

**MANUAL PARA LA EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE FILTRADO RÁPIDO EN LA ZONA RURAL COLOMBIANA**

**DIEGO ANDRÉS CABALLERO CABRAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2011**

**MANUAL PARA LA EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE FILTRADO RÁPIDO EN LA ZONA RURAL COLOMBIANA**

**DIEGO ANDRÉS CABALLERO CABRAL**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director de Proyecto**

**ING. Esp. WILLIAM IBÁÑEZ PINEDO**

**Gerente de Operaciones AMB.**

**Docente UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

Mi trabajo de grado lo dedico:

A mis padres: **María Emilia** y **Luis Enrique** a quienes les debo la vida y sabiduría, por guiarme por las sendas de la educación y el respeto, fue un camino difícil pero al final gratificante.

Mis hermanos **Leidy Melisa** y **Kevin Andrés** por su compañía y gratos momentos compartidos.

A **Jess** por sus sabios y oportunos consejos, por no permitir que mi ánimo desfalleciera, porque en cada momento difícil puso una sonrisa y una solución en mi camino.

A **tod@s** los **amig@s** que aportaron un momento de sus vidas para facilitar el camino y hacer amena la jornada.

A la **Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil**, y mis **maestros** quienes fueron esenciales en mi proceso de formación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A **ING. Esp. WILLIAM IBÁÑEZ PINEDO** por su compañía, orientación su esfuerzo y dedicación brindada en cada una de las etapas del trabajo de grado, pues sus conocimientos y experiencia fueron decisivos en la culminación y éxito del presente texto.

A los **PROFESORES** encargados de la línea de aguas por los conocimientos compartidos y los buenos consejos recibidos, su aporte a mi formación y orientación fueron decisivos para desarrollar mi trabajo de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES DE LAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO	19
1.1 EL AGUA	19
1.2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA O POTABILIZADORAS	19
1.2.1 Planta de filtración rápida completa	21
2. EVALUACION INICIAL: PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRADO RAPIDO (TECNOLOGIA CEPIS/OPS)	24
2.1 INTRODUCCION	24
2.2 LA FICHA COMPRENDE:	25
2.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA FICHA DE INSPECCION INICIAL EN LA PLANTA DE PUENTE NACIONAL	33
3. EVALUACIÓN ESPECÍFICA: PLANTAS DE FILTRADO RAPIDO (TECNOLOGIA CEPIS/OPS)	38
3.1 INTRODUCCIÓN	38
3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN	39
3.3 EVALUACIÓN DE LA SELECCIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS	41
3.4 EVALUACIÓN DEL MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS	42
3.5 EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE	44
3.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA EVALUACION DEL MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUIMICAS EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA	47
4. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA	50

4.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD Y PUNTO DE APLICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS	51
4.2 EVALUACIÓN DEL TIEMPO REAL DE RETENCIÓN	53
4.3 ENSAYO DE TRAZADORES	53
4.4 EVALUACIÓN DE LA INTENSIDAD DE MEZCLA	54
4.5 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS EN LAS INTERCONEXIONES	56
5. EVALUACIÓN DE FLOCULADORES	57
5.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD	58
5.2 EVALUACIÓN DE UNIDADES HIDRÁULICAS - UNIDAD DE PANTALLAS DE FLUJO HORIZONTAL	58
5.3 EVALUACIÓN DE UNIDADES DE PANTALLAS DE FLUJO VERTICAL	59
5.4 EVALUACIÓN DEL CAUDAL DE OPERACIÓN	60
5.5 EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN HIDRÁULICA	61
5.6 EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN MECÁNICA	62
5.7 EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE FORMACIÓN INICIAL DEL FLÓCULO	62
5.8 EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DEL FLÓCULO PRODUCIDO	63
5.9 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA MEZCLA RAPIDA Y FLOCULACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA	64
6. EVALUACIÓN DE DECANTADORES	78
6.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN	80
6.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEDIMENTADA	81
6.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA	82
6.4 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD	83
6.5 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS	85
6.6 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE DECANTACIÓN	86

6.7 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE SALIDA	87
6.8 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA SEDIMENTACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA	89
7. EVALUACIÓN DE LAS BATERÍAS DE FILTROS DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO	94
7.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD	98
7.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO	102
7.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL FILTRADO INICIAL	105
7.4 EVALUACIÓN DE LA DURACIÓN DE LAS CARRERAS DE FILTRACIÓN	106
7.5 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LAVADO	106
7.6 EVALUACIÓN DE LA EXPANSIÓN DEL MEDIO FILTRANTE	106
7.7 EVALUACIÓN DE LA DURACIÓN DEL PROCESO DE LAVADO	108
7.8 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FILTRANTE	109
7.9 GRANULOMETRÍA DEL MEDIO FILTRANTE	110
7.10 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE FILTRACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA	111
8. EVALUACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE CLORACIÓN	117
8.1 EVALUACIÓN DEL TIEMPO REAL DE CONTACTO	119
8.2 EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE CLORO:	120
8.3 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE APLICACIÓN	121
8.4 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES DE CLORACIÓN	123
9. RELACIÓN DE LOS ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	129
10. CONCLUSIONES	131

BIBLIOGRAFÍA	133
ANEXOS	135

## LISTADO DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Muestra el diagrama de flujo para una planta de tratamiento de agua potable. (Fuente CEPIS/OPS) .....	21
Figura 2: Estrategia de múltiples barreras para la protección contra microbios. (Fuente CEPIS/OPS) .....	21
Figura 3: Bocatoma de fondo.....	34
Figura 4: Rebose desarenador .....	35
Figura 5: Panorámica sedimentador .....	35
Figura 6: Forma correcta de almacenar. (Fuente CEPIS/OPS) .....	43
Figura 7: Forma incorrecta de almacenar. (Fuente CEPIS/OPS) .....	43
Figura 8: Mezclador tipo rampa operando correctamente. (Fuente CEPIS/OPS)..	51
Figura 9: Mezclador hidráulico operando correctamente. (Fuente CEPIS/OPS) ...	51
Figura 10: Planta y corte una canaleta parshall.....	52
Figura 11: Defectos de operación y mantenimiento (Fuente CEPIS/OPS) .....	59
Figura 12: Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la coagulación según la Water Research Association. (Fuente CEPIS/OPS) .....	64
Figura 13: Planta y perfil de la canaleta Parshall No. 2. ....	68
Figura 14: Ingreso con dos compuertas. (Fuente CEPIS/OPS).....	84
Figura 15: Una sola compuerta de ingreso. (Fuente CEPIS/OPS) .....	84
Figura 16: Estructura de salida de un decantador convencional. (Fuente CEPIS/OPS) .....	85
Figura 17: Decantador laminar de placas paralelas de última generación. (Fuente CEPIS/OPS) .....	86
Figura 18: Módulos de plástico deteriorados. (Fuente CEPIS/OPS).....	86
Figura 19: Operador parado sobre las pantallas de asbesto-cemento. (Fuente CEPIS/OPS) .....	87

Figura 20: Sistema de recolección en funcionamiento. (Fuente CEPIS/OPS).....	89
Figura 21: Sistema de recolección en mediante canaletas. (Fuente CEPIS/OPS)	89
Figura 22: Filtro rápido. (Fuente CEPIS/OPS) .....	95
Figura 23: Vista en elevación de la caja del filtro. (Fuente CEPIS/OPS) .....	99
<b>Figura 24:</b> Canaletas de lavado en .....	101
Figura 25: Medidor de expansión del lecho filtrante. (Fuente CEPIS/OPS).....	107
Figura 26: Duración de la operación de lavado. (Fuente CEPIS/OPS).....	109
Figura 27: Extrayendo una muestra del medio filtrante. (Fuente CEPIS/OPS)....	110
Figura 28: Demanda de cloro al punto de quiebre. (Fuente CEPIS/OPS) .....	121
Figura 29: Difusores de cloro en tuberías y canales. (Fuente CEPIS/OPS) .....	122
Figura 30: Sala de cloración con ventilación forzada. (Fuente CEPIS/OPS) .....	124
Figura 31: Sistema incompleto operación riesgosa. (Fuente CEPIS/OPS).....	126
Figura 32: Operación de descarga de alto riesgo. (Fuente CEPIS/OPS). .....	126
Figura 33: Extracción de cloro máximo permisible. (Fuente CEPIS/OPS).....	127
Figura 34: Sistema de conexión tubería matriz. (Fuente CEPIS/OPS) .....	127

## LISTADO DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1: Exactitud de dosificadores. (Fuente CEPIS/OPS).....	47
Cuadro 2: Parámetros de la canaleta parshall.....	52
Cuadro 3: Gradientes óptimos de mezcla.....	56
Cuadro 4: Índice de floculación de Willcomb. (Fuente CEPIS/OPS).....	64
Cuadro 5: Eficiencia del proceso de acuerdo a la turbiedad del agua cruda .....	67
Cuadro 6: Gradiente de velocidad de la mezcal rápida. ....	69
Cuadro 7: datos del ensayo .....	70
Cuadro 8: Gradiente de velocidad, canal de conexión al floculador 1. ....	71
Cuadro 9: Gradiente de velocidad, canal de conexión al floculador 4. ....	71
Cuadro 10: Gradientes de velocidad de los floculadores.....	72
Cuadro 11: Revoluciones por minuto de cada compartimiento de los floculadores. .....	73
Cuadro 12: Eficiencia de la floculación según la calidad del agua cruda.....	73
Cuadro 13: El caudal de trabajo de la planta fue de 850 L/s y el caudal de cada unidad.....	74
Cuadro 14: Análisis de flujos Método Wolf-Resnick.....	75
Cuadro 15 : Análisis por el Método Convencional Floculador 2.....	76
Cuadro 16 : Análisis por el Método Convencional Floculador 3.....	76
Cuadro 17: Análisis por el Método Convencional Floculador 4.....	77
Cuadro 18: Índice de Morril.....	77
Cuadro 19: Clasificación en función de la calidad del agua producida. (Fuente CEPIS/OPS). ....	81
Cuadro 20: Eficiencia comparativa. (Fuente CEPIS/OPS).....	83
Cuadro 21: Análisis por el Método Convencional Sedimentador 1 .....	93
Cuadro 22: Clasificación de los filtros rápidos. (Fuente CEPIS/OPS).....	95

Cuadro 23: Capa soporte de grava para viguetas de concreto prefabricadas. (Fuente CEPIS/OPS) .....	100
Cuadro 24: Características del medio filtrante. (Fuente CEPIS/OPS) .....	101
Cuadro 25: Características usuales de los lechos filtrantes. (Fuente CEPIS/OPS) .....	109
Cuadro 26: Velocidad y caudal de filtración.....	112
Cuadro 27: Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de barro. ....	114
Cuadro 28: Determinación de la velocidad y el caudal de lavado.....	115
Cuadro 29: Porcentaje de expansión del lecho filtrante .....	115
Cuadro 30: Características de los cilindros de cloro. (Fuente CEPIS/OPS) .....	127
Cuadro 31: Número de cilindros necesarios, según la capacidad requerida. (Fuente CEPIS/OPS).....	128

## LISTA DE ANEXO

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Formato de inspección inicial.	135
ANEXO B. Calibración de dosificador de sulfato.	141
ANEXO C. Calibración de dosificador de cal.	142
ANEXO D. Eficiencia de la mezcla rápida.	144
ANEXO E. Eficiencia de la floculación.	145
ANEXO F. Ensayo con trazadores.	146
ANEXO G. Ensayo con trazadores.	150
ANEXO H. Ensayo con trazadores	154
ANEXO I. Eficiencia de los sedimentadores en función del agua sedimentada.	156
ANEXO J. Eficiencia de la sedimentación en función del agua cruda.	160
ANEXO K. Ensayo de jarras para medir la eficiencia del sedimentador de Placas	161
ANEXO L. Ensayo con trazadores, determinación de las condiciones hidráulicas del sedimentador 1.	163
ANEXO M. Pérdidas de carga del filtro 7.	166
ANEXO N. Calidad del filtrado inicial.	169
ANEXO O. Bolas de barro.	171
ANEXO P. Duración del proceso de lavado en los filtros.	172

## RESUMEN

### TITULO:

MANUAL PARA LA EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRADO RÁPIDO EN LA ZONA RURAL COLOMBIANA\*

### AUTOR:

DIEGO ANDRÉS CABALLERO CABRAL\*\*

### PALABRAS CLAVES

Plantas de tratamiento de agua potable, evaluación, diagnostico, coagulación, floculación, filtración, cloración.

