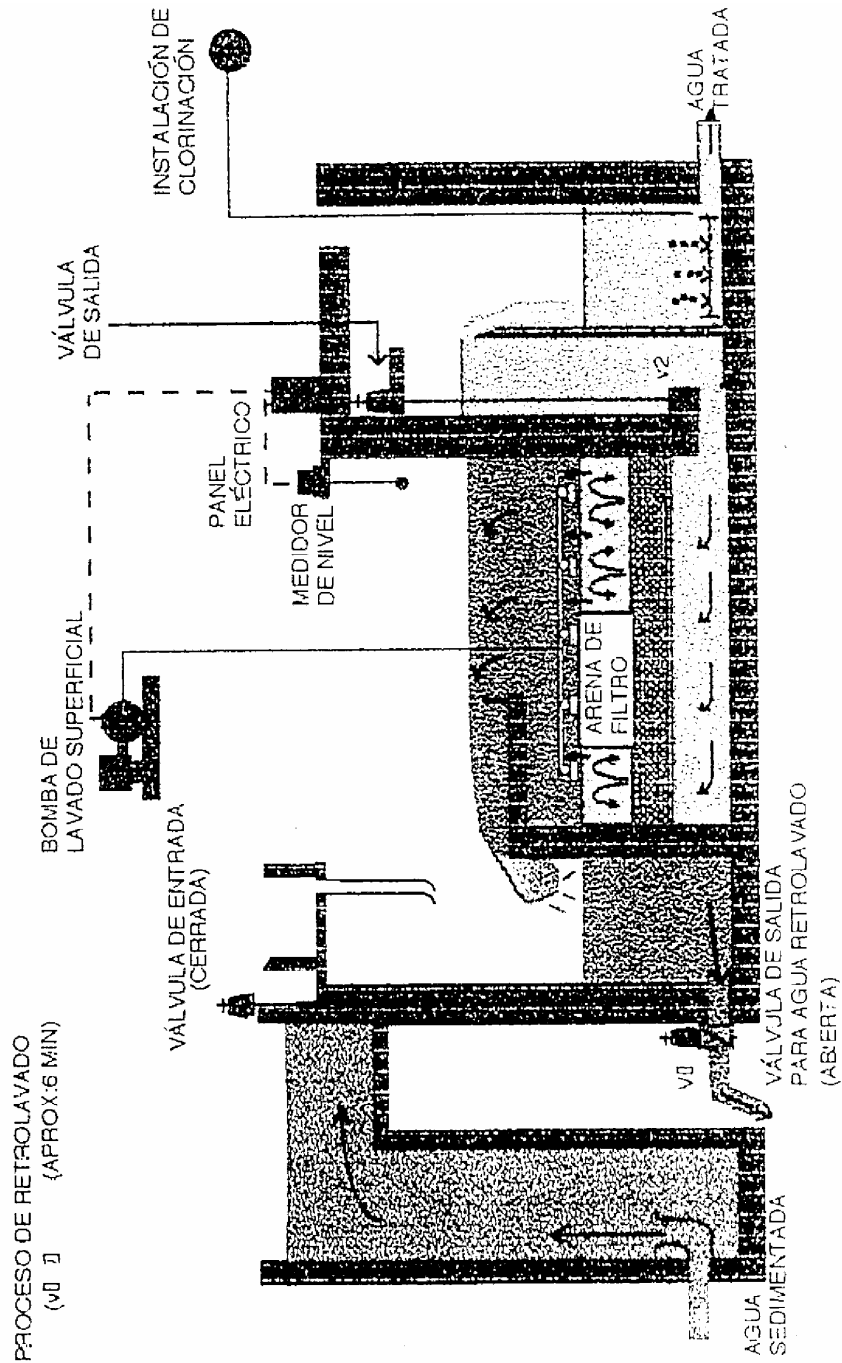
#### **✓ Tanque de reserva**

Es muy importante durante la operación del filtro rápido mantener el nivel de agua, dentro del tanque colector de agua filtrada; en ciertas ocasiones tales como bajo caudal de agua, será necesario utilizar el contenido del tanque para mantener el nivel.

✓ **Proceso de retrolavado**

- Abrir totalmente la válvula de drenaje
- Esperar seis minutos y/o hasta que el agua que sale de la cama filtrante esté limpia.
- Cerrar la válvula de entrada de agua cruda

Figura 11 Proceso de retrolavado



Fuente: **Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento**  
 Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993



## 5 ENSAYOS DE EVALUACIÓN Y RESULTADOS

El procedimiento a utilizar, fue tomado del manual IV: Evaluación de Filtración rápida del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), el cual se detalla a continuación.

### 5.1 Velocidad y caudal de filtración

El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad y el caudal con el que está operando cada una de las unidades.

**El equipo a utilizar es el siguiente:**

- Una regla graduada
- Un cronómetro

El procedimiento para el cálculo de la velocidad de filtración se describe seguidamente:

- Colocar la regla dentro del filtro
- Cerrar la válvula de ingreso del afluente
- Medir el tiempo ( $T_f$ ) en segundos, necesario para que el nivel del agua baje de una marca de la regla a la siguiente, una distancia de (H) 10 cm.
- Repetir varias veces la medición y promediar los valores de ( $T_f$ )

- Calcular la velocidad de filtración, con la siguiente ecuación:

$$V_f \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{/d)} = V_f * 86,400 / (A_f * T_f)$$

**Donde:**

Af: Área del lecho filtrante (m<sup>2</sup>)

Tf: Tiempo de filtrado (s)

Vf: Volumen filtrado (m<sup>3</sup>)

Debe tenerse cuidado de que el nivel del agua esté siempre por encima de las canaletas de lavado mientras se efectúan las mediciones. La tasa de filtración depende de muchos factores como: tipo de suspensión del afluente, (agua decantada, coagulada, prefloculada, con o sin uso de polímero auxiliar, color verdadero, turbidez, etc).

Bajas velocidades de filtración no son sinónimo de una alta eficiencia y viceversa. La velocidad de filtración tiene únicamente interrelación con la calidad del agua en aguas difíciles de tratar.

Los filtros de la planta Santa Luisa son lavados cada 48 horas. Se aprovechó el momento de lavado para realizar las pruebas, con el objetivo de no desperdiciar el agua utilizada para el lavado de las unidades, sobre todo en la época de verano, donde los caudales de entrada a la planta son relativamente bajos, obligando a que ésta trabaje por debajo del caudal de diseño. La planta Santa Luisa cuenta con seis unidades de filtración.

Conforme a procedimientos antes descritos, se obtuvieron resultados de cada una de las pruebas destinadas a la evaluación de las unidades de filtración, las cuales se detallan a continuación.

Se efectuaron tres mediciones por cada unidad de filtración. Los resultados se muestran en las tablas 1-6. La tabla 7, contiene los promedios de velocidad de filtración por cada unidad.

La siguiente simbología fue utilizada para el cálculo de la velocidad de filtración:

Af: Área de la caja de cada uno de los filtros ( $m^2$ ),  $Af = 57.8 m^2 = 8.50 * 6.80$

Af: Área de cada uno de los filtros ( $m^2$ ),  $Af = 45.05 m^2 a 8.50 * 5.30 m$

Tabla I Velocidad de filtración

FILTRO NO.1								
FECHA	HORA	AF (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )	H (m)	Tf (s)	VF (m <sup>3</sup> )	Vf (m <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> /d)	Q (l/s)
05/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	33	5.78	335.91	225
06/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	60	5.78	184.75	330
07/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	87	5.78	127.42	300

Tabla II Velocidad de filtración

FILTRO NO.2								
FECHA	HORA	AF (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )	H (m)	Tf (s)	VF (m <sup>3</sup> )	Vf (m <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> /d)	Q (l/s)
05/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	74	5.78	149.8	315
06/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	65	5.78	130.42	310
07/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	83	5.78	175.96	275

Tabla III Velocidad de filtración

FILTRO NO.4								
FECHA	HORA	AF (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )	H (m)	Tf (s)	VF (m <sup>3</sup> )	Vf (m <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> /d)	Q (l/s)
08/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	92	5.78	120.49	275
09/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	71	5.78	158.13	305
12/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	88	5.78	167.96	325

Tabla IV Velocidad de filtración

FILTRO NO.6								
FECHA	HORA	AF (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )	H (m)	Tf (s)	VF (m <sup>3</sup> )	Vf (m <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> /d)	Q (l/s)
08/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	85	5.78	130.42	240
09/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	77	5.78	143.98	257
12/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	88	5.78	183.02	248

Tabla V Velocidad de filtración

FILTRO NO.8								
FECHA	HORA	AF (m <sup>2</sup> )	Af (m <sup>2</sup> )	H (m)	Tf (s)	VF (m <sup>3</sup> )	Vf (m <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> /d)	Q (l/s)
13/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	99	5.78	111.97	258
14/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	78	5.78	145.85	295
15/01/2004	9:00AM	57.8	45.05	0.1	61	5.78	181.72	265

Tabla VI Promedio de velocidad de filtración

FILTRO NO.	1*	2	4	6	8
VELOCIDAD DE FILTRACIÓN (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)	158.08	152.08	148.19	145.8	148.51
CAUDAL (l/s)	315	300	301.87	248.33	272.87

\* Se omitió el dato extremo 335.91m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d del filtro No.1 del calculo de promedios de velocidad de filtración

Los resultados obtenidos de cada prueba se compararon con los parámetros de diseño contenidos en el Manual de Operación y Mantenimiento elaborados por *Hitachi Plant Engineering & Construction Co., Ltd.* Y *Kyowa Engineering Consultants Co. Ltd.* Los rangos recomendados por el centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), serán comparados con los parámetros de diseño contenidos en dicho manual.

Las unidades fueron diseñadas con una tasa de filtración de 150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día, estando dentro del rango propuesto por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) de 120-240 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día, para filtración rápida de tasa constante y altura variable.

Del análisis estadístico se obtuvo una tasa de filtración promedio de 161.72 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, en las cinco unidades. Se omitió el valor extremo 335.91 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d el promedio se reduce a 149 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, encontrándose aproximadamente al caudal de diseño (150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d).

En el promedio de las velocidades de filtración de cada unidad se observa que el filtro No.1 resultó tener en promedio la máxima velocidad de filtración:156.06 y el filtro No.5 la menor: 145.80 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d.

La velocidad de filtración está relacionada con el caudal de entrada a la planta en el momento de realizar la prueba, resultando un caudal máximo y mínimos de 330 l/s y 225 l/s respectivamente, los cuales son menores al caudal de diseño de 400 l/s.

En los filtros No.2 y No.4 se puede observar, de los datos obtenidos, que a un caudal mayor de entrada a la planta, le corresponde una velocidad de filtración mayor, no obstante lo anterior no ocurre con el resto de los filtros.

## **5.2 Velocidad de lavado**

El objetivo de esta prueba consiste en determinar el caudal y la velocidad de lavado con que está el filtro.

**El equipo a utilizar es el siguiente:**

- Una regla graduada
- Un cronómetro

**El procedimiento es el siguiente:**

- Se fija la regla graduada a una de las paredes del filtro.
- Cerrar la válvula de ingreso de agua sedimentada y cuando el nivel del agua descienda hasta el medio filtrante cerrar la válvula de salida de agua filtrada.
- Abrir la válvula de desagüe y la de ingreso de agua de lavado.
- Medir el tiempo (T) que tarda en subir el nivel de agua en la caja del filtro una altura H.
- Calcular la velocidad y el caudal de lavado.

$$V_L = H / T$$

$$Q = A * H / T$$

**Siendo:**

A : Área del filtro (m<sup>2</sup>)

H : Variación de la altura del agua (m)

T : Tiempo en que se incrementa una altura H (minutos)

✓ **Aplicación e importancia de la prueba**

El lavado del filtro es la operación por la cual se inyecta agua por la parte de abajo del filtro, con una adecuada presión, con el objeto de que el lecho filtrante se expanda, los granos se froten y se desprenda todo el material que ha quedado retenido entre ellos, en la operación de filtrado.

La mayoría de los problemas en los filtros se origina por un lavado deficiente incapaz de: a) desprender la película que recubre los granos del lecho y b) romper las grietas o cavidades en donde se acumula el material que atrae el agua. Para evitar que esto ocurra con frecuencia, el lavado deberá hacerse con sumo cuidado. La mayor dificultad radica en poder producir una uniforme distribución del flujo ascendente, ya sea por fenómenos hidráulicos o rupturas en los drenes; lo cual trae como consecuencia formación de bolas de barro y desniveles en el lecho filtrante como producto de la pérdida de material.

Los resultados de la velocidad de filtración de cada una de las unidades, están contenidas en la tabla No.7



Tabla VII **Velocidad de lavado**

FECHA	FILTRO NO.	DISTANCIA	TIEMPO DE ASCCENSO DEL AGUA	VELOCIDAD DE LAVADO	CAUDAL DE LAVADO
		H (m)	T (min)	VL (m/min)	Q (l/s)
16/01/2004	1	0.6	0.8	0.75	563.12
17/01/2004	2	0.6	1.2	0.5	375.42
18/01/2004	4	0.6	0.7	0.66	643.57
19/01/2004	5	0.6	0.6	1	750.83
02/01/2004	6	0.6	1	0.6	450.5

La velocidad de lavado recomendado por Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) oscila en un rango de 0.6 – 0.8 m/min, pudiendo estimarse que la velocidad adecuada en m/min es igual al diámetro efectivo de la arena (mm). Según parámetros de diseño la velocidad de lavado deberá ser de 0.6 m/min, el cual se encuentra dentro del rango sugerido por CEPIS.

El filtro No.5 obtuvo la mayor velocidad de lavado 1.00 m/min, correspondiente a un caudal de lavado de 750.83 l/s. En cambio el filtro No.2 presentó la menor velocidad de lavado (0.50 m/min).

La velocidad de lavado recomendado en diseño corresponde al filtro No.6 con 0.60 m/min.

La operación de lavado en las unidades con velocidades por encima del rango recomendado, trae como consecuencia una exagerada expansión del lecho filtrante ésto a su vez contribuye en la pérdida del material filtrante. Por tanto es recomendable adoptar la velocidad recomendada por el diseñador (0.6 m/min) para evitar tal problema.

### **5.3 Duración del proceso de lavado**

Dicha prueba tiene por finalidad determinar como varia la turbiedad del agua de lavado durante el proceso, a fin de determinar el tiempo óptimo en que debe ejecutarse esta operación.

**El material o equipo a utilizar en la prueba es el siguiente:**

- 15 frascos de 150 ml
- Un cronómetro
- Un turbidímetro

**El procedimiento se detalla a continuación:**

- Numerar los frascos del 1 al 15.
- Iniciar el lavado normal del filtro y tan pronto como caiga la primera agua de lavado en las canaletas, llenar el primer frasco rápidamente. Continuar llenando los frascos cada minuto hasta completar los 15.

- Determinar con el turbidímetro las turbiedades de las muestras y dibujar la curva turbiedad versus tiempo en papel logarítmico-aritmético de tres ciclos.
- Determinar en la curva el punto de inflexión inferior en donde ésta tiende a ser asintótica con respecto al eje horizontal. El tiempo óptimo de lavado corresponderá al coincidente con el punto de inflexión. A partir de este momento no se gana nada con prolongar el proceso.

Tabla VIII Turbiedades (UNT) medidas en el proceso del retrolavado

TIEMPO (min)	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 4	FILTRO 5	FILTRO 6
0	11.8	33.1	58	47	23
1	10	17.5	60.1	43.5	20.2
2	9.98	10.28	50	45.9	3.78
3	8.75	7.7	37.7	39.9	4.75
4	9.03	8.1	18.5	34.8	0.95
5	8.75	4.48	14	25.1	0.9
6	8.25	3.99	10.1	17.9	0.88
7	7.95	4.25	7.7	14.1	0.75
8	7.75	4.01	6.9	11.8	0.7
9	8.1	2.95	6.55	9.7	1.03
10	8.25	3.3	5.58	11.25	1
11	7.99	3.2	4.89	10.5	0.72
12	7.58	3.05	4.48	7.75	0.75
13	7.45	3.2	3.95	7.9	0.58
14	7.01	2.35	3.78	5.88	0.69
16	8.98	2.75	5.81	5.44	1.44

Cuando se hace el lavado de un filtro, la turbiedad del agua de lavado aumenta rápidamente al principio, pudiendo llegar a valores superiores a 1,000 unidades de turbiedad y luego, a medida que la arena se va limpiando, va disminuyendo hasta alcanzar cifras inferiores a 10 unidades de turbiedad, las cuales rara vez decrecen aunque se prolongue por largo tiempo el lavado. Al estudiar esta curva se puede determinar el tiempo adecuado de lavado.

El manual de instrucciones contempla un tiempo de seis minutos para el lavado superficial y retrolavado; tiempo actual utilizado para el lavado de filtros en la planta Santa Luisa.

En conformidad a resultados obtenidos de la prueba, el tiempo óptimo de lavado para la batería de filtros, resultó ser de seis minutos, debido a que se puede observar que a partir de este tiempo en adelante, no se obtiene un descenso considerable de turbiedad del agua de lavado, de lo contrario se estaría desperdiciando agua de servicio.

#### **5.4 Bolas de barro**

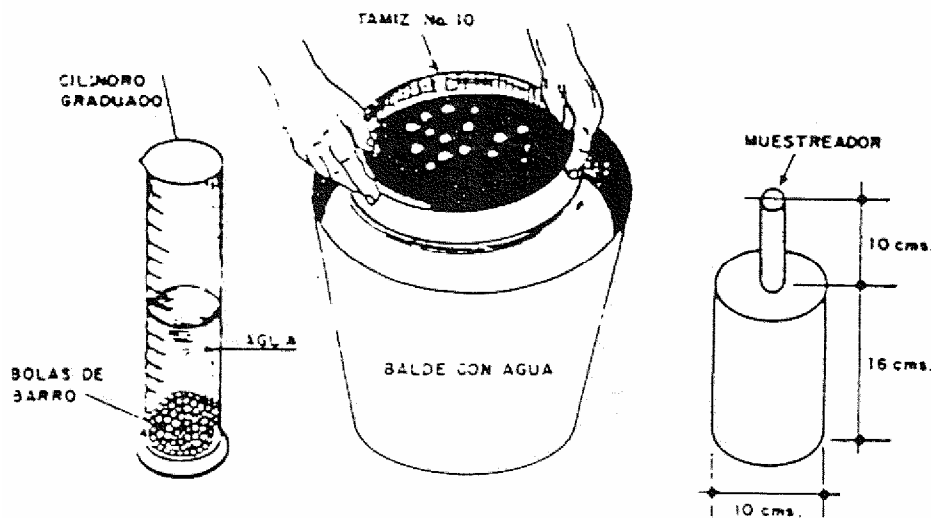
El objetivo de la prueba es determinar la cantidad de bolas de barro existentes en el lecho filtrante.

El material necesario para realizar la prueba consiste en un muestreador, con forma de un cilindro metálico 75 mm de diámetro interno y una altura aproximada de 150 mm, una malla metálica No. 10 (2 mm de abertura) y una probeta de 500 ml.

**El procedimiento se describe a continuación:**

- Lavar normalmente el filtro y drenar el agua hasta el nivel de 20 cm por debajo de la superficie de la arena.
- Determinar el volumen (V) del muestreador.
- Introducir el muestreador por lo menos en cuatro puntos para extraer un número equivalente de muestras. Retirlo con cuidado para que no se caiga el material y colocar todas las muestras en un solo recipiente.
- Tomar el material por partes y colocarlo en un tamiz, el cual se sumerge en un balde de agua. Se mueve el tamiz suavemente para que desprenda la arena y queden retenidas las bolas de barro.

**Figura 12 Equipo para realizar el ensayo de bolas de lodo**



Las bolas de barro se transfieren a la probeta donde se ha colocado un determinado volumen de agua.

El volumen de bolas de lodo estará dado por el aumento de volumen del agua contenida en la probeta.

El resultado se expresa en porcentaje con respecto al volumen del agua contenida en la probeta.

El resultado se expresa en porcentaje con respecto al volumen de muestra procesada:

$$\% \text{ bolas de barro} = \frac{\text{incremento de volumen en la probeta}}{\text{volumen de la muestra}} \times 100$$

Un filtro bien conservado no debe contener bolas de barro. Sin embargo, con el tiempo éstas pueden irse formando hasta llegar a un 1 por ciento sin que afecten mayormente el funcionamiento de la unidad. Por encima de ese valor de eficiencia se ve afectada cada vez en mayor grado.

Porcentajes mayores de un 5 por ciento están indicando la necesidad de reconstrucción o tratamiento intensivo del medio filtrante.

La presencia de bolas de barro conlleva a disminuir el área de paso de flujo. Este fenómeno se presenta paulatinamente: primero se llenan las cavidades dentro del lecho, al no ser removido este material se compacta y una cavidad se une otra hasta formar bolas relativamente grandes. En estas condiciones, el filtro deja de ser útil como proceso de tratamiento y debe ser reconstruido totalmente.

El Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (CEPIS), clasifica a los filtros, según el porcentaje de bolas de barro. La siguiente tabla muestra ésta clasificación.