### DESCRIPCION

La evaluación de una planta de tratamiento de agua comprende un análisis del funcionamiento y comportamiento hidráulico de cada una de las partes que físicamente la conforman, de su eficiencia y de la forma en que está siendo operada, controlada, mantenida y administrada.

El documento desarrolla la teoría y prácticas para la elaboración de una evaluación y diagnostico orientada a las plantas de tratamiento que típicamente se encuentran en la zona rural colombiana (población menor de doce mil habitantes) como lo son las plantas de filtrado rápido convencionales, incluye, la inspección inicial o visita técnica de evaluación preliminar en la cual se desarrolla la toma de datos, el diagnostico preliminar y la proyección del cronograma de evaluación. En cuanto a los procesos de evaluación se desarrolla la metodología en cada unidad de tratamiento (coagulación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y cloración), los cuales son adaptados a partir de las investigaciones realizadas por el centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente CEPIS/OPS, y las experiencias o ejemplos de aplicación son citados de proyectos de grado que desarrollan la metodología propuesta por el CEPIS/OPS, llevados a cabo con anterioridad en la Universidad Industrial de Santander, el manual pretende ser una herramienta encaminada a generar una idea global de los procesos necesarios para así generar un diagnóstico que se aproxime a la realidad de la planta y formar información valiosa para llevar a cabo acondicionamientos y mejoras continuas con fines de garantizar la potabilidad y consumo seguro por parte de la población beneficiaria.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: William Ibáñez Pinedo

## ABSTRACT

TITLE:

MANUAL FOR EVALUATION AND DIAGNOSIS TREATMENT PLANT FILTER FAST IN RURAL COLOMBIA\*

AUTHOR:

DIEGO ANDRÉS CABALLERO CABRAL\*\*

KEY WORDS:

Treatment plants, assessment, diagnosis, coagulation, flocculation, filtration, chlorination

DESCRIPTION

The evaluation of a water treatment plant includes an analysis of performance and hydraulic behavior of each of the parties that make up physically, its efficiency and how it is being operated, controlled, maintained and managed.

The paper develops the theory and practices for the development of a diagnostic evaluation aimed at treatment plants typically found in rural Colombia (population less than twelve thousand) as are the conventional rapid filtration plants, including, initial inspection or visit preliminary assessment technique which develops data capture, preliminary diagnosis and screening of the assessment schedule. As the evaluation process is developed the methodology for each unit of treatment (coagulation, rapid mixing, flocculation, sedimentation, filtration and chlorination), which are adapted from research conducted by the Center for Sanitary Engineering and Science environment CEPIS / OPS, and the experiences and examples of application are listed grade projects that develop the methodology proposed by CEPIS / PAHO, conducted earlier in the Industrial University of Santander, the manual is intended as a tool to generate an overview of the processes needed in order to generate a diagnosis that comes close to reality on the ground and form valuable information to carry out fittings and continuous improvement for the purpose of ensuring safe drinking and consumption by the target population.

---

\* Work of degree

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Directress: William Ibáñez Pinedo

## INTRODUCCIÓN

Se evidencia la necesidad de un procedimiento o guía para llevar a cabo una evaluación y diagnóstico de una planta de tratamiento en el ámbito rural, por lo tanto se requiere de un manual que brinde las herramientas básicas que se adapten a las necesidades de las plantas de tratamiento de pequeñas poblaciones, para generar un concepto técnico con la finalidad de identificar de las falencias de los procesos unitarios.

La evaluación de una planta de tratamiento de agua comprende un análisis del funcionamiento y comportamiento hidráulico de cada una de las partes que físicamente la conforman, de su eficiencia y de la forma en que está siendo operada, controlada, mantenida y administrada.

Como resultado de la evaluación del sistema de tratamiento se proyectan mejoras en los procesos unitarios para alcanzar la optimización de los mismos y de esta forma lograr el objetivo de purificación propuesto por la normativa colombiana

Este manual es útil para operadores de una planta. Pues la finalidad del presente texto es la implementación de actividades de evaluación y diagnóstico con cierta periodicidad con el objetivo de mantener y mejorar las condiciones de operación y calidades del tratamiento.

El presente contenido es basado en las investigaciones y desarrollos adelantados por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS) El CEPIS/OPS es una agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS).

## **1. GENERALIDADES DE LAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO**

### **1.1 EL AGUA**

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no solo se debe a sus propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ella.

Se estima que aproximadamente el 70% del agua dulce es usada para agricultura. El agua en la industria absorbe una media del 20% del consumo mundial, empleándose en tareas de refrigeración, transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico absorbe el 10% restante.

El agua potable es esencial para todas las formas de vida, incluida la humana. El acceso al agua potable se ha incrementado durante las últimas décadas en la superficie terrestre.

### **1.2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA O POTABILIZADORAS**

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios (ver figura 1), que trabaja en conjunto y concordancia, son convenientemente seleccionados a partir de las características del agua a tratar, basados en la estrategia de múltiples barreras para la protección contra microbios (ver figura 2). Con la finalidad de remover totalmente los contaminantes microbiológicos, que afectan directamente la salud humana, los cuales están presentes en el agua cruda con lo cual se busca obtener un agua apta para el consumo humano, cumpliendo con los parámetros establecidos en la normativa colombiana (RAS 2000)

## **Tipos de plantas de tratamiento de agua**

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar, de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman en:

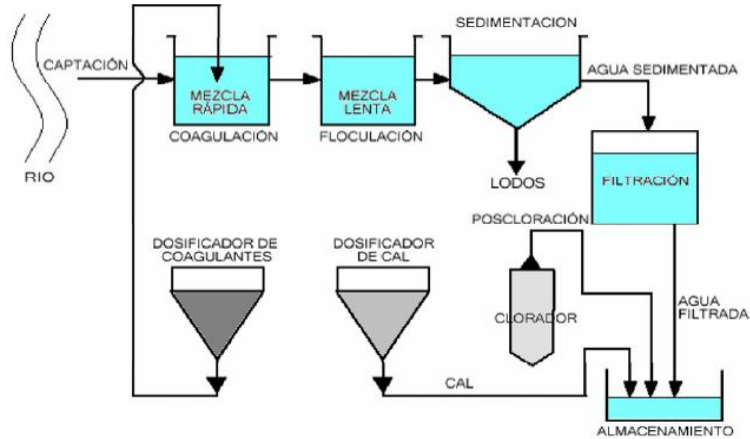
- Plantas de filtración rápida.
- Plantas de filtración lenta.

Las características tecnológicas del sistema deben de estar de acuerdo con los recursos económicos, humanos y materiales disponibles localmente para que se puedan cumplir los objetivos de tratamiento previstos, ya que es común tener poblaciones rurales que cuentan con excelentes fuentes hídricas pero con instalaciones inadecuadas a su realidad con tecnologías importadas o de patente que suponen altos costo, personal profesional especializado, materiales y repuestos importados para mantenimiento además de una alta dependencia de energía eléctrica en su funcionamiento.

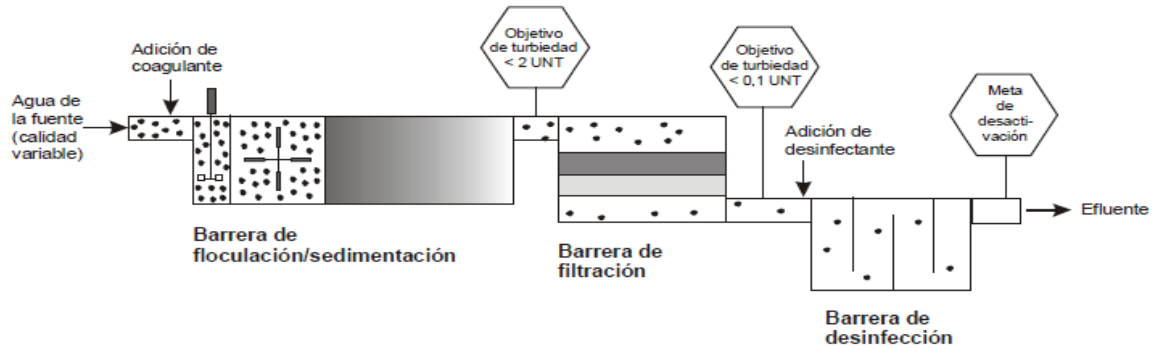
Por el tipo de tecnología utilizada en la Región, las plantas de filtración rápida se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Sistemas de tecnología convencional clásica o antigua.
- Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS.
- Sistemas de tecnología patentada, normalmente importada de los países desarrollados.

**Figura 1: Muestra el diagrama de flujo para una planta de tratamiento de agua potable. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 2: Estrategia de múltiples barreras para la protección contra microbios. (Fuente CEPIS/OPS)**



### 1.2.1 Planta de filtración rápida completa

Una planta de filtración rápida completa normalmente está integrada por los procesos de **coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección** (ver figura 1). El proceso de coagulación se realiza en dos etapas: una fuerte agitación del agua para obtener un esparcimiento instantáneo de la sustancia coagulante en toda la masa de agua (mezcla rápida) seguida de una agitación lenta para promover la rápida aglomeración y crecimiento del floculo (etapa de floculación).

La coagulación tiene la finalidad de mejorar la eficiencia de remoción de partículas coloidales en el proceso de decantación (sedimentación de partículas floculentas). El proceso final de filtración desempeña una labor de acabado, le da el pulimento final al agua.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, el filtro debe producir un efluente con una turbiedad menor o igual a 0,10 UNT para garantizar que esté libre de huevos de parásitos (Giardia, Cryptosporidium, etcétera). Para lograr esta eficiencia en la filtración, es necesario que los decantadores produzcan un agua con 2 UNT como máximo. Finalmente, se lleva a cabo la desinfección. Cuya función principal de este proceso es completar la remoción de microorganismos patógenos que no quedaron retenidos en el filtro y servir de protección contra la contaminación que el agua pueda encontrar en el sistema de distribución.

La desinfección, en la forma en que normalmente se aplica (esto es, con residual libre de 1 mg/L a la salida de la planta y tiempo de contacto mínimo de 30 minutos), solo tiene la capacidad de remover bacterias, para remover huevos de parásitos se necesitarían aplicar dosis altísimas y disponer de tiempos de contacto (tiempo durante el cual el desinfectante lleva a cabo su función en el tanque de almacenamiento) muy largos, que hacen impracticable el proceso. Como los huevos de parásitos son grandes, un filtro que opere eficientemente y reciba agua con no más de 2 UNT puede producir un efluente exento de huevos de parásitos.

### **Características de un Sistema convencional de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS**

Esta tecnología se empezó a desarrollar en la década de 1970 y se ha ido perfeccionando cada vez más a la luz de las últimas investigaciones realizadas en los países desarrollados. Las unidades son de alta tasa, ocupan una extensión

que constituye el 25% ó 30% del área que ocupa un sistema convencional de la misma capacidad. La reducción del área se debe al empleo de floculadores verticales que por su mayor profundidad ocupan menos área que los horizontales y permiten compactar mejor el sistema. Los decantadores son de placas inclinadas a 60 °, de tal modo que el área de decantación real es la suma de las proyecciones horizontales de todas las placas, lo que equivale a la superficie del fondo del decantador convencional.

Los filtros se proyectan en baterías para ser operados con altura variable y por el principio de tasa declinante, de acuerdo con el cual filtros operan con velocidades decrecientes, entre lavado y lavado, y se desfasan en la operación. Así, entre todos llegan a asumir la capacidad completa del sistema y el caudal permanece constante. El lavado de una unidad se efectúa mediante el caudal que producen los otros filtros en operación, por lo que no se precisa de sistema de bombeo ni de tanque elevado. Estas características hacen que este tipo de sistemas tengan un costo inicial muy bajo.

El costo de operación bajo que el de otros sistemas, debido a que no requieren energía eléctrica para su funcionamiento, son muy compactos y se reduce también la cantidad de personal necesario para la operación. Debido a lo expuesto anteriormente se logra un sistema de fácil construcción, operación y mantenimiento.

## **2. EVALUACION INICIAL: PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRADO RAPIDO (TECNOLOGIA CEPIS/OPS)<sup>1</sup>**

### **2.1 INTRODUCCION**

El primer paso a dar en el proceso de evaluación de una planta de tratamiento es la revisión o inspección inicial, de las instalaciones de la planta, desde las dependencias administrativas hasta las diferentes unidades de tratamiento. Pero no solo comprende las instalaciones, también una recopilación de información como la localización, fuentes de abastecimiento, características de cada proceso, tipo de planta, y su capacidad, también interactuar y compartir información con el personal tanto administrativo y de operación haciendo énfasis en estos últimos pues son ellos quienes están implicados en el manejo y control y viven el día a día de la planta como tal. Se hace necesario recopilar la información histórica tomada por los operarios, como lo es graficas de turbiedad histórica de agua cruda, análisis microbiológicos de rigor y turbiedades que entregan los decantadores y filtros, también los datos del residual de cloro.