Tabla IX **Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de barro**

% DE VOLUMEN DE BOLAS DE LODO	CONDICIONES DEL MEDIO FILTRANTE
0 - 0.1	EXCELENTE
0.1 - 0.2	MUY BUENO
0.2 - 0.5	BUENO
0.5 - 1.0	REGULAR
1.0 - 2.5	DE REGULAR A MALO
2.5 - 5.0	MALO
7.5	MUY MALO

Fuente: Manual IV Evaluación Tratamiento de Filtración Rápida CEPIS. Julio, 1992 pág. 86

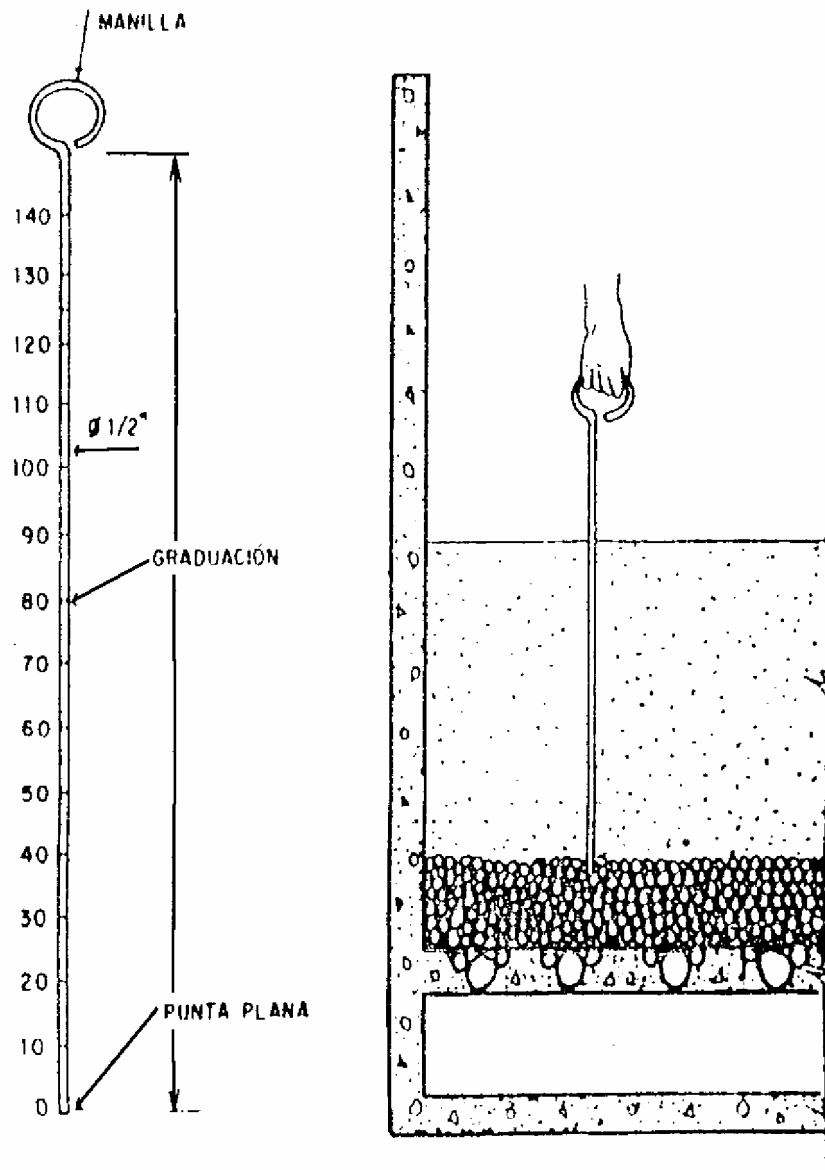
Según resultados obtenidos, nos indica de forma general, que el lecho filtrante de las cinco unidades carecen de bolas de barro. Respecto a la tabla No. 9 los filtros se clasifican en el rango de 0–0.10 de volumen de bolas de lodo lo cual corresponde a excelente en cuanto a condiciones del medio filtrante se refiere.

### 5.5 Perfil del lecho filtrante

La prueba tiene como objetivo determinar la magnitud de los movimientos en la capa de grava; en la cual se utiliza una varilla metálica graduada.



Figura 13 Varilla metálica graduada y perfil de grava



El procedimiento para obtener el perfil del lecho de grava se describe seguidamente:

- Obtener planos detallados del filtro.
- Dibujar un esquema en planta del filtro con la posición de las canaletas de lavado y canales de desagüe bien acotados.
- Marcar en el esquema una serie de puntos acotados a lo largo y ancho del filtro.
- Introducir la varilla en cada uno de estos puntos hasta tocar la grava.
- Dejar el nivel de agua 10 cm sobre el lecho para tomarlo de referencia y determinar la profundidad en la varilla.
- Llevar los datos a un plano y con ellos dibujar las curvas de nivel de 1 a 2 cm. De este modo puede estudiarse la posición exacta que tiene la grava dentro del filtro.

Los movimientos en el lecho de grava son causados por deficiencias: a) en el sistema de drenaje, b) cuando no se distribuye bien el agua de lavado, c) por aberturas muy rápidas de las válvulas de entrada del agua de lavado y d) por entrada de aire en los drenes del filtro. Es elemental la realización de esta prueba debido a que puede revelar posibles desperfectos en las unidades y un mal manejo de las válvulas por parte de los operarios.

Figura 14 Ubicación de puntos para determinar la altura de grava

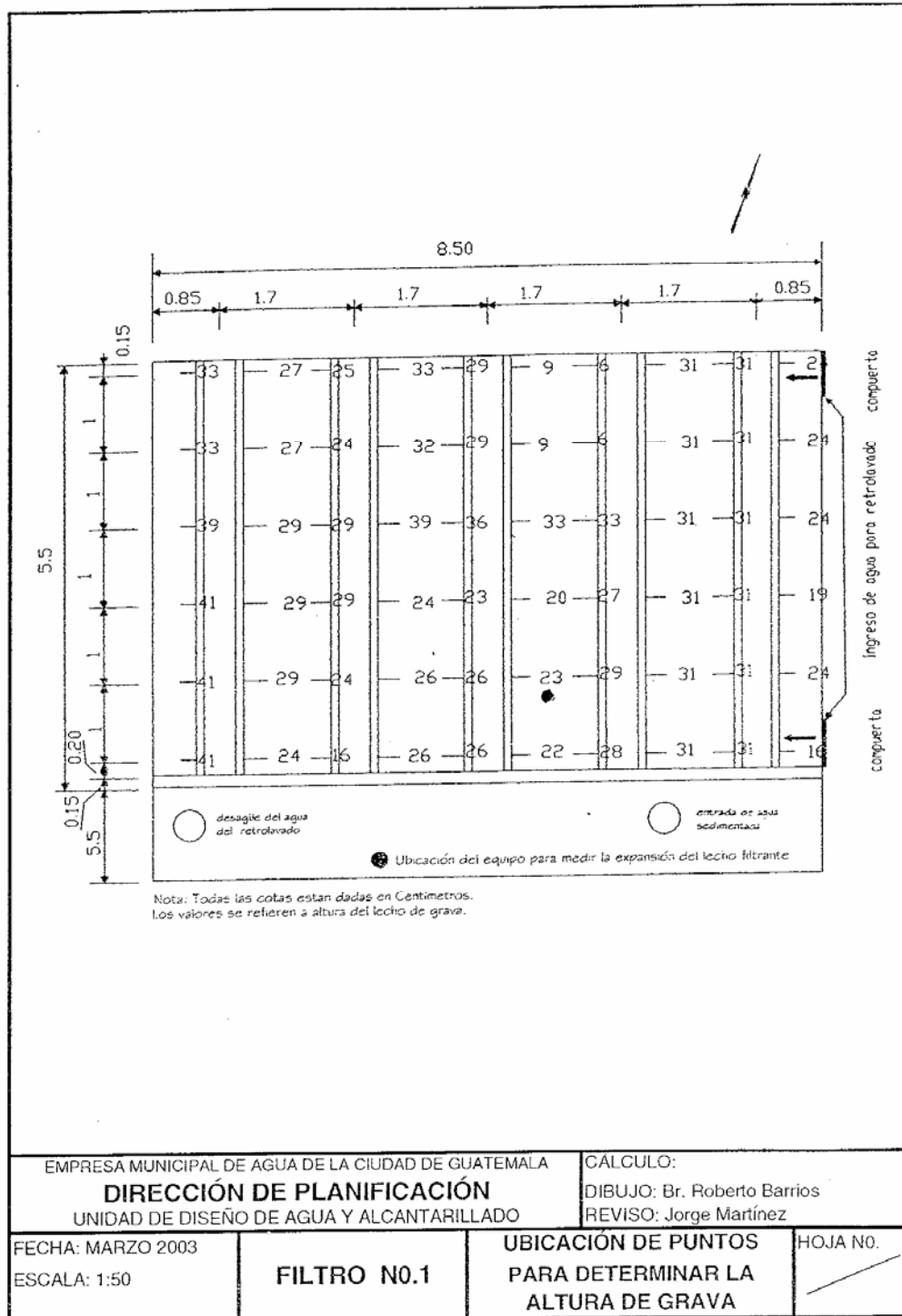


Figura 15 Ubicación de puntos para determinar la altura de grava

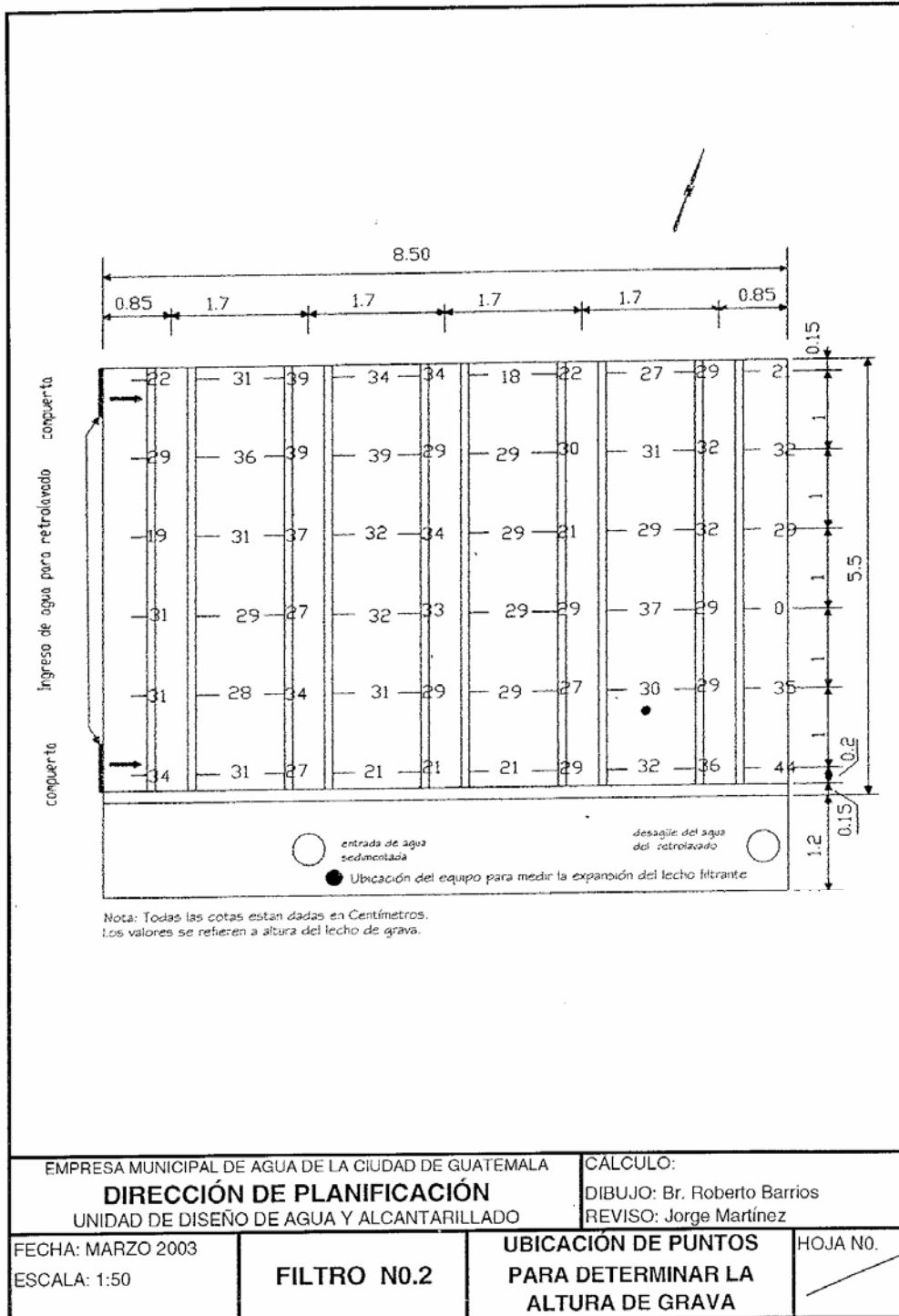


Figura 16 Ubicación de puntos para determinar la altura de grava

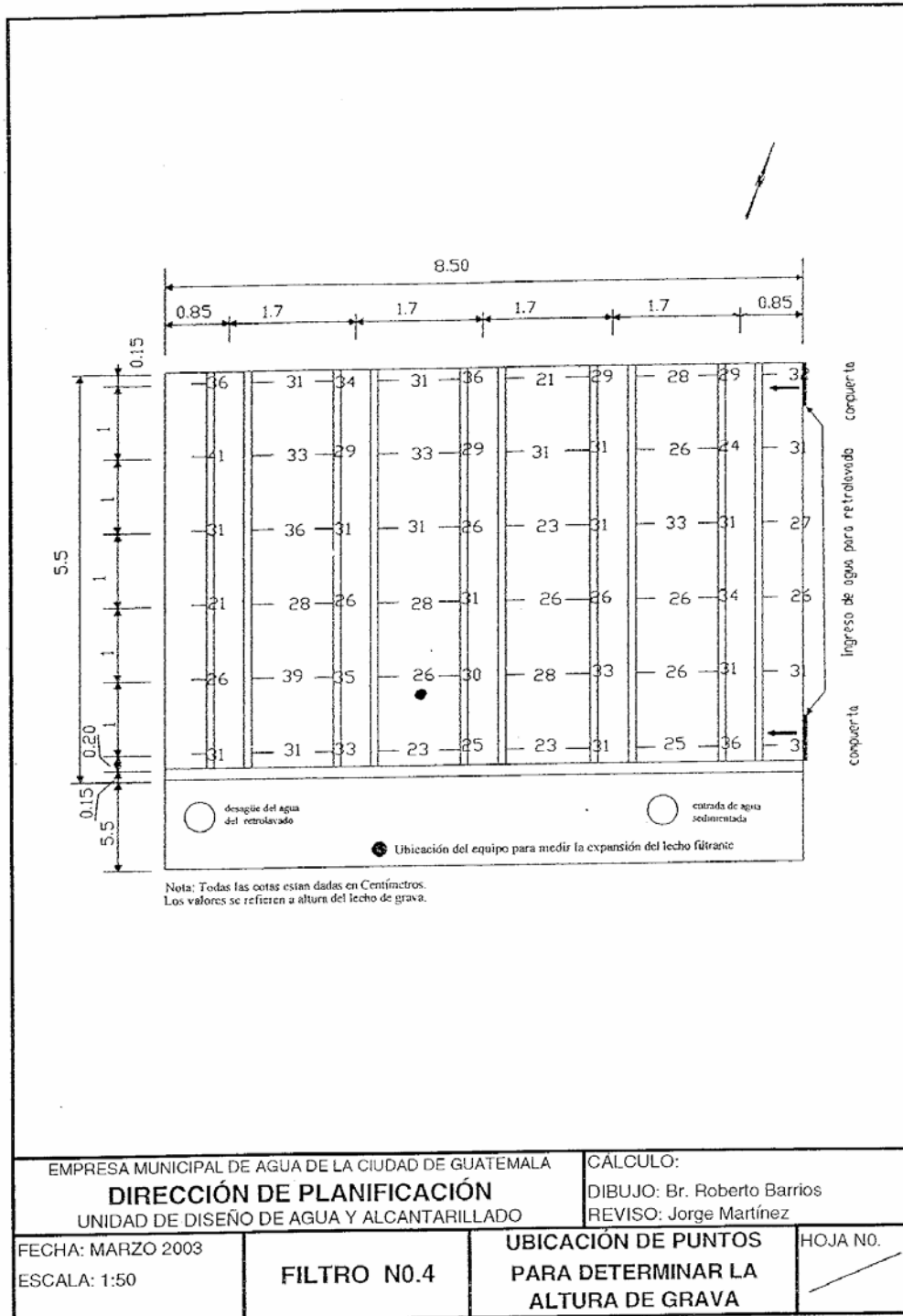


Figura 17 Ubicación de puntos para determinar la altura de grava

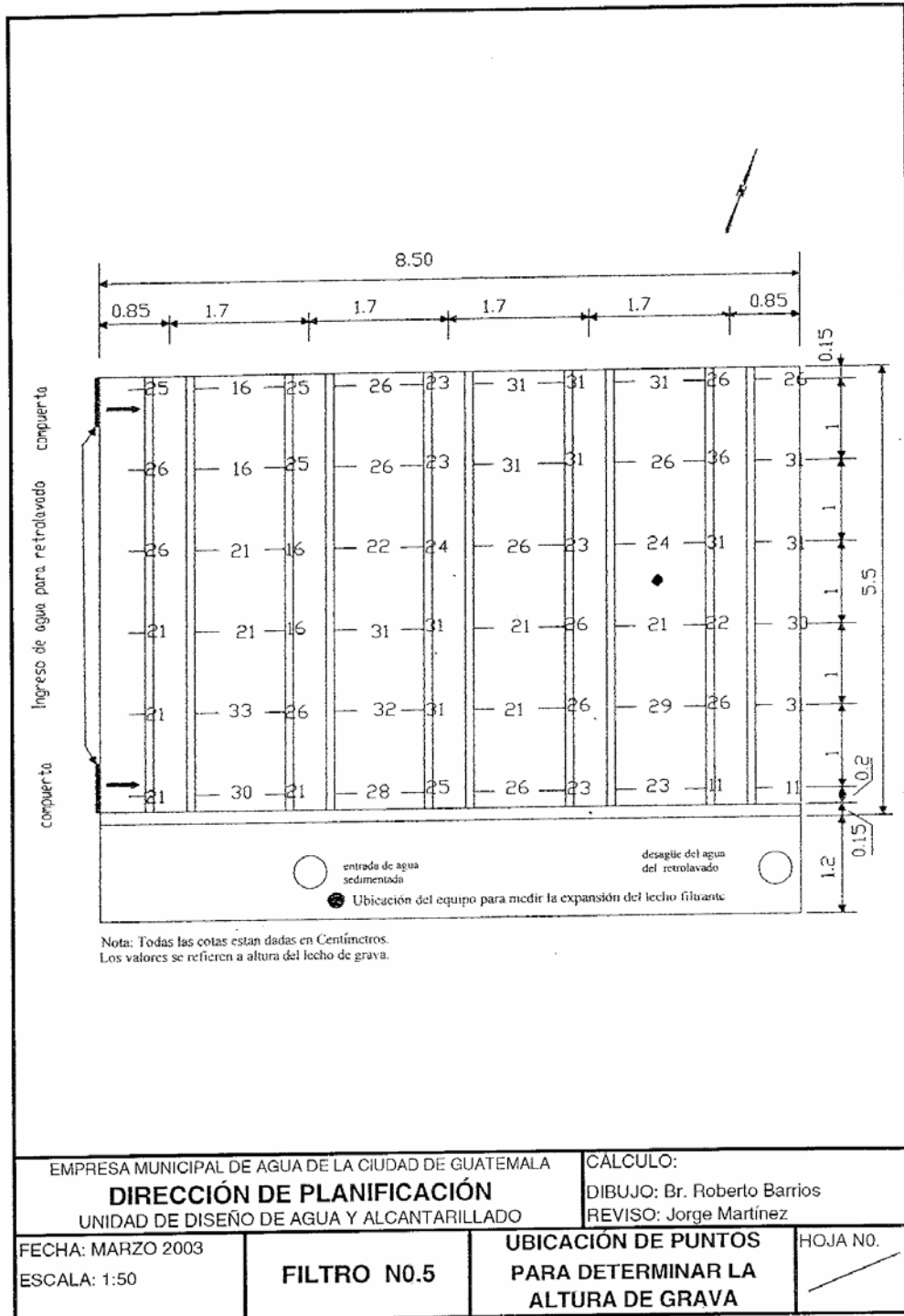


Figura 18 Ubicación de puntos para determinar la altura de grava

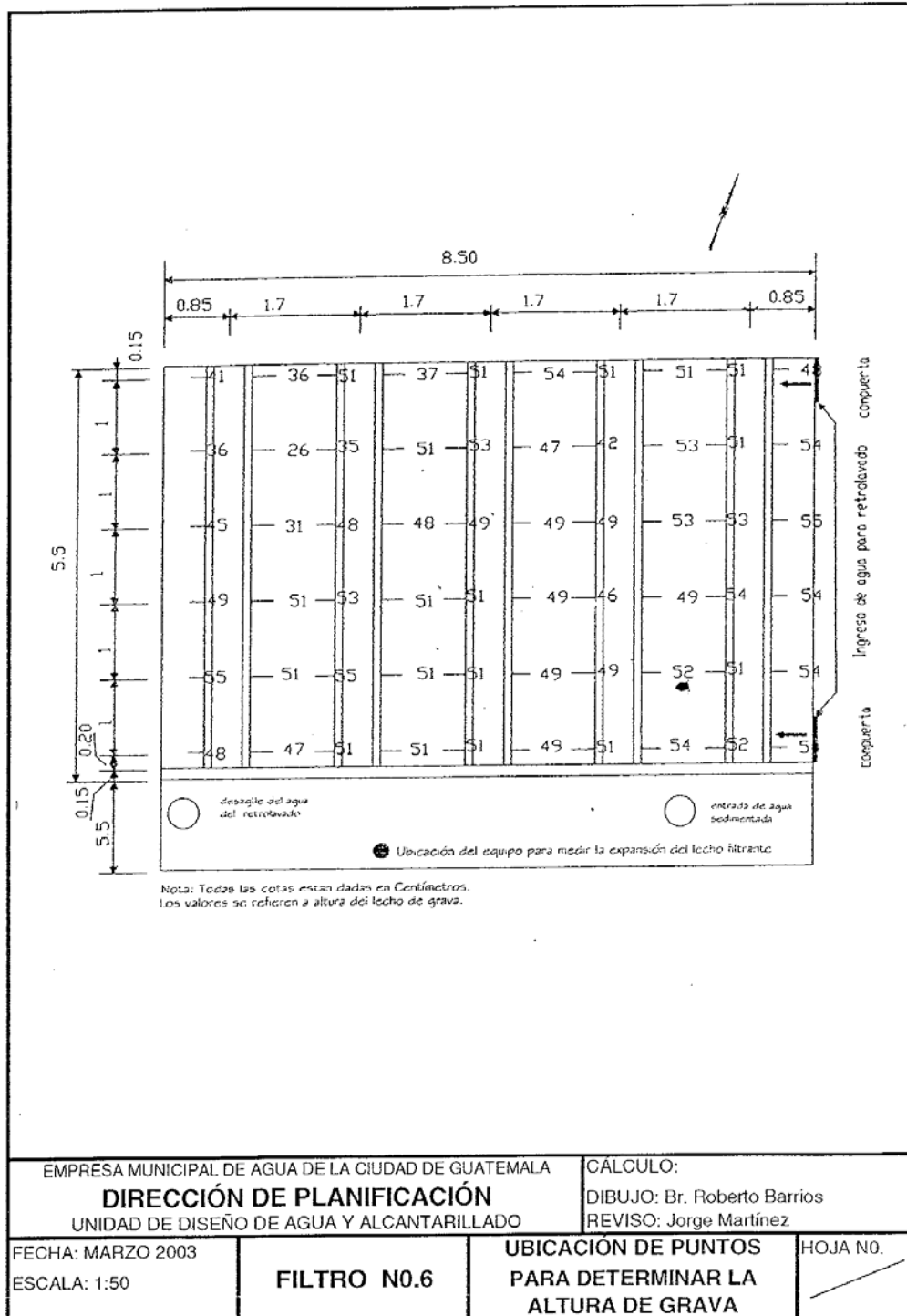


Figura 19 Topografía de un lecho de grava

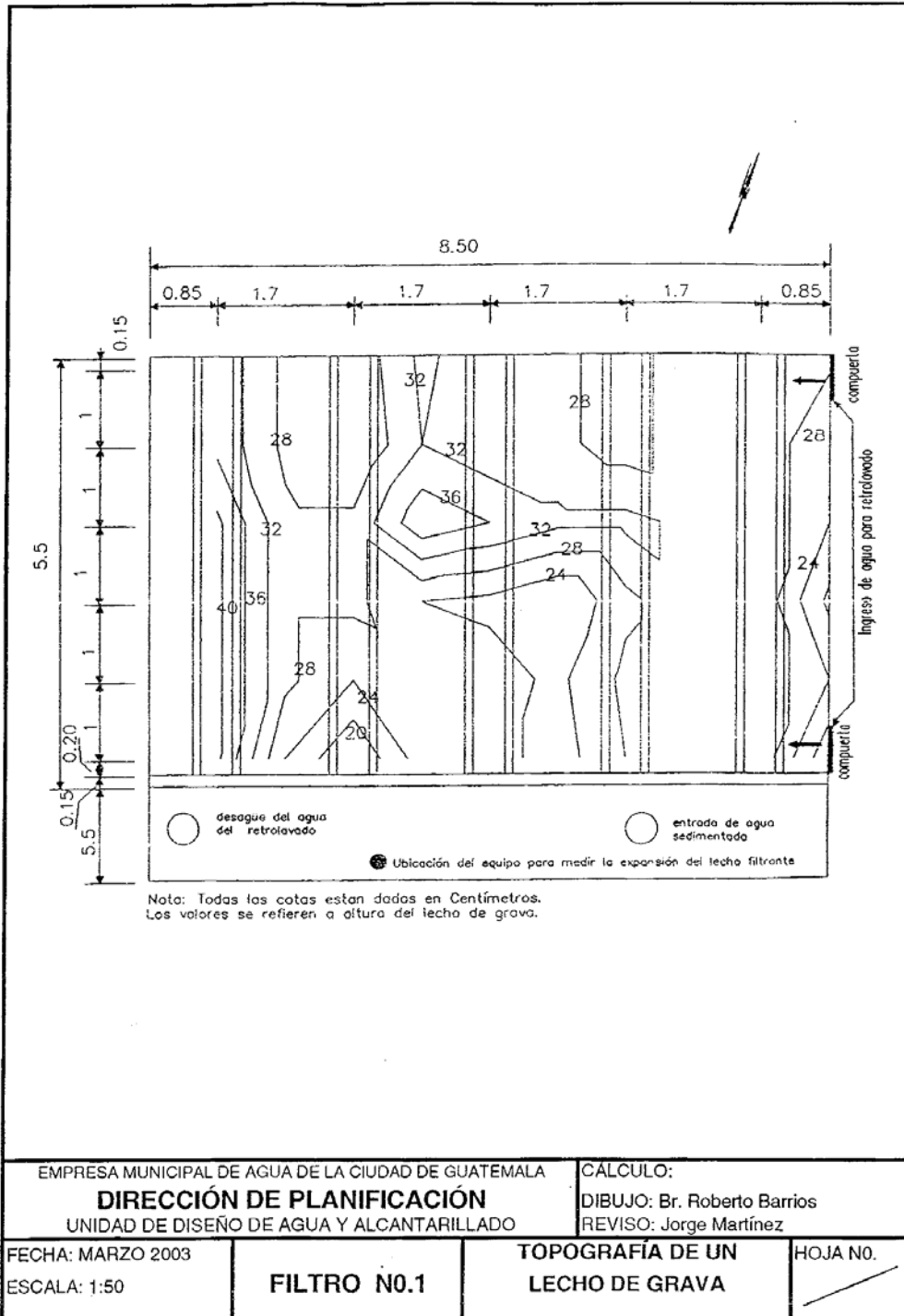
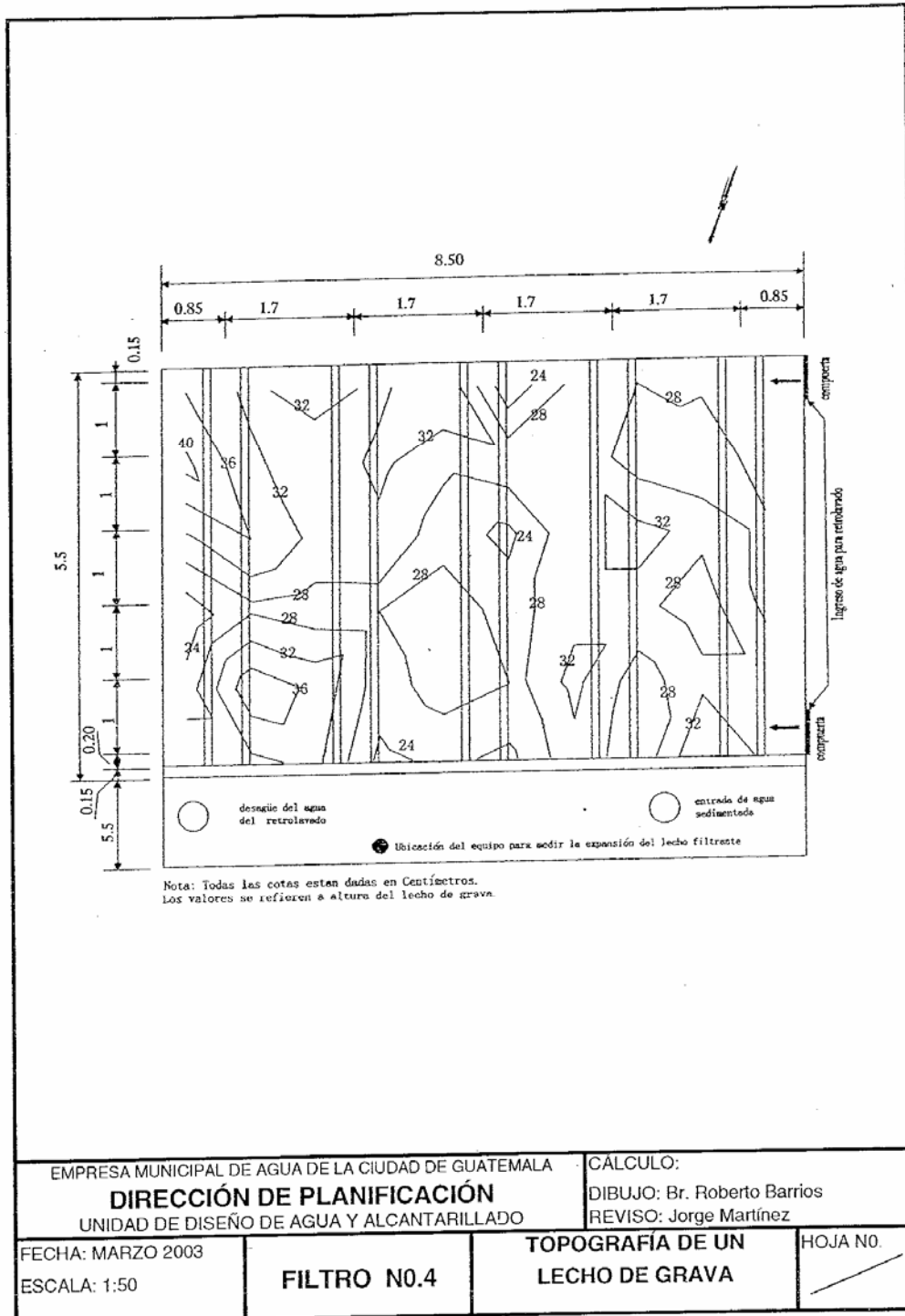






Figura 21 Topografía de un lecho de grava







Los desniveles en la superficie de la grava deben ser inferiores a 5 cm. Variaciones mayores indican la necesidad de un estudio para determinar las causas que los originaron para proceder a su corrección.