Todo lo anterior se lleva a cabo con la finalidad de tener una idea global del estado de la planta de tratamiento y generar un diagnóstico inicial o primario para así orientar los esfuerzos o dirigir los recursos necesarios en la optimización o mejora de los procesos con el objetivo de cumplir las metas de potabilización propuestas para la mejora de calidad de vida de la población beneficiaria.

Con el objetivo de identificar el sistema y determinar los procesos que más afectan la producción se adaptó del centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS /OPS), partiendo de la metodología propuesta por la agencia de la protección ambiental de los estados unidos (EPA) quien desarrolla la

---

<sup>1</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

ficha para la evaluación inicial de una planta de tratamiento(ANEXO A), seguido se explicara cómo se debe diligenciar de paso a paso la forma adecuada ya que dependiendo la calidad de la información obtenida se genera un diagnóstico más ceñido a la realidad lo cual permite un ahorro en tiempo y recursos.

## 2.2 LA FICHA COMPRENDE:

- A. UBICACIÓN
- B. FUENTE DE ABASTECIMIENTO, CAPTACIÓN, CONDUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO PREVIO
- C. CALIDAD DE LA FUENTE
- D. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA
- E. OBSERVACIONES
- F. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

### A. UBICACIÓN

Fecha.....

1. País: Colombia
2. Nombre de la plant \_\_\_\_\_
3. Poblaciones abastecidas \_\_\_\_\_
4. Localización:  
**Departamento:** \_\_\_\_\_ **Provincia:** \_\_\_\_\_ **Municipio:** \_\_\_\_\_
5. Dirección de la planta: \_\_\_\_\_  
Distancia de la cabecera municipal: \_\_\_\_\_ km  
Altitud: \_\_\_\_\_ m. s. n. m.
6. Institución propietaria o administradora: \_\_\_\_\_

En el primer ítem encontramos los aspectos de localización o ubicación las instalaciones de la planta de tratamiento, datos que serán fácilmente

proporcionados por la administración o que serán obtenidos de la documentación que faciliten, así como también la entidad administradora, que para el caso de la mayoría de las poblaciones del área rural colombiana se encuentran bajo el control de las alcaldías municipales.

## **B. FUENTE DE ABASTECIMIENTO, CAPTACIÓN, CONDUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO PREVIO**

7. Fuente de abastecimiento:

a) Quebrada: \_\_\_\_\_

b) Río \_\_\_\_\_

c) Lago o embalse \_\_\_\_\_

7.1 Tipo de toma:

a) bocatoma lateral

b) bocatoma de fondo

7.2 Conducción de agua cruda:

a) Por gravedad

b) Por bombeo

7.3 remoción de partículas por sedimentación (arena).

a) Desarenador

b) Presedimentador

Dimensiones:

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área: \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

Carga superficial: \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d

El ítem B tiene como objetivo caracterizar el sistema de toma, conducción y pre tratamiento que se somete el agua, como también dimensionar la unidad de

remoción de arena, en cuanto a la fuente de abastecimiento es importante identificar claramente el tipo de fuente, su nombre y localización, en cuanto al tipo de bocatoma se tienen dos posibles opciones una bocatoma lateral muy común y usada en la zona rural colombiana se caracteriza por tener una rejilla adjunta a la cámara de derivación y capta el líquido en forma paralela a la dirección de la corriente , por el contrario la bocatoma de fondo capta el agua desde el fondo de la estructura de represamiento para así conducirla hasta la cámara de derivación, las dos captan el agua superficial que pasa por la estructura en concreto ciclópeo que se encarga de generar un flujo laminar constante para facilitar la captación de las aguas más limpias y claras.

### **C. CALIDAD DE LA FUENTE**

Solicitar información de calidad del agua cruda de los archivos de la planta de por lo menos un año. Básicamente, promedios mensuales de turbiedad, color, pH, alcalinidad, número más probable (NMP) de coliformes termotolerantes y también promedios diarios de turbiedad del mes más lluvioso y del mes más seco. La información que se exigirá tendrá como objetivo el estudio y análisis, con la finalidad de caracterizar e identificar el tipo de tratamiento que requiere dicha fuente para lograr la meta de potabilización, toda esta información se copiara si existen archivos físicos o se almacenara en un dispositivo de almacenamiento electrónico y será inventariada con la finalidad de generar un archivo de información base para el trabajo de evaluación y diagnóstico.

Información a solicitar:

- Archivos de control de operación de la planta
- Planos del diseño de la planta – memorias de cálculo e informes del diseñador.
- Esquema de flujo de la planta
- Manuales de operación y mantenimiento
- Manuales de los equipos

#### **D. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA**

8. Caudal de la planta (En el momento de la visita) \_\_\_\_\_ L/s

8.1 **Caudal de proyecto** (Diseño): \_\_\_\_\_ L/s

8.2 Caudal máximo con el que opera la planta: \_\_\_\_\_ L/s

(Indique los meses del año o situaciones en que se da esta condición): \_\_\_\_\_

8.3 Caudal mínimo con el que opera la planta \_\_\_\_\_ L/s

Indique los meses del año o las situaciones en que se da esta condición: \_\_\_\_\_

9. **Tipo de planta:** filtración rápida

a) Patente

b) Convencional clásica

c) Tipo CEPIS/OPS

Año en que se diseñó: \_\_\_\_\_

Año en que se remodeló/amplió/optimizó: \_\_\_\_\_

En presente apartado de la ficha de inspección se requiere entender y especificar cuál es el caudal para el que fue diseñada la planta de tratamiento, el caudal de diseño de un planta es aquel para el cual fue proyectada la planta teniendo en cuenta la demanda inicial y futura en un período de diseño determinado, es la máxima capacidad para tratar agua apta para el consumo,

El caudal min y máx con que opera la planta se obtienen de los datos históricos que se recopilan o de las indicaciones que den los operarios, el caudal máximo de operación puede ser igual o mayor a caudal del proyecto, en el caso que la planta este excediendo el caudal de proyecto y requiera de una ampliación urgente pues la planta no estaría logrando las metas de potabilización en cuanto a calidad ( no es apta para el consumo), estos datos tiene como objeto analizar la flexibilidad y capacidad de tratamiento potencial con que cuenta la planta en el momento de la inspección.

La clasificación de la planta de tratamiento es un parámetro que se debe diligenciar claramente para no tener una idea errónea o contradictoria en cuanto a las unidades presentes, el presente texto pretende ser útil para la la evaluación de plantas de filtración rápida y de tecnología apropiada tipo CEPIS /OPS debido a que es la tecnología de mayor presencia en la zona rural colombiana (poblacion menor de 12000 habitantes).

## 10. Descripción:

### 10.1 Medidor de caudal

Tipo:

- a) Canaleta parshall
- b) macromedidor

### 10.2 Mezcla rápida

Tipo de mezclador:

- a) mecánico: retromezclador \_\_\_\_
- b) hidráulico parshall \_\_\_\_ vertedero\_\_\_\_

Punto de aplicación:

- a) punto de mayor agitación
- b) fuera del punto de mayor agitación

### 10.3 Floculadores

Tipo:

- a) mecánico
- b) hidráulico: flujo vertical\_\_ flujo horizontal\_\_

En serie\_\_\_\_ paralelo\_\_\_\_

Número de unidades: \_\_\_\_\_

Número de tramos: \_\_\_\_\_ (un floculador tiene min 3 etapas o tramos)

Profundidad útil: \_\_\_\_\_ m

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área de cada unidad: \_\_\_\_\_

#### 10.4 Decantadores

Tipo

a) convencional

b) de placas paralelas o laminar.

forma: rectangular \_\_\_\_\_ cuadrado \_\_\_\_\_

Número de unidades: \_\_\_\_\_

Profundidad útil: \_\_\_\_\_ m

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área de cada unidad: \_\_\_\_\_

#### 10.5 Filtros

a) Tipo de filtro:

Tasa constante

Tasa declinante

Número de unidades \_\_\_\_\_

b) Tipo de lecho filtrante:

Simple

Doble

c) Área de cada filtro \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

Del numeral 10.2 al 10.5 se enuncian las diferentes estructuras o reactores que tiene una planta de filtrado rápido la finalidad es caracterizar y clasificar, para identificar los procesos unitarios deficientes, para cada uno es necesario calcular el volumen que puede tratar, para lo cual se requiere dimensionar la estructura tomando mediadas de largo\*ancho\*profundidad.

## 10.6 Dosificación

### **a) Coagulante**

Cual:

Sulfato de aluminio

Cloruro férrico

Policloruro de aluminio (PAC)

Sulfato ferroso o férrico

Otro\_\_\_\_\_

Tipo de dosificador en solución:

Gravimétrico

Volumétrico

Número de dosificadores\_\_\_\_\_

### **b) Modificador del ph:**

Cual:

Oxido de calcio (cal viva)

Hidróxido de calcio

Carbonato de sodio

Hidróxido de sodio

Otro\_\_\_\_\_

Tipo de dosificador del modificador de ph en solución:

Gravimétrico

Volumétrico

Número de dosificadores\_\_\_\_\_

### **d) Desinfectante:**

Cual:

Cloro líquido

Cloro gaseoso

Ozono

Permanganato de potasio.

Tipo de dosificador en solución:

Bombas inyectoras

Hidroeyectores

Número dosificadores: \_\_\_\_\_

El numeral 10.6 se identifican el coagulante que se usa, el modificador de pH y el desinfectante, en cada ítem se enumeran las diferentes opciones mas probables, de no tener la opción en la ficha técnica se debe mencionar en otros el tipo de químico utilizado en la planta, también se debe identificar el tipo de dosificador y el número de los mismos, con la finalidad de determinar la flexibilidad y la disponibilidad del número suficiente para la óptima operación de la planta.

#### **E. OBSERVACIONES**

Indicar cualquier situación extraordinaria observada en la planta de tratamiento. Como también los aspectos relevantes que no se encuentren enumerados en la ficha de inspección, y que sean determinantes para un diagnóstico adecuado de la planta.

#### **F. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR**

Se efectuará sobre la base de todo lo observado y la información procesada y se indicará cuáles son los procesos más críticos cuyas unidades requieren ser evaluadas con profundidad para determinar el origen de los problemas.

## **2.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA FICHA DE INSPECCION INICIAL EN LA PLANTA DE PUENTE NACIONAL<sup>2</sup>**

La presente evaluación inicial se extrajo de DIAGNOSTICO Y OPTIMIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE, MUNICIPIO DE PUENTE NACIONAL, realizado por **JERSON HERNAN SAAVEDRA BOLIVAR** como trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil en el año 2005.

### **CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES:**

**Quebrada Agua Blanca:** Nace en el páramo de Peña Blanca hacia el oriente respecto a la planta, con elevación máxima de 2230 m. El sentido del flujo de agua es sur-norte, con una pendiente moderadamente suave, con tendencia a ser meandrica y alta erosión en las zonas de cambio de dirección, como también hacia sus costados. Su sobresaliente cualidad es que transporta una gran cantidad de rocas, que se extraen como material para triturado. La cuenca tiene una calificación del terreno entre montañoso-escarpado, que por su pendiente, para época de invierno, sube el caudal bruscamente por la alta escorrentía.

**Arroyo las Flores y Vivero:** Nacen en la parte occidental respecto a la planta, en el sector conocido como el filo a 1720 m de altura promedio, distan la una de la otra alrededor de 700 m. El sentido del flujo de agua es oeste-este con una pendiente pronunciada caracterizadas por un caudal bajo en verano y una corta longitud de corriente de agua. Las fuentes de agua permanecen ocultas por los árboles, de los cuales caen y se depositan las hojas, generando acumulación sobre la rejilla, impidiendo el flujo y añadiendo coloración al agua debido al contacto y descomposición de las hojas en el sitio.

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO:**

#### **Quebrada Agua Blanca:**

---

<sup>2</sup> **SAAVEDRA B. Jerson.** Diagnostico y optimización de la planta de tratamiento de agua potable, municipio de puente nacional. 2005

**Captación:** Por medio de bocatoma de fondo ubicada en el margen derecho, en el sentido de la corriente sur-norte, se capta el agua (en época de verano se suele reducir considerablemente), a través de una rejilla de 0.4\*0.9m y una profundidad de 0.4m. Hace falta instalar una estructura de medición después de la captación que permita determinar exactamente el caudal captando.