En esta prueba se midieron los espesores de arena, lo cual es igual a la profundidad en que se encuentra la grava con respecto a la superficie de la arena. Espesores mínimos de arena, indica mayor altura de grava. Espesores mayores de arena, indica menor altura de grava dentro del lecho.

La siguiente tabla, muestra los espesores máximos y mínimos de la arena encontrada en las cinco unidades de filtración.

**Tabla X Espesores máximos y mínimos en las unidades de filtración**

FILTRO NO.	ARENA(CM)		DIFERENCIA DE ALTURAS (CM)
	ALTURA MÁXIMA	ALTURA MÍNIMA	
1	38	4	34
2	43	0	43
4	32	18	14
5	30	0	30
8	52	14	38

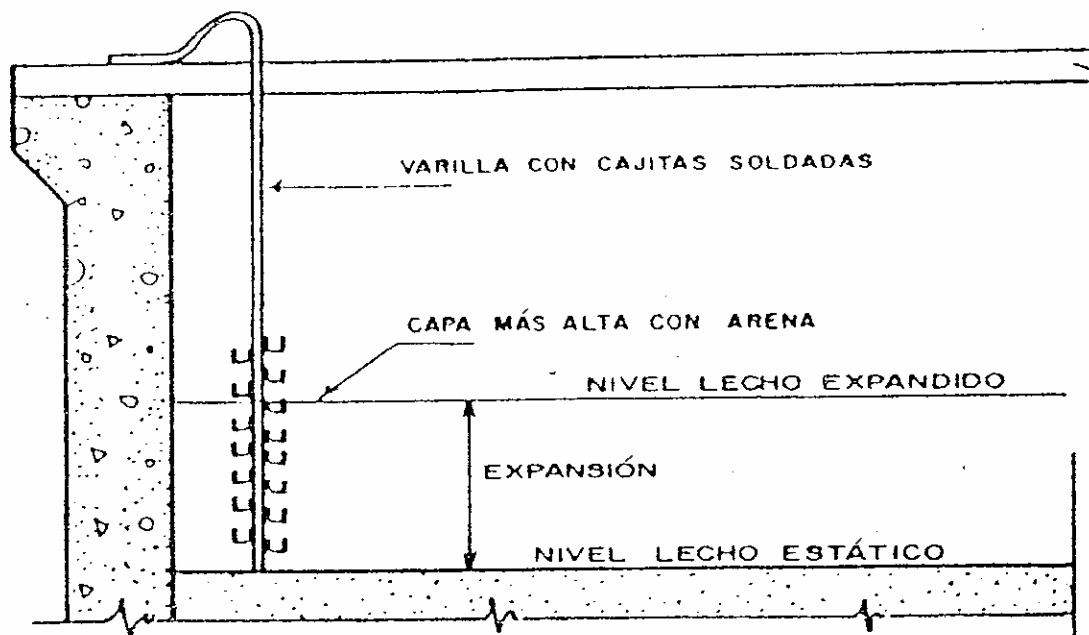
Ya sea por desperfectos en la boquilla que conducen el agua para el retrolavado o velocidades altas de lavado, ocasionan exageradas expansiones del lecho filtrante y por ende fuga de arena en las canaletas. Esto conlleva a una reducción de los espesores de arena y desplazamiento de la posición horizontal de la grava, tomando una forma ondulada.

## 5.6 Expansión del lecho filtrante

El objetivo de la prueba consiste en determinar el porcentaje de aumento de espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado.

El equipo a utilizar consiste en una varilla metálica con cajitas soldadas a distancia de 5 cm. entre los bordes de las cajitas.

Figura 24 **Equipo para medir la expansión de la arena durante el lavado**



**El procedimiento es el siguiente:**

- Fijar la varilla dentro del filtro colocando el extremo inferior encima del lecho filtrante.
- Proceder a efectuar el lavado normalmente.

- Medir la distancia entre las cajas más alta que contenga arena y el extremo inferior de la varilla (Ah).
- Determinar la altura del lecho filtrante (H).
- Determinar el porcentaje de expansión del lecho filtrante:

$$Ah / H \times 100$$

La expansión del lecho filtrante es otro parámetro básico que debe observarse cuidadosamente durante el lavado. La medida de la expansión del lecho filtrante está relacionada con la velocidad de lavado y el diámetro del medio granular. En filtros de diseño americano, con arena de 0.45 – 0.55 mm de diámetro efectivo, la expansión es del orden del 20 al 50 por ciento.

La siguiente tabla contiene el porcentaje de expansión en cada unidad.

Tabla XI **Expansión del lecho filtrante**

FECHA	FILTRO NO.	ALTURA DE ARENA		PORCENTAJE DE EXPANSIÓN (%)
		EN EL EQUIPO (CM)	EN EL FILTRO (CM)	
02/02/2004	1	77	25	308
04/02/2004	2	81	29	210
05/02/2004	4	85	28	250
08/02/2004	5	48	22	218
10/02/2004	8	53	45	118

El lecho filtrante tenderá a expandirse, según la velocidad con la cual se inyecte el agua de lavado, y el diámetro del medio granular.

En filtros de diseño americano, con arena fina de 0.45–0.55 mm de diámetro efectivo, la expansión es del orden del 20 al 50 por ciento, recomendado por Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Los parámetros de diseño no hacen comentario al respecto, por tanto los resultados se compararán con lo sugerido por CEPIS.

La expansión obtenida en las cinco unidades están por encima de lo recomendado por CEPIS (20–50 por ciento), resultando un promedio de expansión de 221 por ciento.

La máxima y la mínima expansión se obtuvo en los filtros No.1 y No.6 respectivamente. El filtro No.6 cuenta con mayor espesor del lecho filtrante, en promedio, a diferencia del filtro No.5

Debido al elevado porcentajes de expansión del lecho filtrante en las unidades, hay mucha pérdida de material en el momento del retrolavado, el cual se puede observar en el tanque de recuperación, que contiene considerable cantidad de arena.

La velocidad de filtración está en relación directa con la expansión del lecho filtrante. La expansión exagerada, no beneficia al lavado, pues impide el roce o frotamiento de unos granos con otros, evitando el desprendimiento de la película adherida a ellos durante el proceso de filtración.



Tabla XII Calidad de agua filtrada, turbiedad y Ph

FECHA	ÉPOCA	CANAL DE MEZCLA		SALIDA SEDIMENTADOR GRANDE		PEQUENO		TURBIEDAD SALIDA DE FILTROS						TANQUE DE AGUAS CLARAS	
		TURBIEDAD	Ph	TURBIEDAD	Ph	TURBIEDAD	Ph	N0.1	N0.2	N0.4	N0.5	N0.6	TURBIEDAD	Ph	
15/07/2003	I N V I E R N O	990	6.54	31	5.42	33	5.01	1.2	1.5	1.3	1	0.9	1	5.32	
18/07/2003		630	6.25	28	5.26	3	5.62	1.1	1.6	1.2	1	1	0.8	5.32	
19/07/2003		1350	6.45	23	5.21	28	5.03	1.1	1.2	1.1	0.9	1	0.9	5.16	
20/07/2003		560	6.42	21	5.22	23	5.19	1	1.1	1.2	1	0.8	1	5.21	
21/07/2003		1560	6.46	30	5.36	26	5.85	1.2	1.2	1.1	0.8	0.9	1	5.46	
05/08/2003		890	6.85	25	5.26	28	5.68	1.3	1.2	1.2	1.1	1	0.9	5.48	
06/08/2003		1800	6.23	26	5.84	28	5.42	1.2	1.3	1.3	1	0.9	1	7.71	
07/08/2003		780	6.45	19	5.36	21	5.46	1.1	1.4	1.2	1	1	0.8	5.42	
10/09/2003		500	6.53	22	5.49	22	5.49	1	1.2	1	0.9	0.8	0.9	5.48	
11/09/2003		640	6.87	17	5.46	28	5.89	1.3	1.4	1.2	1.1	1	1	5.51	
05/01/2004		V E R A N O	55	6.54	7	5.87	9	5.92	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	5.65
06/01/2004	40		6.21	5	5.74	10	5.46	0.9	1	0.9	1	0.8	0.7	5.5	
07/01/2004	69		6.46	6	5.45	8	5.23	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	5.3	
08/01/2004	62		6.32	8	5.85	9	5.55	0.7	0.8	0.8	0.9	0.6	0.8	5.66	
09/01/2004	71		6.45	5	5.33	11	5.65	0.7	0.9	0.7	0.9	0.7	1	5.45	
12/01/2004	80		6.25	5	5.26	10	5.69	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	5.44	
13/01/2004	56		6.23	6	5.13	9	5.46	0.9	0.7	0.8	0.6	0.7	0.9	5.29	
14/01/2004	51		6.43	9	5.29	10	5.65	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	5.42	

## **5.7 Granulometría y espesor del lecho filtrante**

Las siguientes tablas contienen los resultados del análisis granulométrico de la arena de los cinco filtros en operación, realizado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla XIII Granulometría de filtros