**Figura 3:** Bocatoma de fondo



**Sedimentador:** Esta ubicado a 200m de la bocatoma; es una estructura donde el paso hacia la cámara de quietamiento es sumergido. Tiene una profundidad máxima de 2.5m, con pendiente suave hacia el canal central mediante el cual se desagua. Hacia la salida tiene un deflector de oleajes y un vertedero semejante al de la entrada. La estructura está totalmente cubierta por láminas metálicas que impide entrada de viento y que caiga suciedad al agua.

El desarenador trabaja fuera de su capacidad, porque el flujo inunda por completo la estructura, y el tubo de excesos de 8", no da la capacidad de desalojar todo el volumen de agua, desbordándose por el perímetro.

**Figura 4: Rebose desarenador**



**Figura 5: Panorámica sedimentador**



- **Aducción:** Tiene una longitud de 5.2 km en tubería PVC, en diámetro de 8" por 3 km, con una reducción y llegada a la planta en diámetro de 6" por 2.2 km, con cuatro "aéreos" sobre la quebrada, además cuenta con algunas ventosas en puntos altos como también válvulas de purga en los puntos bajos. A estas válvulas es poco el mantenimiento preventivo que les realizan.

Los cambios de dirección en la tubería son bruscos alcanzando más de los 90 grados en varios tramos especialmente los que están dentro del municipio; el trazado tiene un recorrido extenso que podía haber sido recortado evitando tantos cambios de dirección. En la actualidad no se cuenta con un plano detallado de la topografía y nivelación de la tubería de aducción que ayude a analizar si son requeridas más válvulas de purga o ventosas.

#### **Arroyo las Flores y Vivero.**

**Captación:** Por medio de bocatoma de fondo en rejilla metálica con dimensiones de 0.2\*0.4 m y a través de tramos aproximados de 350m de tubería metálica de 6", que conducen el agua hasta el sedimentador, único para ambos flujos de agua.

**Desarenador:** El agua llega a un pozo donde se unen ambas aducciones; entran a la unidad por el fondo de la pantalla, haciendo un recorrido en U. Se conduce hacia la planta por una tubería de 4" de 400 m de longitud.

## **CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO**

### **Caudal de la Planta:**

1 Caudal de Diseño: 16 l/s (Dato estimado por el jefe de planta).

2 Caudal de Operación: 19 l/s

### **Tipo de Planta:**

- a. La planta mixta: de tecnología apropiada y decantadores convencionales.
- b. Año en que se diseñó: 1960

### **Descripción:**

- **Medidor de Caudal:** Tipo vertedero triangular con descarga sumergida.
  
- **Mezcla Rápida:** Tipo: mecánica. Actualmente no hay mezcla rápida y la solución de coagulante no se aplica sobre toda la masa de agua.
  
- **Floculadores:** Tipo agitación mecánica.
  - a. Número de Unidades: 1
  - b. Numero de Cámaras: 2
  - c. Ancho de la Unidad: 2.4 m
  - d. Profundidad Útil: 2.3 m
  - e. Largo de cada Cámara: 2.4 m
  - f. Tiempo de Retención del Proyecto: No existen datos al respecto.
  - g. Tiempo de Retención de Operación: 20 min. (Por el número de cámaras).

- **Decantadores:** Tipo convencional.
  - a. Número de Unidades: 2
  - b. Área de cada Unidad: 42.6 m<sup>2</sup>
  - c. Carga Superficial del Proyecto: No existe información al respecto.
  - d. Carga superficial de Operación: 18.2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d.

- **Filtros:** Tipo convencionales de tasa declinante.
  - a. Tipo de Lecho Filtrante. Mixtos.
  - b. Área de cada Filtro. 10.95 m<sup>2</sup>
  - c. Rata de Filtración de Diseño: No existen datos al respecto.
  - d. Rata de Filtración Promedio de Operación: 71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d

- **Dosificación:**

**Coagulación:**

- a. Químico: Sulfato de Aluminio tipo B
- b. Equipo: Dosificador tipo volumétrico

**Modificador de pH:**

- a. Químico: Cal.
- b. Equipo: Dosificador tipo volumétrico (no se usa actualmente).

**Cloración:**

- a. Químico: Cloro líquido.
- b. Equipo: Dosificador de inyección al vacío.

### **3. EVALUACIÓN ESPECÍFICA: PLANTAS DE FILTRADO RAPIDO (TECNOLOGIA CEPIS/OPS)**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La evaluación de una planta de tratamiento de agua es una actividad de gran importancia para lograr las metas de potabilización, esta debe realizarse con determinada frecuencia, con la finalidad de controlar e implementar acciones orientadas a mantener y mejorar los procesos.

En el proceso de evaluación se identifican las deficiencias en las unidades y procesos que impiden un adecuado funcionamiento. Durante dicho proceso es necesario determinar la flexibilidad del sistema a los cambios de las características de calidad del agua cruda (turbiedad, color, pH), dado que es típico encontrar plantas de potabilización en los que se amortiguan bien aguas crudas con turbiedades altas (entre 20 UNT y 80 UNT), pero el sistema no remueve turbiedad en aguas con buenas características o niveles inferiores a 5 UNT.

Como resultado de la evaluación, se hace posible, caracterizar las deficiencias existentes, bien sea de mantenimiento, operacional o de diseño.

Las medidas de corrección que se toman a partir de la evaluación permitirán incrementar la capacidad potencial de planta, lo cual repercute en un aumento en la calidad final de agua y reduce los costos de operación (pues los químicos aplicados generaran los beneficios esperados).

La evaluación comprende las definiciones de los procesos unitarios y de las unidades, además incluye criterios y procedimientos para evaluar una planta de filtrado rápido desde el comportamiento hidráulico de los procesos y unidades que integran una planta potabilizadora de tipo convencional clásica o de tecnología

apropiada (plantas tipo CEPIS /OPS), hasta la evaluación de las condiciones de las instalaciones, los equipos y posibles ajustes a los mismos.

Con la finalidad de ser una herramienta practica y de fácil consulta se enuncia las variables que afectan las metas de producción en forma clara y concisa, para dar una idea general de la evaluación de una planta.

A continuación se desarrollan las definiciones y parámetros básicos más destacados que afectan la eficiencia y las metas de potabilización así como la revisión de las condiciones hidráulicas necesarias, también procedimientos de evaluación específicos para cada proceso que integra una planta de filtración rápida.

### **3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN<sup>3</sup>**

**La coagulación:** Es un proceso netamente químico que inicia en la unidad de mezcla rápida, busca desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en el agua para iniciar un proceso de aglomeración con la finalidad de formar un floc (floculo) en el proceso de floculación. Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos de acuerdo con las características del agua (pH, temperatura, cantidad de partículas); en adelante, se necesitará una agitación baja, la cual ocurre dentro de la unidad de mezcla lenta. Es importante recordar que la eficiencia de la floculación, sedimentación y filtración dependen de la etapa de coagulación ya que esta se encuentra relacionada estrictamente con la remoción de las partículas coloidales.

Debido a razones de orden práctico y económico, el número de cámaras de los floculadores mecánicos, no supera las seis unidades. La recomendación es como

---

<sup>3</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

mínimo de tres unidades de floculación, cada una con gradientes en orden de decremento del gradiente de velocidad.

**Coagulantes:** Los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas son:

- Sulfato de aluminio.
- Sulfato ferroso.
- Sulfato ferroso clorado.
- Sulfato férrico.
- Policloruro de aluminio (pac).
- Polielectrolitos.

**Evaluación:** Los principales factores que influyen en este proceso son los siguientes:

- Características de las aguas: especialmente, pH, temperatura, alcalinidad, contenido de turbiedad y color.
- Características de las sustancias químicas utilizadas: tipo, dosis, y concentración de la solución.
- Características de las unidades de dosificación: tipo, exactitud.
- Características de las unidades de mezcla rápida: lugar y forma de aplicación del coagulante, intensidad de mezcla y tiempo de retención.

A continuación se enseñan procedimientos de evaluación de las características más influyentes en la coagulación.

### **3.3 EVALUACIÓN DE LA SELECCIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS**

**Objetivo:** Caracterizar las sustancias químicas y las condiciones óptimas de aplicación.

**Procedimiento:** Se requiere determinar en el laboratorio:

- El coagulante más efectivo.
- La dosis óptima de coagulante.
- El ph óptimo de coagulación.
- El modificador de ph más efectivo.
- La dosis óptima de modificador de ph.
- Ayudante de coagulación y dosis óptima correspondiente.
- La concentración óptima del coagulante seleccionado.
- La secuencia de aplicación de sustancias químicas.

Estos ensayos se realizarán en el laboratorio y constituyen los parámetros óptimos de coagulación, se obtienen por medio de la realización del ensayo o prueba de jarras.

#### **Prueba de jarras**

Su principal objetivo es determinar el coagulante y la dosis para el proceso de floculación en la eliminación de turbiedad en las plantas de tratamiento de agua potable

Consiste en ensayar en muestras de agua cruda, a diferentes concentraciones de coagulante a manera de pruebas piloto a escala, teniendo como referencia los gradientes de velocidad y tiempos de residencia o retención que se observan en la planta. De estos ensayos se obtienen dosis referenciales que se aplican luego a la planta de tratamiento.

La prueba se divide en tres etapas:

1. Coagulación
2. Floculación
3. Sedimentación

### 3.4 EVALUACIÓN DEL MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS

**Objetivo:** Procedimiento y criterios para determinar las condiciones existentes de recepción, manejo y almacenamiento de sustancias químicas.

**Procedimiento:** En la planta de tratamiento que es materia de evaluación se requiere identificar:

- Si el diseño de la zona de entrada al almacén es adecuado para que el material sea correctamente recepcionado.
- Las sustancias utilizadas en el tratamiento, así como su composición química, comprobar que coincidan con las especificaciones técnicas originales.
- Rotulado, envases y forma de presentación de las sustancias, comprobar que coincidan con las especificaciones originales de compra y licitación.
- Características de almacenamiento, lo cual debe incluir la determinación de la capacidad total de almacenamiento, así como el lapso para el cual hay existencia de sustancias químicas, definidas por la ecuación:

$$V_t = \frac{C_D * T_t}{d}$$

Donde:

VT = volumen real o necesario (m<sup>3</sup>)

Cd = cantidad media diaria de sustancias químicas (kg)

TT = periodo (días)

d = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

La información obtenida debe compararse con la existencia real de sustancias químicas y el lapso en el cual esta se utilizará y la capacidad adicional para almacenar en tiempos de escases. Adicionalmente, se debe evaluar el área de almacenamiento y su forma, el uso de tarimas adecuadas, la existencia de corredores entre ellas para que se pueda utilizar el material. El almacenamiento se debe hacer en forma cronológica; es decir, por orden de llegada, con la finalidad de garantizar que se use el más antiguo primero.

Se revisa la capacidad del arrume que tiene un saco y la presencia de humedad, para evitar el rompimiento de estos por el exceso de peso, además se debe evitar densificar el químico ya que pierde su calidad y utilidad, también se debe revisar la existencia de equipos adecuados para transporte hasta el lugar de uso.

En la figura 6, 7 se ilustra forma correcta del almacenamiento de sustancias químicas como la incorrecta.

**Figura 6: Forma correcta de almacenar. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 7: Forma incorrecta de almacenar. (Fuente CEPIS/OPS)**



La dosis de coagulantes o de cualquier sustancia química empleada en el tratamiento de agua constituye uno de los parámetros importantes del proceso de

coagulación, pues una aplicación incorrecta en la concentración del coagulante disminuye la capacidad de remoción de partículas afectando la meta de purificación, por lo cual se hace necesario calibrar y revisar la exactitud para lograr una concentración óptima del coagulante.

### **3.5 EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE**

**Objetivo:** Caracterizar las sustancias químicas y las condiciones óptimas para su aplicación.

#### **Equipo necesario:**

- Balanza de torsión.
- Recipiente para la toma de muestras (de acuerdo con la capacidad de dosificación).

#### **Procedimientos de evaluación:**

- a) Determinación del grado de exactitud del dosificador. En cada dosificador, sea de vía húmeda o seca, se deberá:
  - Llenar la tolva o depósito hasta 3/4 de su altura.
  - Evaluar el dosificador en su punto actual de dosificación y luego con diferentes aperturas o velocidades. Tomar en cada caso tres muestras, pesarlas y determinar el valor medio (u obtener la concentración existente, si es un dosificador de vía húmeda).
  - Graficar los valores teóricos (dados por el fabricante o utilizados en la planta) y los obtenidos en el ensayo, con fines comparativos.
  - Adicionalmente, se requiere comparar la dosis que realmente se está utilizando en la planta con la dosis óptima obtenida en el laboratorio con el equipo de prueba de jarras, para lo cual:

$$P = \frac{Q * D}{1000}$$

D = dosis de coagulante (mg/L)

Q = caudal tratado (m<sup>3</sup>/unidad de tiempo)

P = peso dosificado (kg/unidad de tiempo)

Se ingresa a la curva (curva de calibración del dosificador) con el peso dosificado correspondiente a la dosis óptima y ubicando la apertura en que se encontraba el dosificador, se determina la dosis que estaba aplicando a la planta.

b) Determinación de la flexibilidad del equipo

El rango de dosificación del equipo será igual a:

$$F = P. \text{ máx.} - P. \text{ mín.}$$

Donde:

P. máx. = capacidad de dosificación máxima, al final del periodo de diseño, cuando el caudal y las dosis sean máximas.

P. mín. = capacidad de dosificación mínima, al iniciar el periodo de diseño, cuando el caudal y las dosis son mínimas

c) Determinación del grado de concentración

Con el peso real dosificado y el caudal de agua que entra a la cámara de solución se puede determinar el grado de concentración existente, el cual será:

$$C = \frac{P * 100}{q}$$

Donde:

P = peso dosificado (kg/s)

q = caudal (L/s)

C = concentración (%)

d) Determinación del periodo de retención del tanque de disolución

- Determinar el volumen del tanque de solución.
- Con los caudales mínimo y máximo de agua que entra al tanque, se pueden determinar los tiempos de retención máximo y mínimo por medio de la siguiente ecuación:

$$T_o = \frac{V}{q * 60}$$

Donde:

V = volumen del tanque (litros)

q = caudal del agua para solución (L/s)

To = tiempo de retención (minutos)

e) Interpretación de resultados

El grado de exactitud (IE) de dosificación, conocidas las curvas teóricas y reales, se determina por la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{PR}{PT} * 100$$

Y depende de si el PR es mayor o menor que PT.

Donde:

PT = peso teórico o el utilizado por la planta

PR = peso real obtenido en la prueba de calibración

El grado de exactitud según el criterio indicado puede clasificarse de la manera ilustrada en el cuadro siguiente:

**Cuadro 1: Exactitud de dosificadores. (Fuente CEPIS/OPS)**

<b>Exactitud</b>	<b>Valor I (%)</b>
Muy buena	< 5
Buena	5 - 10
Regular	10 - 15
Deficiente	> 15

El dosificador debe ofrecer el suficiente rango de flexibilidad para operar en condiciones mínimas (con la mínima dosis al iniciar el funcionamiento de la planta) y máximas (con la máxima dosis al finalizar el periodo de diseño de la planta), debido a que las calidades de la fuente abastecimiento no son constantes durante el año y además la planta está diseñada para operar y tratar un rango amplio de caudales con la finalidad de satisfacer una demanda creciente, es necesario contar con un flexibilidad en los dispositivos de dosificación para así no afectar las metas de potabilidad en el futuro.

### **3.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA EVALUACION DEL MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUIMICAS EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA<sup>4</sup>**

La presente evaluación se tomó de OPTIMIZACIÓN DEL PRETRATAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA LA PTAP DE BOSCONIA DE LA CAMB, realizado por **OSCAR ORLANDO MENDOZA JAIMES Y MÓNICA DEL PILAR GALVIS BELTRÁN** como trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil en el año 2004.

---

<sup>4</sup> **MENDOZA J. Oscar Y GALVIS B. Mónica.** En: optimización del pretratamiento e implementación de dosificación de sulfato de aluminio líquido para la PTAP de Bosconia de la CAMB, 2004.

## EVALUACION DEL MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS.

- Las sustancias químicas empleadas en la planta son:
- Sulfato de aluminio como coagulante.
- Cal para corrección de pH.
- Cloro como desinfectante.
- Polímeros CYTEC 579 y EXRO 621 como ayudante de coagulación y floculación.

**Sulfato de aluminio.** Para el almacenamiento del sulfato se utiliza una bodega ubicada en el primer piso del Edificio de Químicos, tiene un área de 140 m<sup>2</sup> y una capacidad de almacenar 4000 bultos.

Genera un ambiente propicio para el depósito de esta, ya que no es húmedo, tiene buena ventilación e iluminación y es de fácil acceso. El sulfato es transportado al tercer piso, lugar donde se encuentran las tolvas de los dosificadores por medio de un elevador con capacidad de 300 kilos.

Se utilizan bultos de 25 kilos de sulfato tipo B de la empresa SULFO QUÍMICA S.A. Cuando se reciben los pedidos de sulfato se les realiza ensayos de control de calidad correspondientes a porcentajes de alúmina, de hierro y porcentaje de insolubles<sup>34</sup>.

**Cal.** Son almacenados en la bodega del primer piso del Edificio de Químicos, tiene un área de 56 m<sup>2</sup>. Viene en presentación de bultos de 25 kilos de cal hidratada industrial, suministrada por la empresa Calco; es transportada al tercer piso por medio de un elevador y depositado en el mezclador cilíndrico de 2.5m de diámetro y 0.8 m de altura que al disolverlo pasa a los extintores de cal marca DEGREMONT cada uno con capacidad de 2500 L.

La cal se aplica para modificar el pH puede hacerse en dos puntos, cuando se agrega sulfato de aluminio o en el tanque de agua tratada.

Para garantizar una mezcla completa y uniforme entre la cal y el agua se utiliza el extintor, esta es aplicada en solución a una concentración del 5%<sup>35</sup>.

**Cloro.** En medio de las dos bodegas del primer piso del Edificio de Químicos se encuentra la bodega de almacenamiento de cloro con capacidad de guardar 12 tanques, ahí se encuentran las indicaciones necesarias para cuando suceda algún escape, además un equipo detector de fugas de cloro, mascarar artigases, gafas, 2 tanques de aire y todo el equipo necesario para cuando suceda una emergencia.

En el segundo piso del Edificio de Químicos se encuentra la sala de cloradores, básicamente son dos marca WALLACE & TIERNAN con capacidad de 900 kilos /día cada uno, con todos los accesorios para su operación. Los puntos de dosificación de cloro son dos, el canal de aproximación a la canaleta Parshall<sup>36</sup> y en la cámara de cloración en el tanque de aguas claras.

**Polímeros.** Se usan los siguientes: CYTEC 579 como ayudante de coagulación y EXRO 621, ayudante de floculación. CYTEC 579 viene en presentación de cilindros de plástico, son almacenados en la bodega de sulfato de aluminio; el EXRO 621 se encuentra en sacos de 25 kilos para prepararse a determinada concentración.

Para la dosificación de estas sustancias la Planta ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Certificado de aprobación del uso de ayudantes de coagulación o floculación por parte de la NSF (National Foundation Sanitation).
- Certificado de calidad y ficha de seguridad por parte de la compañía que suministra el producto.

#### 4. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA<sup>5</sup>

**Generalidades de los mezcladores:** El objetivo de estas unidades en el proceso de coagulación es la obtención de las condiciones de gradiente de velocidad y tiempo de retención para producir una mezcla homogénea del coagulante con la masa de agua y lograr la máxima desestabilización de las partículas.

Las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de energía utilizada para producir la agitación: mecánica e hidráulica

**Evaluación:** La eficiencia del proceso de mezcla rápida depende de lo siguiente:

- Variables químicas relacionadas con el tipo y la dosis de coagulantes, así como de su concentración, y con características de las aguas.
- Variables físicas, tales como el tiempo e intensidad de la mezcla provocada por la energía disipada, ya sea por medios mecánicos o hidráulicos.

Se detalla una metodología simplificada para obtener los parámetros reales de mezcla existentes en la planta. Para determinar el comportamiento de las unidades de mezcla rápida, se recomienda efectuar los siguientes ensayos:

- Geometría de la unidad;
- Punto de aplicación de las sustancias químicas;
- Determinación del tiempo de mezcla;
- Determinación de la intensidad de la mezcla;
- Condiciones hidráulicas de las obras de interconexión.

---

<sup>5</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

A continuación se detalla cada una de las pruebas enunciadas.

#### **4.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD Y PUNTO DE APLICACIÓN DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS**

Consiste en determinar si la unidad fue correctamente proyectada. Al comprobar la geometría de la unidad en un mezclador tipo rampa, como el que se puede apreciar en la figura 8, debemos observar que el resalto se produzca al pie de la rampa y que el coagulante se esté distribuyendo uniformemente a todo lo ancho del resalto, exactamente en el punto en que este se inicia.

**Figura 8: Mezclador tipo rampa operando correctamente. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 9: Mezclador hidráulico operando correctamente. (Fuente CEPIS/OPS)**

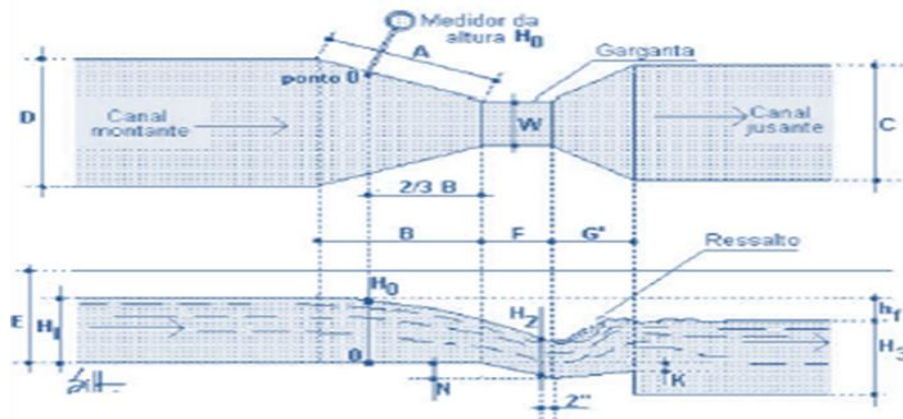


En el mezclador de la figura 9 se puede observar que el funcionamiento es correcto. El resalto es estable y el coagulante se distribuye de manera uniforme a todo lo ancho de la zona en turbulencia, lo que asegura una mezcla homogénea e instantánea del coagulante con la masa de agua.

La canaleta parshall se utiliza en plantas de tratamiento para dos fines, como aforador (o medidor de caudal) y como unidad de mezcla rápida (punto de

aplicación en el resalto hidráulico), para lo cual se debe garantizar que la canaleta como tal, obedezca a un diseño orientado por los parámetros establecidos para ser parshall, para lograr funcionalidad y confiabilidad.

**Figura 10: Planta y corte una canaleta parshall.**



Para que la canaleta parshall sirva como mezclador debe cumplir:

**Cuadro 2: Parámetros de la canaleta parshall.**

W	$H_f \geq$	Máxima sumergencia ( $H_0/H_2$ ) $\leq$
3'- 9"	0.4 $H_0$	0.6
1'- 8'	0.3 $H_0$	0.7
10'- 50'	0.2 $H_0$	0.8

- Trabajar con descarga libre.
- Que la relación  $H_0/W$  este entre 0.4 – 0.8 para que la turbulencia sea total.

- Que Numero de Froude este entre 1.7-2.5 ó 4.5-9.0. Valores entre 2.5-4.5 produce un resalto inestable, (no permanece en una sola posición).

## 4.2 EVALUACIÓN DEL TIEMPO REAL DE RETENCIÓN

**Objetivo:** Determinar el tiempo real de retención de la unidad de mezcla rápida.

### Procedimiento

- El tiempo real de retención puede determinarse por medio del ensayo con trazadores. Corresponde al tiempo de presentación de la máxima concentración del trazador.
- También se puede determinar obteniendo el volumen del resalto y el caudal real que está ingresando en ese momento a la planta. La relación de volumen (V) sobre caudal (Q) nos dará el tiempo de retención de la mezcla.

**Interpretación de los resultados:** El tiempo de mezcla debe tener relación con el tipo de proceso de coagulación que se desarrolla; así, si se produce coagulación por absorción, el tiempo de mezcla debe ser inferior a un segundo, pero si se produce coagulación de barrido, puede variar desde menos de uno hasta cerca de 7 segundos.

## 4.3 ENSAYO DE TRAZADORES

En plantas de tratamiento su uso ha sido limitado, pero muy útil para determinar la distribución del flujo en unidades y evaluar las condiciones hidráulicas.