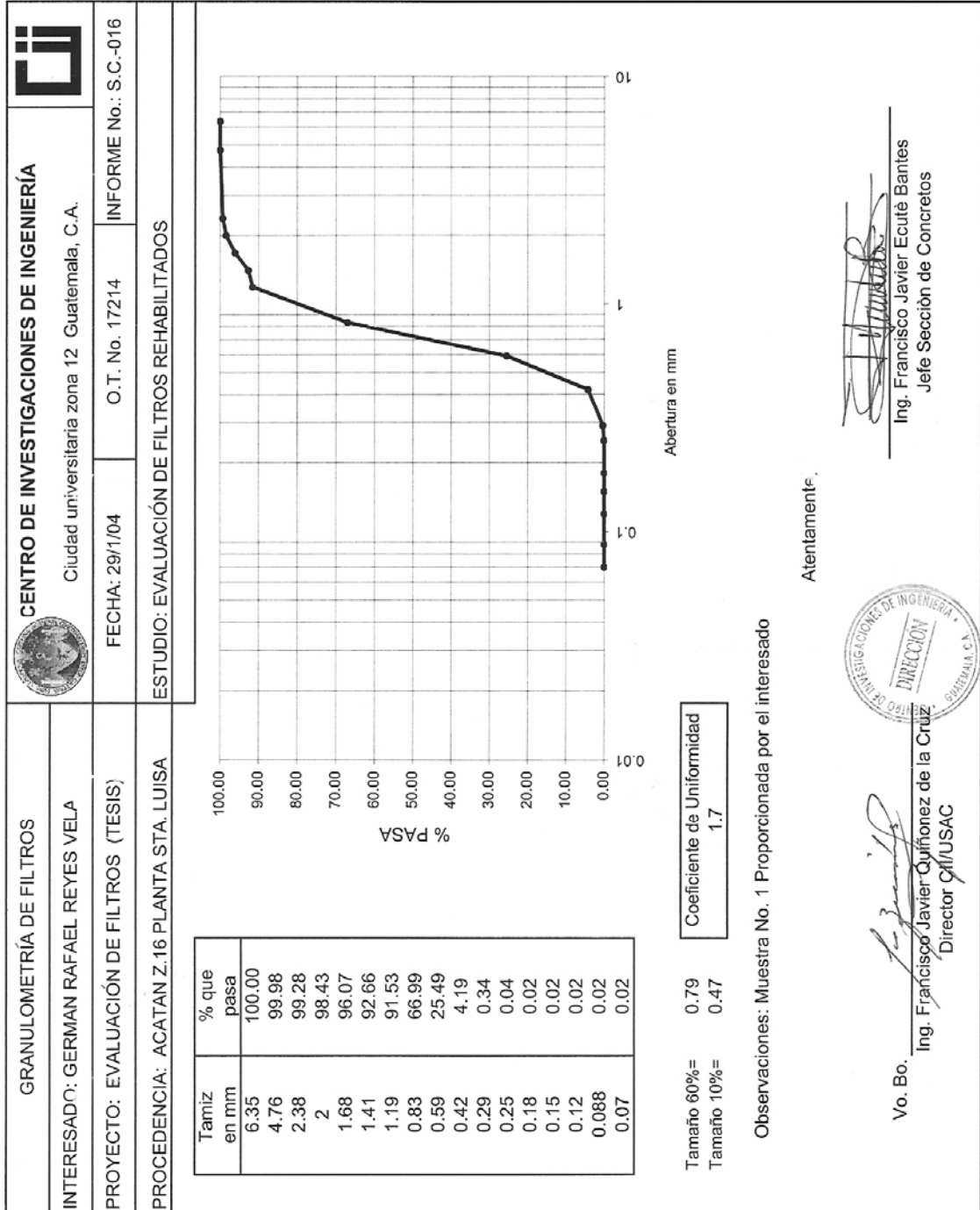


Tabla XIV Granulometría de filtros

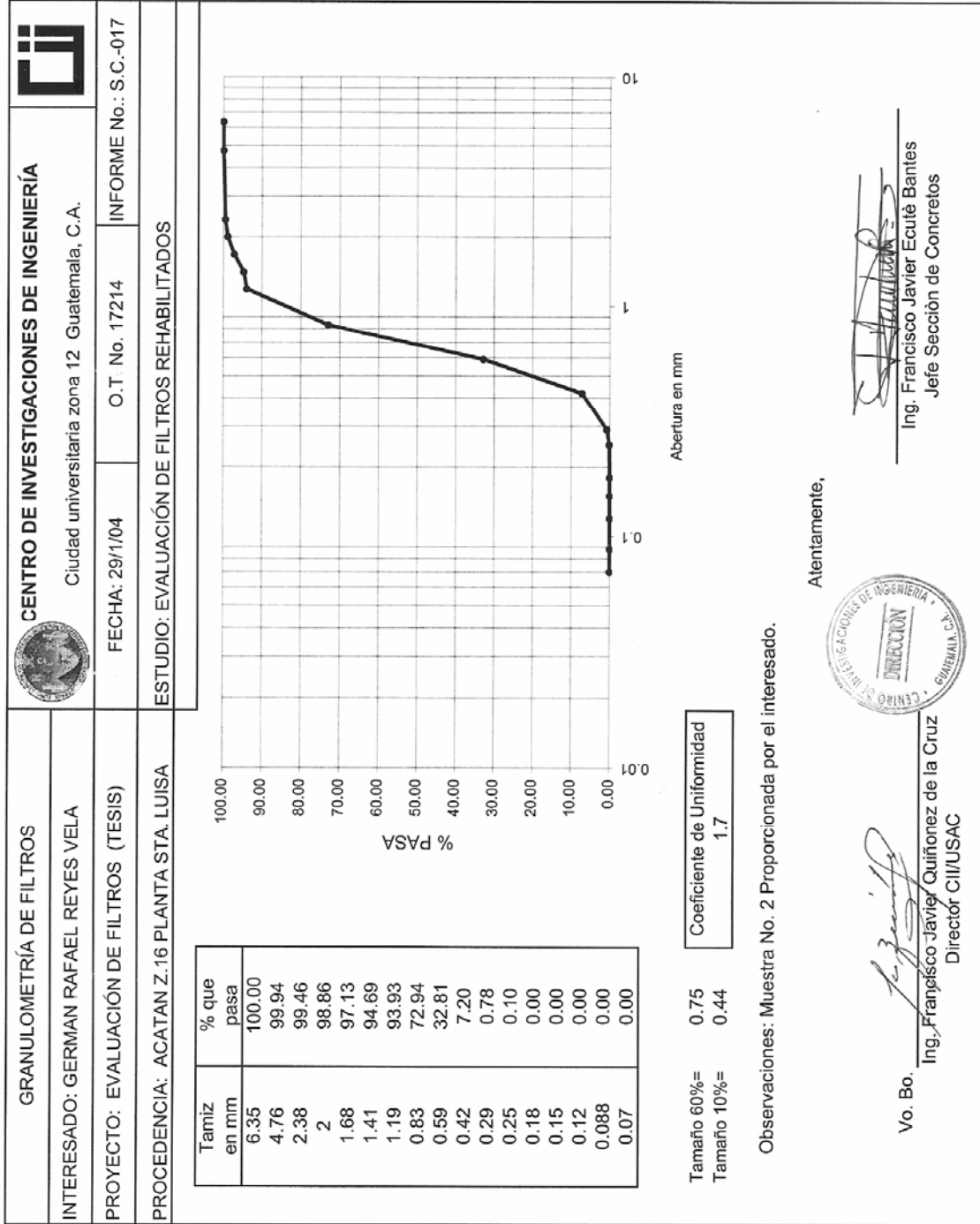


Tabla XV Granulometría de filtros

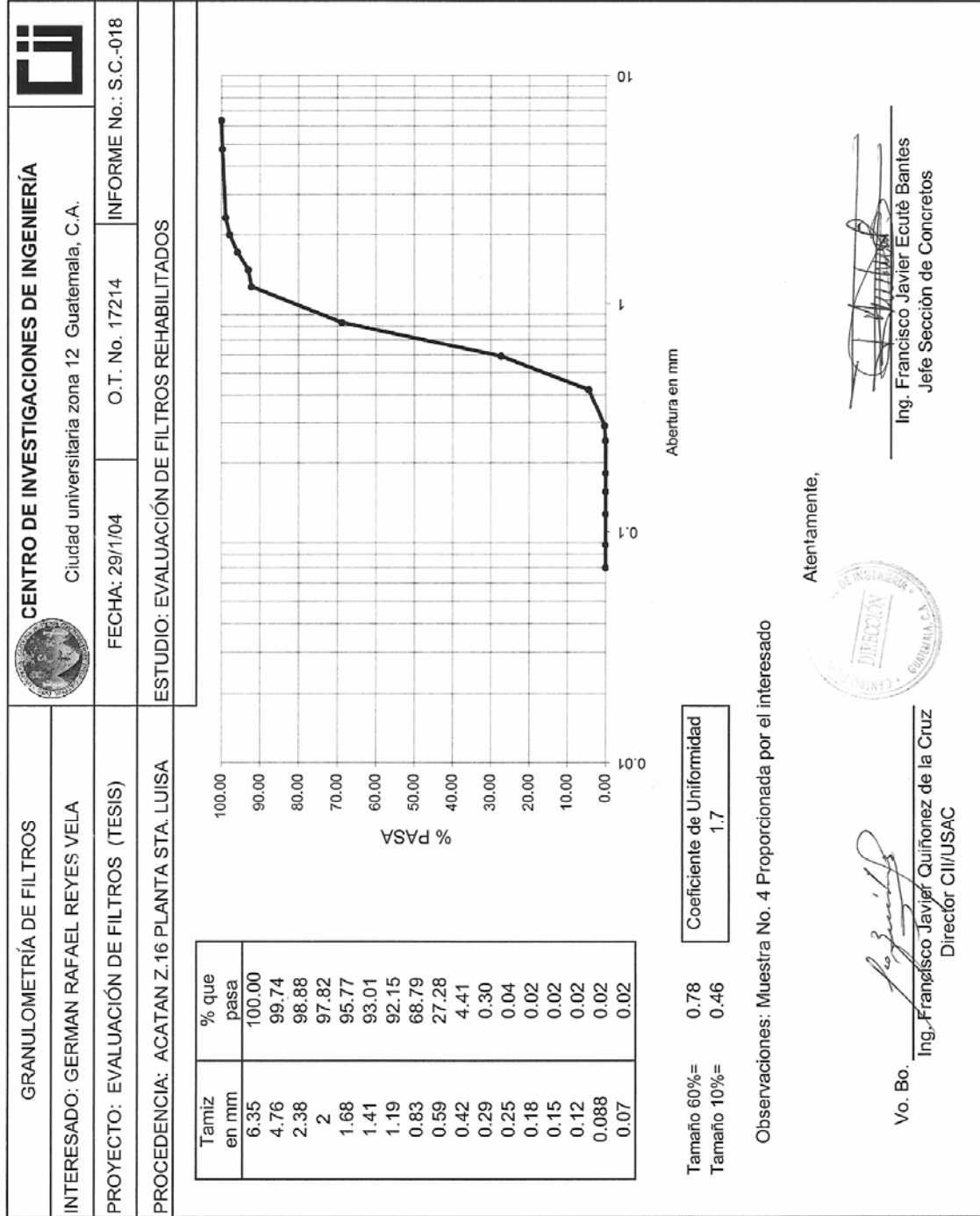


Tabla XVI Granulometría de filtros

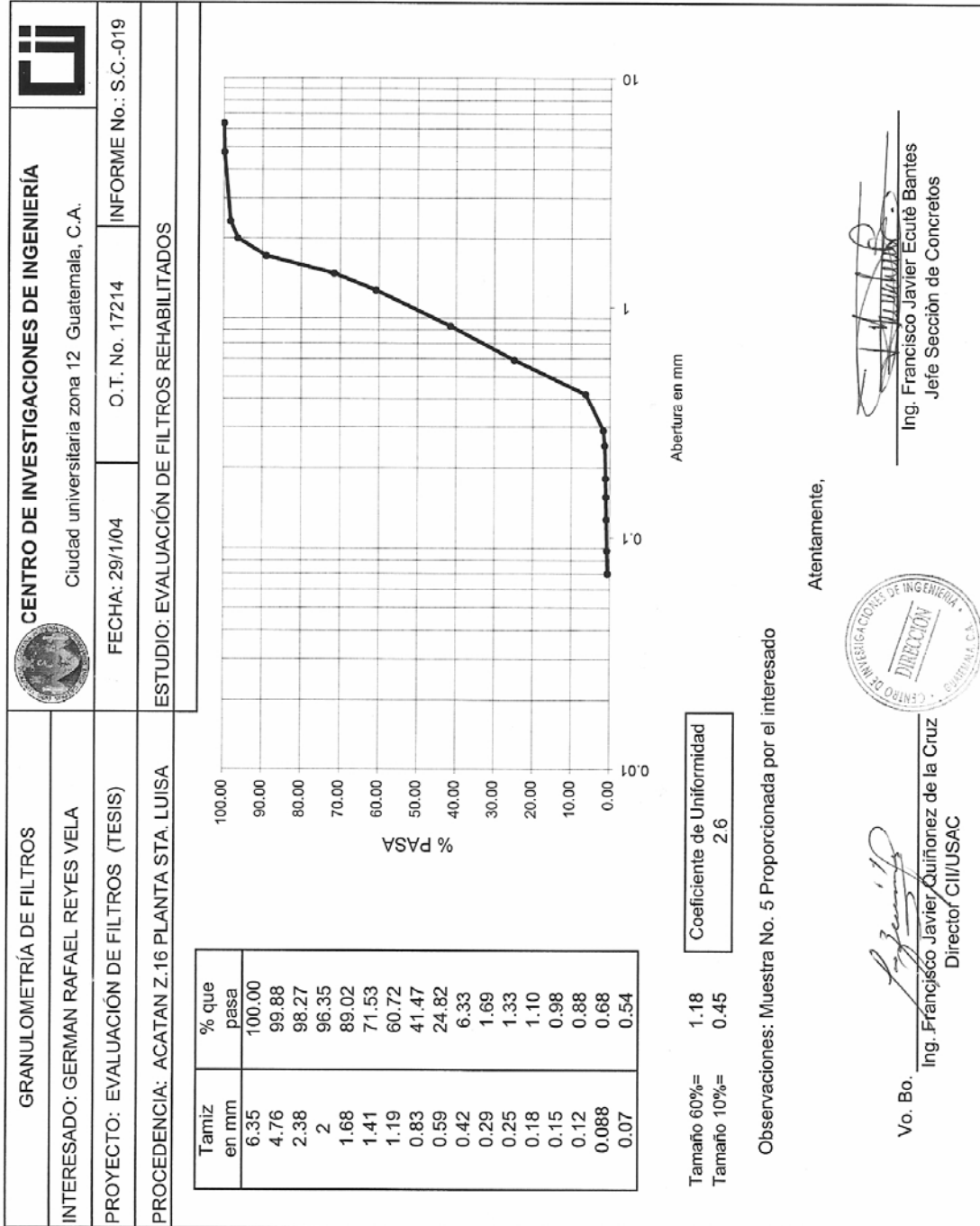
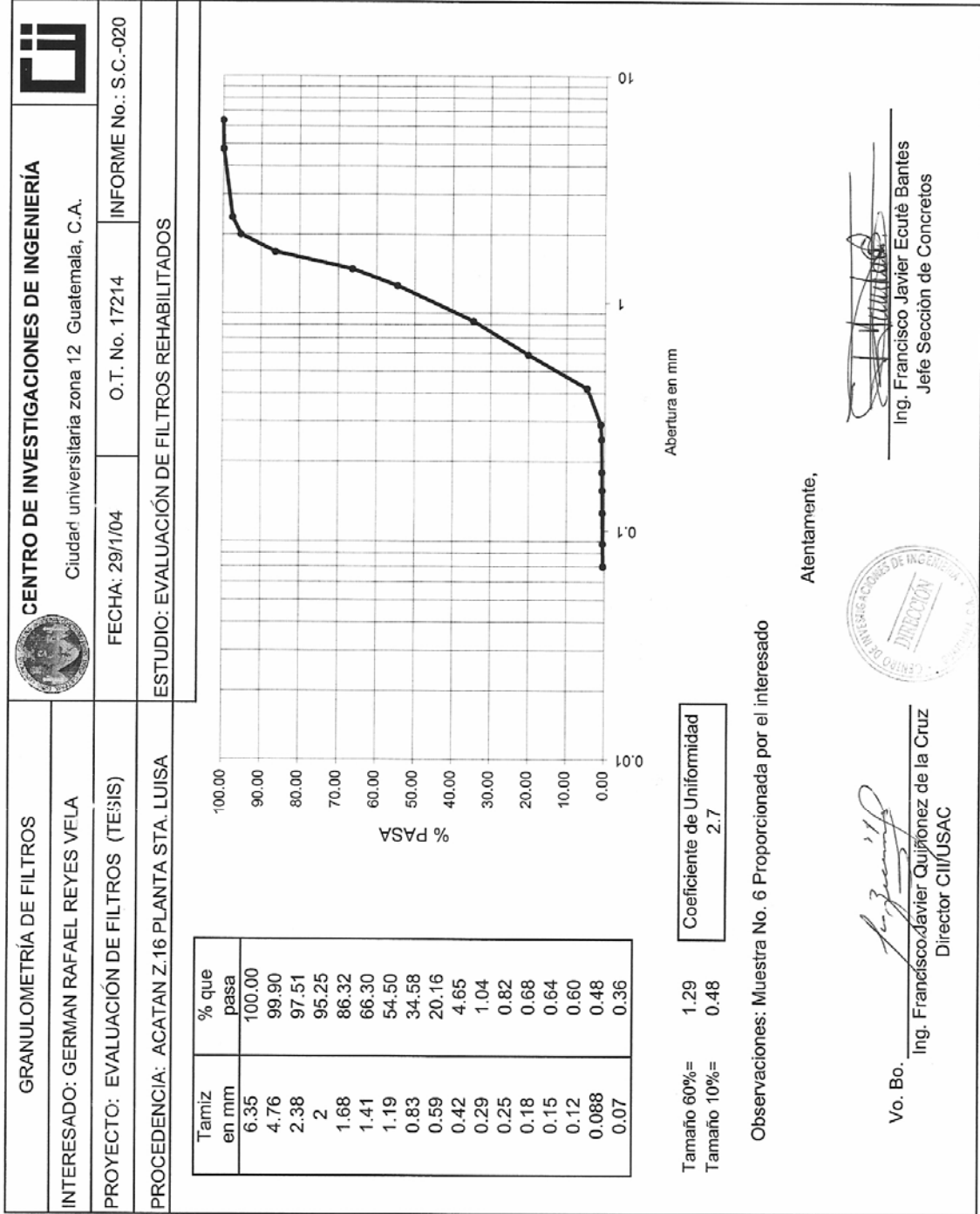