En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención (tiempo que dura el agua en el tanque o unidad) y sus principales características:

Tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores.

También tienen aplicación los ensayos de trazadores para la medición de caudal.

Para determinar el tiempo real de retención en la unidad de mezcla rápida, se debe llevar a cabo un ensayo de trazadores, el cual consiste en aplicar una sustancia trazadora (en forma continua o instantánea) como el ion cloruro (sal de cocina) para determinar el comportamiento del trazador a través del tiempo en dicha unidad. Para de esta forma obtener una gráfica de tiempo vs concentración del trazador, en la que se debe identificar el punto de mayor concentración el cual representa el tiempo que toma al trazador salir de dicha unidad (tiempo de retención).

### **Sustancias trazadoras**

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- a) Colorantes como fluoresceína o rodamina.
- b) Iones como cloruros, de sodio o potasio, fluoruros o nitratos de sodio.(sal común)
- c) Elementos radiactivos como isótopos

Estas sustancias tienen en común que no reaccionan con el agua generando compuestos nocivos y en concentraciones bajas no presentan problemas para la salud humana, como tampoco para su uso cotidiano en labores y tareas que se realizan normalmente en los hogares y la industria.

## **4.4 EVALUACIÓN DE LA INTENSIDAD DE MEZCLA**

La intensidad de mezcla es un parámetro decisivo en la floculación ya que el grado de agitación en dicha unidad tiene directa relación con la eficiencia del proceso, si este no se encuentra entre los parámetros establecidos se estará afectando la meta de potabilización, se determina con la formulación del gradiente de velocidad la cual depende del si la unidad es hidráulica o mecánica. Para hallar el parámetro se debe determinar la pérdida de carga en la unidad, el tiempo

de retención, la temperatura del agua, así como las características geométricas del rotor, el radio de giro en el caso de un mezclador mecánico.

**Objetivo:** Determinar el gradiente de velocidad de la unidad de mezcla rápida.

**Procedimiento:** Si la unidad es de tipo hidráulico, se requiere determinar:

- Directamente la pérdida de carga (H).
- El tiempo de retención ( $T_r$ ), mediante trazadores o determinando el volumen del resalto (V) y el caudal de operación (Q).
- La temperatura del agua.

Para mezcladores mecánicos:

- La velocidad de giro del agitador  $N$ , midiéndola directamente en el eje del agitador, por medio de un tacómetro.
- Las características geométricas del rotor: área (A) y radio de giro (R) de las paletas, así como el volumen del reactor (V). Con estos datos, se puede calcular el gradiente real de velocidad.

### **Interpretación de los resultados**

Estudios realizados indican que la tasa de aglomeración máxima en un reactor depende del rango de gradiente de velocidad y el tiempo de retención en el que está operando; existe un rango óptimo para cada tipo de unidad (cuadro 3).

**Cuadro 3: Gradientes óptimos de mezcla.**

Unidad de mezcla	Valores de $G$ ( $s^{-1}$ )
Retromezclador	800 – 1,000
Salto hidráulico	$\approx$ 1,000
Difusores	800 – 1,000
Mezcladores en línea	3,000 – 5,000

#### **4.5 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS EN LAS INTERCONEXIONES**

**Objetivo:** Determinar las condiciones hidráulicas existentes en las estructuras de interconexión entre las unidades de mezcla rápida y los floculadores.

**Procedimiento:** Medir el caudal, los tiempos reales de retención, así como la pérdida de carga, y con ellos determinar el gradiente de velocidad.

**Interpretación de los resultados:** Aparentemente, los gradientes de velocidad adecuados en las estructuras de interconexión entre unidades de mezcla rápida y floculación no deben exceder de 100  $s^{-1}$ . Valores superiores pueden ser perjudiciales.

## 5. EVALUACIÓN DE FLOCULADORES<sup>6</sup>

### Generalidades de los floculadores

La floculación se lleva a cabo en la unidad de mezcla lenta la finalidad del proceso de floculación es ayudar al crecimiento del flóculo, mediante condiciones óptimas de velocidad y tiempo, para dar origen a un flóculo con un tamaño y densidad tal que permita una adecuada sedimentación.

Los parámetros operacionales del proceso son el gradiente de velocidad (G) y el tiempo de retención (T). Los valores de estos parámetros, son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. A través de investigaciones efectuadas, se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para floculación varía entre 20 y 75 s<sup>-1</sup> y el de tiempos de retención entre 10 y 30 min, dependiendo de la calidad del agua.

Los floculadores se clasifican en función del origen de energía para generar el gradiente como floculadores mecánicos y floculadores hidráulicos,

La compartimentalización en los floculadores es necesaria para garantizar los tiempos de retención en cada tramo del mismo y de igual forma los gradientes de velocidad a medida que el número de compartimientos aumenta se presentarán menos cortocircuitos y zonas muertas que afecten estos parámetros, por lo tanto debemos garantizar la permanencia en su sitio (adecuado anclaje) y la resistencia de dichas pantallas.

### Evaluación

La unidad de floculación tiene la función de formar el flóculo, que debe reunir ciertas características (peso, tamaño y compacidad) y para lograrlo, esta unidad

---

<sup>6</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006.

debe trabajar bajo determinados parámetros que están en función de la calidad del agua que trata.

Se detallan los ensayos que es preciso llevar a cabo para evaluar las características del proceso de floculación.

- Geometría de la unidad.
- Caudal de operación.
- Parámetros óptimos de floculación: gradientes de velocidad y tiempos de retención.
- Características hidráulicas de la unidad: tipo de flujo, espacios muertos y cortocircuitos.
- Tiempo de formación del flóculo.
- Tamaño del flóculo producido.

### **5.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD**

Consiste en determinar si la unidad fue correctamente proyectada y construida y si se encuentra en buen estado de mantenimiento.

### **5.2 EVALUACIÓN DE UNIDADES HIDRÁULICAS - UNIDAD DE PANTALLAS DE FLUJO HORIZONTAL**

Debemos determinar si:

- Todas las pantallas se cruzan.
- El espaciamiento entre pantallas es uniforme en cada tramo de la unidad.
- El ancho de las vueltas es uniforme e igual a 1, 5 el espaciamiento de las pantallas.
- La profundidad inicial y final de la unidad son iguales.

### 5.3 EVALUACIÓN DE UNIDADES DE PANTALLAS DE FLUJO VERTICAL

Determinar si:

- Las pantallas están completas y bien ubicadas.
- La unión entre la pantalla y la pared es estanca.
- Las pantallas se cruzan en todos los tramos.
- Las pantallas son estructuralmente adecuadas.

La figura 11 muestra un floculador de flujo vertical, con las pantallas desorganizadas y largos tramos de la unidad sin pantallas. En casos como este, pareciera que el objetivo de la unidad es pulverizar el flóculo. Ante descuidos como este, no hay tecnología que funcione.

**Figura 11: Defectos de operación y mantenimiento (Fuente CEPIS/OPS)**



#### **Modelos de flujo**

En las unidades de tratamiento de una planta, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser de dos tipos: discontinuo o intermitente: es el menos habitual y consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, y continuo: Este tipo de flujo es el habitual en las plantas de tratamiento de agua. Teniendo en cuenta esta característica, los reactores pueden ser de flujo de pistón, mezclado y no ideal.

- a) **Flujo de pistón:** Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad.
  
- b) **Flujo mezclado:** Un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características; es un flujo ideal.
  
- c) **Flujo no ideal:** Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento.

#### **5.4 EVALUACIÓN DEL CAUDAL DE OPERACIÓN**

Para todos los cálculos que se van a efectuar, se requiere conocer el caudal de operación de la unidad. Cuando hay una sola unidad, el caudal de operación será igual al caudal de operación de toda la planta, pero cuando se tienen varias unidades operando en paralelo, será necesario efectuar una prueba de distribución de caudales aplicando trazadores.

#### **Parámetros óptimos del proceso**

Los parámetros óptimos (gradiente de velocidad y tiempo de retención) se determinan en el laboratorio con el agua que ingresa a la planta.

### **Tiempo de retención real y características hidráulicas de la unidad**

La determinación del tiempo real de retención se efectúa mediante la aplicación de trazadores.

### **Intensidad de floculación**

El procedimiento para determinar la intensidad de la floculación o gradiente de velocidad depende del tipo de unidad. A continuación se especifica un procedimiento para determinar el gradiente de velocidad en un floculador hidráulico y otro para efectuar la misma determinación en una unidad mecánica.

## **5.5 EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN HIDRÁULICA<sup>7</sup>**

**Propósito:** La finalidad de esta prueba es determinar el gradiente de velocidad con que trabaja cada tramo del floculador.

**Materiales:** Cinta métrica y un teodolito o nivel.

### **Procedimiento**

1. Determinar la pérdida de carga (H) en cada tramo nivelando la superficie del agua.
2. Determinar la temperatura del agua
3. Aplicar trazadores y determinar el tiempo de retención real en la unidad.

---

<sup>7</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

## 5.6 EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN MECÁNICA

**Propósito:** Determinar el gradiente de velocidad con que está operando cada una de las cámaras de la unidad.

**Materiales:** Una cinta métrica y un tacómetro

### Procedimiento

1. Con una cinta métrica, tomar las dimensiones de las paletas: largo, ancho y el radio de giro respecto del eje.
2. Tomar las dimensiones de las cámaras y determinar el volumen (V) de cada cámara de la unidad.
3. Determinar el gradiente de velocidad,

## 5.7 EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE FORMACIÓN INICIAL DEL FLÓCULO

**Propósito:** Este ensayo tiene como finalidad determinar el tiempo que demora el flóculo en empezar a formarse.

**Materiales:** Para la determinación de este ensayo, se requieren de 6 a 10 vasos de vidrio de un litro de capacidad.

### Procedimiento

1. Partiendo del inicio de la unidad, tomar muestras en el punto medio de cada tramo o cámara, a una profundidad de 50 centímetros aproximadamente.
2. Cada muestra que se extrae se va observando a contraluz. El ensayo concluye en el momento en que se empiezan a observar los primeros indicios de formación de los flóculos.
3. Se determina el volumen (V) comprendido entre el inicio de la unidad y el punto en que se detectaron los primeros flóculos en formación. El tiempo de formación del flóculo será:

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

### **Interpretación de los resultados**

Esta interpretación se realiza comparando el tiempo de formación obtenido en la planta ( $T_p$ ) con el tiempo de formación determinado en el laboratorio ( $T_L$ ). El tiempo de formación ( $T_L$ ) se determina durante el ensayo de sedimentación en el laboratorio.

Cuando esta relación es aproximadamente igual a la unidad, el flóculo se está formando en el periodo de tiempo correcto. A medida que este valor se aleja más de la unidad, el proceso se hace más ineficiente y el flóculo puede terminar de formarse dentro de la unidad de sedimentación.

## **5.8 EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DEL FLÓCULO PRODUCIDO**

**Propósito:** Determinar el tamaño del flóculo formado en la unidad de floculación.

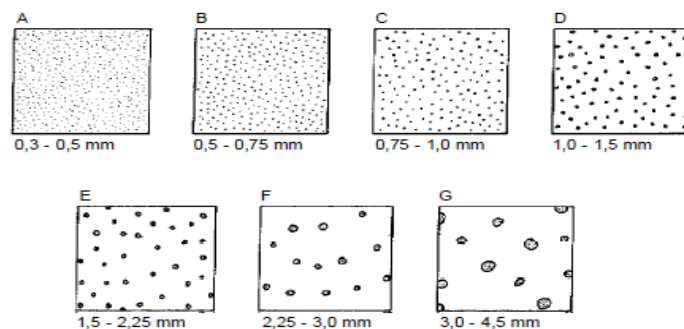
**Materiales:** Dos vasos de vidrio de un litro de capacidad y el cuadro 3 del índice de floculación de Willcomb o la figura de comparación para estimar el tamaño del flóculo producido (figura 12)

### **Procedimiento**

1. Tomar con los vasos de vidrio dos muestras a la salida de la unidad. Se toman dos muestras con la finalidad de promediar o comprobar los resultados.
2. Determinar el tamaño del flóculo producido, por comparación con la figura 12 y el cuadro 4. Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador. Sin embargo, la velocidad con la que apreciamos caer el flóculo nos da un buen criterio sobre su calidad (tamaño, peso y consistencia).

**Interpretación del resultado:** El resultado obtenido se compara con el tamaño del floculo determinado durante la etapa de floculación preliminar del ensayo de sedimentación en prueba de jarras.

**Figura 12: Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación según la Water Research Association. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Cuadro 4: Índice de floculación de Willcomb. (Fuente CEPIS/OPS)**

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero no uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita totalmente, dejando el agua cristalina.

## 5.9 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA MEZCLA RAPIDA Y FLOCULACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA<sup>8</sup>

La presente evaluación se tomo de OPTIMIZACIÓN DEL PRETRATAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA LA PTAP DE BOSCONIA DE LA CAMB, realizado por **OSCAR ORLANDO**

<sup>8</sup> MENDOZA J. Oscar Y GALVIS B. Mónica. En: optimización del pretratamiento e implementación de dosificación de sulfato de aluminio líquido para la PTAP de Bosconia de la CAMB. 2004

**MENDOZA JAIMES Y MÓNICA DEL PILAR GALVIS BELTRÁN** como trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil en el año 2004.

## **COAGULACIÓN.**

Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

**QUÍMICOS:** DOSIFICACIÓN

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS:** PH, TURBIEDAD, COLOR, ALCALINIDAD.

**VARIABLES FÍSICAS:** TIEMPO Y GRADIENTE DE VELOCIDAD.

### **Dosificación de sustancias químicas.**

**Dosificación de Sulfato de Aluminio.** Se lleva a cabo por medio de un dispositivo electrónico llamado “Chemtrac”, es un controlador de flujo que registra los porcentajes de salida del mismo.

Para saber el grado de exactitud de los dosificadores, se hicieron una serie de aforos tomando como dato teórico el caudal dado por el aparato y el caudal real que llega a la flauta; estos registros se hicieron para una concentración del 10% manteniendo constante la agitación en la tolva, este procedimiento se hizo tres veces y se promediaron los resultados, en el anexo 20 se encuentran los resultados de esta prueba.

**Dosificación de cal.** Se llevó a cabo en los extintores de cal DEGREMONT; la metodología empleada es la misma que la anterior hacer tres aforos por cada escala y promediarlos

**Dosificación de polímero.** Para la aplicación de polímero se utiliza una bomba marca Prominent, calibrada según la escala de la misma. La dosificación se hace de acuerdo a la relación entre sulfato de aluminio y ayudante de coagulación, es decir que la dosis de sulfato de aluminio representa el 70% y el restante es de

polímero. En planta es suministrado después del sulfato de aluminio por medio de un tubo perforado para garantizar una distribución homogénea en el agua.

**Mezcla Rápida.** La evaluación se llevó a cabo en dos etapas, la primera teniendo en cuenta la eficiencia del proceso en función de las características del agua, de la dosis de coagulante, intensidad de la mezcla y el tiempo del mismo; la segunda etapa se desarrolló mediante un estudio de la canaleta Parshall como medidor de caudal.

**Eficiencia de la mezcla rápida.** El objetivo es determinar la eficiencia del proceso mediante una prueba en planta y en el laboratorio con el equipo de jarras. El procedimiento efectuado fue:

1. En el laboratorio se determinó la dosis óptima y mezcla rápida óptima, usando condiciones ideales de floculación y sedimentación.
2. En la planta se tomó una muestra ya coagulada y se le hizo una prueba de jarras con iguales condiciones de floculación y sedimentación.

Con los datos de laboratorio se determina la eficiencia

$$I_1 = 1/T_{\text{final}} - 1/T_{\text{inicial}}$$

Donde  $T_{\text{final}}$  es la turbiedad final y  $T_{\text{inicial}}$  es la turbiedad inicial del agua.

$$E = I_2/I_1 * 100$$

Para diferentes turbiedades del agua cruda los resultados fueron:

**Cuadro 5:** Eficiencia del proceso de acuerdo a la turbiedad del agua cruda

<b>TURBIEDAD AGUA CRUDA (UNT)</b>	<b>I (%)</b>
120	40
23	49.34
250	70.4

De acuerdo al criterio la eficiencia del proceso según el manual de evaluación de plantas de tratamiento del programa regional HPE/ OPS/ CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, la eficiencia en general del proceso es regular.

**Intensidad de la mezcla.** La intensidad de la mezcla rápida se mide por el gradiente de velocidad.; según la norma RAS 2000 este valor debe ser mayor a 1000 s-1 que para su determinación fue necesario encontrar las pérdidas de carga de la unidad.

Para evaluar las pérdidas de carga el procedimiento seguido fue:

1. Se midió el nivel piezométrico en la canaleta Parshall más exactamente en el pozo de medición al lado de la misma (Ho)...ver figura 13...
2. Se midió la diferencia de nivel entre la cresta y la salida de la canaleta (K).
3. Se midió el nivel del agua en la salida de la canaleta (H3).
4. Repetir este procedimiento para diferentes caudales.

El gradiente de velocidad está dado por la siguiente expresión:

$$G = (hf \cdot \delta / \mu \cdot Tr)^{1/2}$$

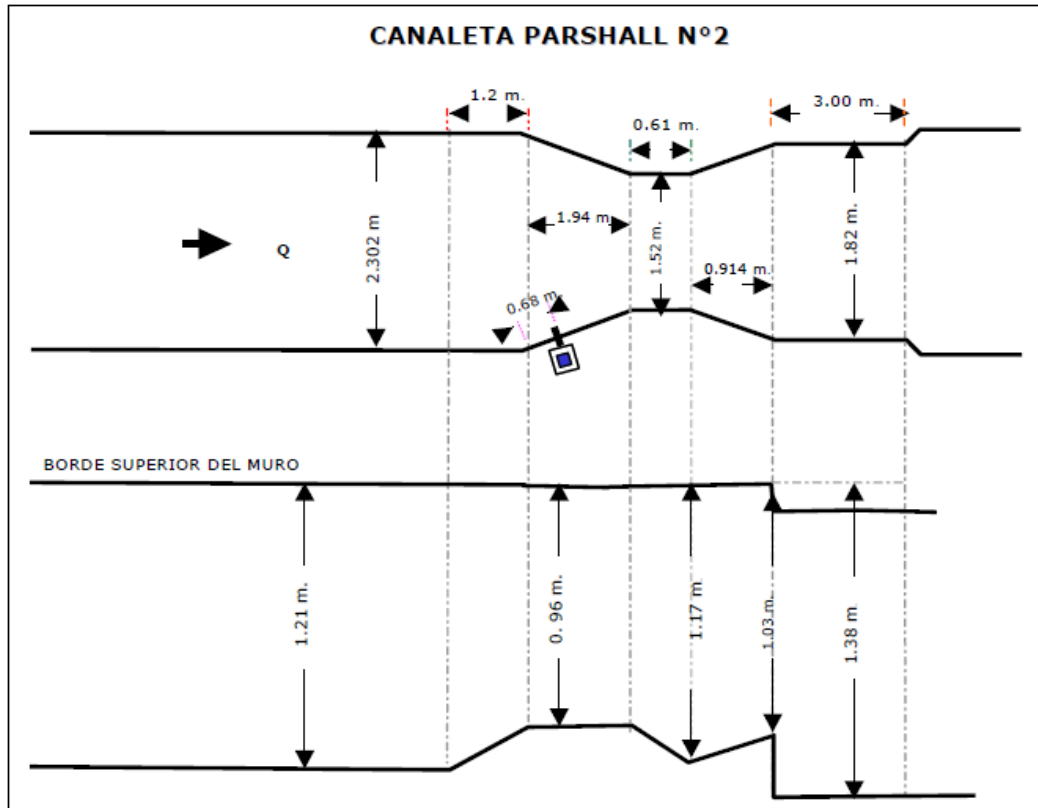
hf = pérdidas de carga (m).

To = tiempo de retención de la mezcla en segundos.

$\mu = 1.009 \times 10^{-4} \text{ Kg-f-Seg/m}^2$  para una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

$\delta = 998.23 \text{ kg-f/m}^3$  para una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

**Figura 13:** Planta y perfil de la canaleta Parshall No. 2.



El tiempo de retención de la mezcla empleado para determinar el gradiente de velocidad, fue hallado teóricamente para cada uno de los caudales estudiados, en la cuadro 5 se muestran para diferentes caudales el gradiente de velocidad.

**Calibración de la canaleta Parshall.** Por medio de un aforo se estableció la ecuación de calibración de la canaleta.

**Cuadro 6:** Gradiente de velocidad de la mezcal rápida.

Q m <sup>3</sup> /s	H <sub>a</sub> m	K m	H <sub>3</sub> m	V <sub>a</sub> <sup>2</sup> /2g m	V <sub>3</sub> <sup>2</sup> /2g m	H <sub>f</sub> m	G S <sup>-1</sup>
1.300	0.600	0.076	0.527	0.057	0.093	0.114	787.566
1.216	0.590	0.076	0.507	0.052	0.088	0.123	793.270
1.097	0.530	0.076	0.427	0.052	0.101	0.131	776.125
0.878	0.450	0.076	0.387	0.046	0.078	0.107	628.306
0.675	0.370	0.076	0.342	0.041	0.059	0.085	491.703
0.533	0.320	0.076	0.287	0.034	0.053	0.090	449.655
0.454	0.26	0.076	0.257	0.037	0.048	0.069	361.881

El aforo se hizo de acuerdo a la Guía de laboratorio de hidráulica de canales abiertos 37; y que se resume a continuación:

1. Se efectuaron las mediciones de las dimensiones del canal de aproximación para elegir los puntos en los cuales se tomarían las mediciones con molinete, en este caso fueron 5.
2. Se esperó hasta que el flujo se estabilizara.
3. En los puntos ya establecidos se midió el nivel del agua, para dividir la sección transversal en un número determinado de verticales, para niveles mayores a 60 cm, se tomaron velocidades a 20cm y 80cm de la profundidad; si el nivel era menor a 60 cm, entonces la velocidad media se estableció midiendo la velocidad a 60 cm de la profundidad.

En este caso las profundidades fueron menores a 60 cm, se escogieron dos verticales por cada punto para tener menores errores en el cálculo del caudal.

4. Se tomó la altura de la lámina de agua y se sumergió el molinete verticalmente de manera que la hélice quedara enfrentada al flujo y a la profundidad determinada anteriormente desde el fondo del canal hasta el eje horizontal de ésta.

5. Se puso en ceros el contador del molinete y el cronómetro. Después de 50 segundos se tomó la lectura del contador del instrumento.
6. Se modificó la altura del eje del molinete respecto al fondo del canal y se tomó la lectura.
7. Se repitió los pasos 4, 5, 6 y 7 para los puntos restantes de medición.

En el siguiente cuadro (cuadro 7) se resume los datos obtenidos de este ensayo.

**Cuadro 7:** datos del ensayo

<b>Q L/S</b>	<b>H<sub>a</sub> cm</b>
1718	61.5
1479	56
1374	53
869	40
751	37
740	36
616	32
423	26

La ecuación que relaciona la cabeza aguas arriba y el flujo Q para varios tamaños de canaleta Parshall tiene la forma:

$$Q = k * H^n$$

Para la determinación de los coeficientes k y n se utilizó la regresión lineal con los valores de caudal y altura piezométrica.

$$\text{Log } Q = \text{Log } k + n * \text{Log } H$$

$$Y = k + n * X$$

La ecuación para la canaleta Parshall No. 2 es:

$$\mathbf{Q = 2.23776 * H^{1.61483}}$$

Tiene una correlación de 0.99954, lo que la hace satisfactoria para su empleo.

De acuerdo al aforo hecho con molinete, se encontraron caudales inferiores con el molinete. Los valores medidos con el molinete difieren en menos del 5% de los medidos en la canaleta Parshall, errores esperados en este tipo de aforadores.

**Determinación de los gradientes de velocidad de los canales de interconexión con los floculadores 1 y 4.** Para ello es necesario hallar las pérdidas de carga en el canal, midiendo el nivel del agua en la entrada y la salida del canal.

$$h_f = h_1 - h_2$$

$$G = (h_f \cdot \delta / \mu \cdot T_r)^{1/2}$$

h<sub>1</sub>: nivel del agua al comienzo del canal.

h<sub>2</sub>: nivel del agua al final del canal.

T<sub>r</sub>: tiempo de retención según el ensayo de trazadores

**Cuadro 8:** Gradiente de velocidad, canal de conexión al floculador 1.

Canal 1		
h <sub>1</sub> (m)	h <sub>2</sub> (m)	G(s <sup>-1</sup> )
60	61	28

**Cuadro 9:** Gradiente de velocidad, canal de conexión al floculador 4.

Canal 4		
h <sub>1</sub> (m)	h <sub>2</sub> (m)	G(s <sup>-1</sup> )
60	64	57

## FLOCULACIÓN.

La evaluación de esta unidad se llevó a cabo teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Determinación de la intensidad de floculación.