Tabla XVII Granulometría de filtros



Los resultados de la prueba se compararon con los parámetros de diseño, que establece lo siguiente:

- Tamaño efectivo: 0.55 – 0.65 mm.
- Espesor de arena: 0.60 mm
- Coeficiente de uniformidad: < 1.7

El tamaño o diámetro efectivo del lecho filtrante, de los cinco filtros resultaron ser menores al rango propuesto en el parámetro de diseño (0.55 – 0.65 mm). Es decir, la arena es muy fina. Al tener una arena de menor tamaño, el lecho tiende a expandirse mayormente, provocando fuga de material en las canaletas de lavado. También provoca que el lecho se cólmate rápidamente debido al menor porcentaje de vacíos entre los granos de arena, impidiendo que el agua al ser filtrada, descienda y aumente la pérdida de carga en las unidades.

En lo que respecta al coeficiente de uniformidad, solamente en los filtros No.5 y No.6 se obtuvo un coeficiente de uniformidad mayor al del diseño. En la tabla No.9 de clasificación de los filtros, según el porcentaje de bolas de barro, se observan los valores de los promedios ponderados de los espesores de arena en cada filtro, resultando ser inferiores a lo recomendado en diseño (0.6 m).

La porosidad es otra característica del medio filtrante que influye en la eficiencia de los filtros. En los parámetros de diseño no se hace mención a éste parámetro, sin embargo, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), contempla una porosidad en arena entre 0.4 – 0.45.



La porosidad de la arena de los filtros de la planta Santa Luisa resultó ser de 0.39, según clasificación (por el desgaste de la arena) del libro: Ingeniería Sanitaria y de Aguas residuales Pág. No. 230, el cual se encuentra por debajo de lo recomendado por CEPIS.

Baja porosidad implica menos espacio de vacío entre los granos de arena, lo cual hace que la pérdida de carga aumente rápidamente en las unidades de filtración.

## CONCLUSIONES

1. La operación promedio de las unidades de filtración poseen una velocidad de 145.80 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, menor a lo establecido en el diseño.
2. Las pruebas resultantes indican que la velocidad de lavado de las unidades es igual a 0.742 m/min, exceptuando la unidad No.3; lo cual conlleva a elevados porcentajes de expansión del lecho filtrante, encontrándose fuera del rango establecido por CEPIS (20–50 por ciento).
3. El tiempo óptimo de lavado para las unidades de filtración es de seis minutos, igual al tiempo contemplado en el diseño y utilizado en el lavado de las unidades.
4. El lecho filtrante de las unidades carecen de bolas de barro. Según CEPIS, los cinco filtros están clasificados como excelentes, en lo referente a condiciones del medio filtrante.
5. El resultado granulométrico indica que el diámetro efectivo de la arena de los cinco filtros es muy fina, en comparación a lo recomendado en el diseño.
6. Las unidades de filtración presentan espesores de arena variables y son inferiores a 60 centímetros.

## RECOMENDACIONES

1. Efectuar una revisión en el mecanismo final por donde es conducida el agua del retrolavado, ya que se produce una elevada expansión del lecho filtrante que repercute en la calidad de agua.
2. Tener un mayor cuidado de la velocidad en el momento de efectuar el lavado ya que al no hacerlo se pierde el rango establecido en los parámetros de diseño de velocidad, por lo cual se tendría que hacer uso de una regla graduada con cambios de nivel con un tiempo estimado, para mantener la velocidad estimada de 0.6 m/min.
3. Tener un mayor control en el espesor de cada lecho filtrante en el momento de efectuar el lavado de cada filtro.
4. Contemplar la posibilidad de efectuar el cambio de arena de menor densidad por otra de mayor densidad con el mismo diámetro, para no alterar los parámetros de diseño establecidos en el Manual de Operación y Mantenimiento *Hitachi Plant Engineering & Construction Co., Ltd. Y Kiowa Engineering Consultants Co., Ltd.*

## BIBLIOGRAFÍA

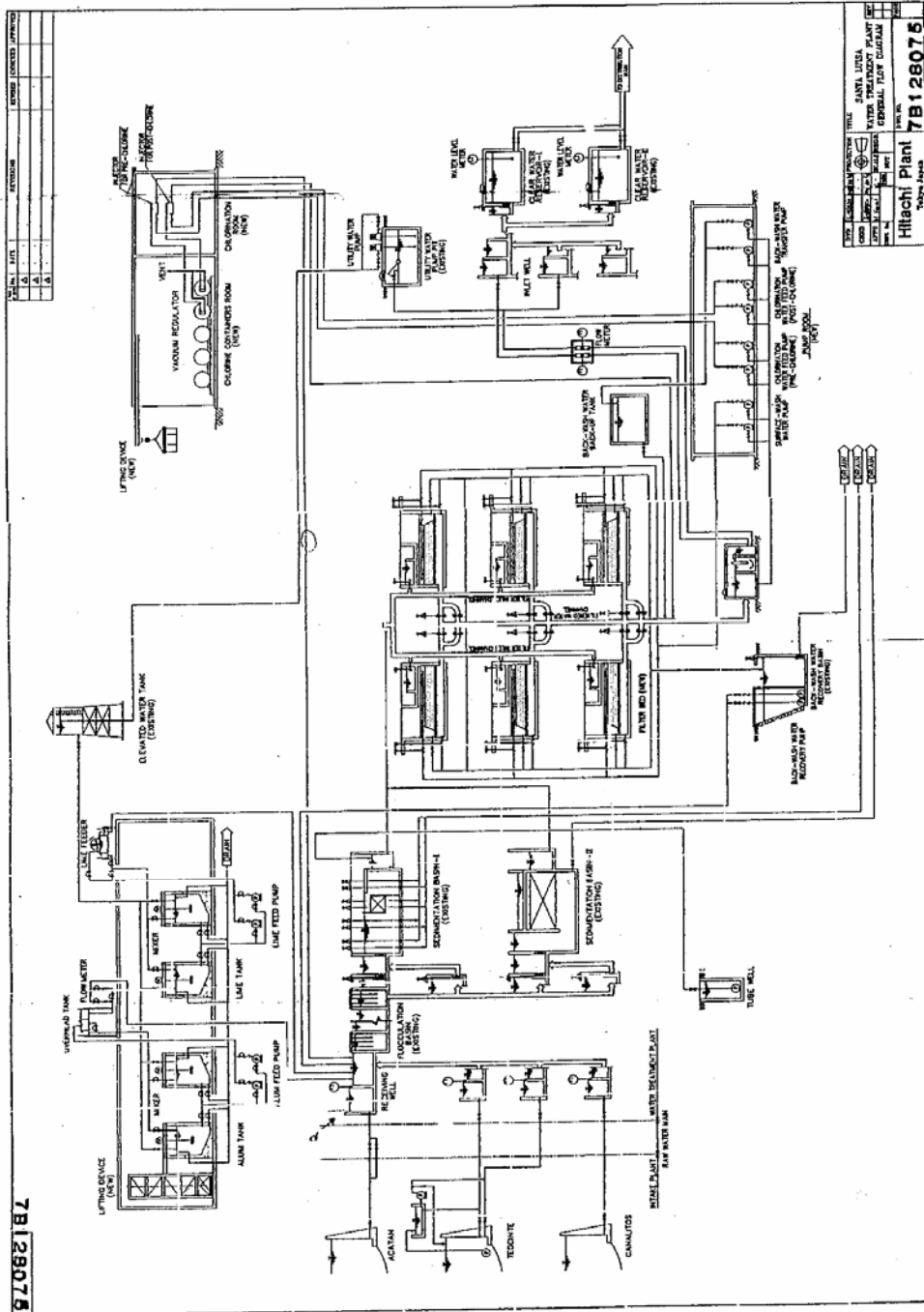
1. Alfredo Jehovany Rivera Juárez. Evaluación del Proceso de Filtración de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Lo de Coy. Tesis de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1996.
2. Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. Informe del estudio del diseño básico del proyecto de Rehabilitación de las plantas de Tratamiento de agua potable en la ciudad de Guatemala. Guatemala: s.e. 1993.
3. Walter Rafael Herrera Morales. Evaluación de la Rehabilitación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Santa Luisa. Tesis Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2001.

## **ANEXOS**

- Plano de ubicación de la planta Santa Luisa
- Plano de ubicación paneles de control
- Plano hidráulico

**Figura 25 Plano de ubicación de instalaciones y zonas de captación**





Fuente: Estudio del diseño de la rehabilitación plantas de tratamiento  
 Kiowa Engineering Consultants Co. Ltd. 1993

Figura 27 Plano hidráulico