2. La eficiencia comparativa del proceso.
3. Determinación de las condiciones hidráulicas de los floculadores.
4. Control del proceso de floculación.

**Determinación de la intensidad de floculación.** La intensidad se mide por medio de los gradientes de velocidad de cada una de las cámaras del floculador. Para lo anterior se utiliza la siguiente expresión:

$$G = K(N^3 \cdot \Sigma Ar^3 / \mu \cdot V)^{1/2}$$

Donde:

K: factor de forma de los floculadores (90).

N: número de vueltas por segundo.

$\mu$  : viscosidad dinámica del agua  $0.984 \times 10^{-4}$  Kg-f-m/S/m<sup>3</sup>.

V: volumen de la unidad (176.4 m<sup>3</sup>).

$\Sigma Ar^3$ : 69.023 m<sup>5</sup>

**Eficiencia comparativa del proceso.** En laboratorio se estudian las condiciones ideales para el proceso de floculación, para tal fin se determina dosis optima de coagulante, gradiente optimo y el tiempo de retención.

**Cuadro 10:** Gradientes de velocidad de los floculadores.

FLOCULADOR 1		FLOCULADOR 2		FLOCULADOR 3		FLOCULADOR 4	
CÁMARA No.	G S <sup>-1</sup>	CÁMARA No.	G S <sup>-1</sup>	CÁMARA No.	G S <sup>-1</sup>	CÁMARA No.	G S <sup>-1</sup>
1	40.39	1	40.39	1	50.61	1	40.39
2	28.03	2	28.03	2	28.03	2	29.49
3	38.77	3	28.03	3	28.03	3	30.98
4	21.10	4	32.49	4	19.80	4	28.03

**Cuadro 11:** Revoluciones por minuto de cada compartimiento de los floculadores.

FLOCULADOR 1		FLOCULADOR 2		FLOCULADOR 3		FLOCULADOR 4	
CÁMARA No.	rpm	CÁMARA No.	rpm	CÁMARA No.	rpm	CÁMARA No.	rpm
1	2.22	1	2.22	1	2.60	1	2.22
2	1.76	2	1.76	2	1.76	2	1.81
3	2.14	3	1.76	3	1.76	3	1.87
4	1.42	4	1.93	4	1.42	4	1.76

Por medio de mínimos cuadrados se determina la ecuación de la recta y el gradiente de velocidad necesario para flocular 24 minutos (tiempo de retención ideal de los floculadores), se hace una prueba de jarras utilizando el gradiente anterior, floculando por 24 minutos y sedimentando 10 m, terminado este tiempo se toman las turbiedades correspondientes y se promedian a este valor (TI).

En la planta, se sacan 3 muestras de agua (2 litros) al final del floculador y se deja sedimentar 10 minutos, se toman las turbiedades respectivas y se promedian (Tp)

$$E = TI/Tp * 100$$

**Cuadro 12:** Eficiencia de la floculación según la calidad del agua cruda.

TURBIEDAD AGUA CRUDA (UNT)	I (%)
120	30.6
23	25.92
250	55.35

Determinación de las condiciones hidráulicas de los floculadores. Se hizo mediante el ensayo con trazadores, determinando primero el caudal real de cada unidad; el procedimiento fue el siguiente:

- Se calculó la cantidad de sal común de acuerdo a los volúmenes de agua y determinar la conductividad inicial del agua.
- Se agregó la sal en el canal de mezcla de aproximación, allí se toma el tiempo igual a cero y se empieza a muestrear ha períodos de tiempo predeterminados hasta que la conductividad del agua sea igual a la inicial (antes de agregar sal).
- La suma total del trazador de cada uno de los reactores será el 100% de caudal que ingresa a la planta; determinar cada uno de los porcentajes de caudal que pasaron por cada unidad.

**Cuadro 13:** El caudal de trabajo de la planta fue de 850 L/s y el caudal de cada unidad

FLOCULADOR NO	CAUDAL DE TRABAJO(L/S)	TIEMPO DE RETENCIÓN(MIN)
1	225.630	52.12
2	222.887	52.76
3	240.235	48.95
4	161.247	72.93

Para determinar y caracterizar los flujos, evaluar la eficiencia hidráulica de los Floculadores y encontrar el tiempo real de retención se tomaron muestras a la salida de los mismos inicialmente cada minuto y al finalizar cada 5 minutos. Los análisis de flujos se hicieron de acuerdo a la referencia bibliográfica.

**Análisis por el método Wolf-Resnick.** Los datos de las columnas (3) y (8) del anexo G son graficados en papel semilogarítmico dando como resultado la curva de cantidad de trazador que permanece en el floculador ( $1-F(t)$ ); a la cual se traza una línea tangente en la parte superior, haciendo el examen se obtiene:

**Cuadro 14:** Análisis de flujos Método Wolf-Resnick

FLOC No.	$\theta$	$t/t_0$	$t_2/t_0$	$\text{Tan}(\theta)$	P(%) Flujo pistón	m(%) Espacios muertos	M Flujo Mezclado
1	0.43	0.43	1.55	0.892	46.8	8.11	53.11
2	0.5	0.5	1.10	1.666	65.7	23.8	34.2
3	0.41	0.41	1.1	1.449	57.7	28.9	42.2
4	0.25	0.25	1.12	1.149	39.7	37	60.3

**Análisis por el método convencional.** Con los datos de las columnas (2) y (5), del mismo anexo mencionado anteriormente se realiza la curva de concentración de trazador con respecto al tiempo de acuerdo a este se determinan los siguientes valores:

- $t_1$  = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- $t_{10}$  = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total de trazador.
- $t_c$  = tiempo correspondiente al paso del 50% de la máxima concentración de trazador.
- $t_b$  = tiempo correspondiente al paso del 10% de la máxima concentración de trazador.
- $t_p$  = tiempo modal, corresponde a la concentración máxima de trazador.
- $t_m$  = tiempo mediano, es equivalente al paso del 50% de la cantidad total de trazador.
- $t_0$  = es el tiempo medio o teórico de retención.
- $t_{90}$  = tiempo equivalente al paso del 90% de la cantidad total de trazador.
- $t_f$  = tiempo transcurrido en atravesar la totalidad del trazador.

A los valores anteriores se les resta el tiempo de retención de la mezcla rápida a la entrada de cada uno de los floculadores y el tiempo de retención de los canales de

aproximación a los floculadores 1 y 4. Para los floculadores 1 y 4 es 2.25 y 2.30 minutos respectivamente; floculadores 2 y 3 es 55 y 60 segundos.

Según se puede observar, la información de la floculación analizada y estudiada se detalla en las tablas 14, 15, 16 y 17 que se muestran a continuación:

**Cuadro 15** : Análisis por el Método Convencional Floculador 2

CRITERIO	CONSECUENCIA
$T_1/t_0 = 0.1412$	Flujo Mezclado, existencia de cortocircuitos.
$t_m/t_0 = 0.6411$ $t_p/t_0 = 0.709$	Existencia de espacios muertos. Predominio de Flujo Pistón en relación al Flujo Mezclado.
$t_c/t_0 = 0.824$ $t_b/t_0 = 1.915$	Existencia de Flujo Mezclado. Por debajo del valor correspondiente a la mezcla completa .
$C = \frac{(t-t_0)-(t_0-t_1)}{t_0}$ $C = 0.227$	Indica el predominio del flujo pistón.

**Cuadro 16** : Análisis por el Método Convencional Floculador 3.

CRITERIO	CONSECUENCIA
$T_1/t_0 = 0.0817$	Flujo Mezclado, existencia de cortocircuitos.
$t_m/t_0 = 0.587$ $t_p/t_0 = 0.735$	Presencia de espacios muertos o cortocircuitos. Relación entre Flujo Pistón y flujo Mezclado.
$t_c/t_0 = 1.033$ $t_b/t_0 = 1.279$ $C = \frac{(t-t_0)-(t_0-t_1)}{t_0}$ $C = 0.224$	No existe difusión debido a turbulencias. Por debajo del valor de la mezcla completa ideal. Indica el predominio del Flujo Pistón.

**Cuadro 17:** Análisis por el Método Convencional Floculador 4.

CRITERIO	CONSECUENCIA
$T_1/t_0 = 0.0781$ $t_m/t_0 = 0.585$ $t_a/t_0 = 1.065$	Flujo Mezclado, existencia de cortocircuitos. Existencia de espacios muertos o cortocircuitos.
$t_c/t_0 = 0.774$ $t_b/t_0 = 1.521$	Relación del Flujo Pistón respecto al Flujo Mezclado. Unidad con Flujo Mezclado ideal. Por debajo del valor de la mezcla completa ideal.
$C = \frac{(t_r - t_0) - (t_0 - t_1)}{t_0}$ $C = -0.0274$	Indica el predominio del flujo pistón.

Índice de Morril con las columnas (2) y (7) del anexo G, se hace la gráfica de tiempo y fracción de trazador que pasa, utilizando papel de probabilidades-logarítmico, obteniéndose los valores correspondientes a  $t_{90}$  y  $t_{10}$ .

**Cuadro 18:** Índice de Morril

FLOC NO				
1	60.75	13.75	4.41	Existencia de Flujo Mezclado y espacios muertos.
2	48.45	15.45	3.135	Existencia de Flujo Mezclado.
3	46	10	4.6	Existencia de Flujo Mezclado y espacios muertos.
4	97.7	24.7	3.955	Existencia de Flujo Mezclado y espacios muertos.

## 6. EVALUACIÓN DE DECANTADORES<sup>9</sup>

### Generalidades de los decantadores

Se entiende por decantación la sedimentación de partículas (floc), formadas por la aglomeración de partículas en suspensión que ganan peso aumentado su probabilidad de sedimentación. La decantación es el primer proceso de remoción física y, debido a su gran eficiencia, es el más significativo en la remoción de turbiedad y color pues la meta de decantación es menos de 2 UNT, para permitir al filtro operar eficientemente.

La eliminación de partículas mediante procesos de tratamiento de agua se puede monitorear y evaluar a través de diversos métodos, tales como el control de la turbiedad, el conteo de partículas y el análisis microscópico de partículas.

Los sedimentadores se clasifican según el tipo de flujo en:

**Sedimentadores estáticos:** Estos sedimentadores se clasifican, de acuerdo con la forma de su planta en rectangulares, circulares y cuadrados. Con la ventaja de que permiten una implantación más compacta, aunque su costo es más elevado. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros.

**Sedimentadores laminares:** Son unidades poco profundas, con una zona de decantación formada por una serie de módulos tubulares de sección circular, cuadrada, octogonal o hexagonal, o secciones de láminas paralelas, ya sean planas u onduladas, entre las cuales circula el agua con flujo laminar. Se clasifican de la siguiente forma:

---

<sup>9</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

Según el tipo de módulo. Pueden ser:

- Tubulares: cuadrados, circulares, rectangulares, etc.
- De placas: planos y corrugados.
- Otros: soluciones patentadas.

Según la dirección del flujo. Pueden ser:

- Horizontales.
- Inclínados: ascendente y descendente.

Se considera que tres son los efectos que favorecen la remoción de las partículas en este tipo de unidades:

- Aumento del área de sedimentación.
- Disminución de la altura de caída de la partícula.
- Régimen de flujo laminar.

**Evaluación:** Los factores más importantes que afectan la eficiencia remocional de una unidad de sedimentación y/o decantación son los siguientes:

- Las características del proceso.
- Las condiciones del flujo hidráulico.

Estos factores, a su vez, dependen de:

1. Las características fisicoquímicas de las aguas, especialmente turbiedad, color y temperatura.

2. Las características del pre-tratamiento: mezcla-floculación.
3. La configuración y diseño de las unidades y zonas de entrada, sedimentación, depósito de lodos y salida de agua decantada, los cuales dependen del tipo de unidad.
4. Las características de las obras de interconexión.
5. Operación y mantenimiento.

La evaluación de una unidad de sedimentación comprende:

- Eficiencia.
- Geometría de la unidad.
- Comportamiento del canal de distribución.
- Tiempo de retención.
- Características hidráulicas.
- Velocidad óptima de sedimentación.
- Carga superficial real.
- Características de las zonas de entrada y salida.

### **6.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN**

Entre los diferentes factores que influyen en la eficiencia de una unidad de sedimentación y/o decantación, se han seleccionado los siguientes parámetros como los más importantes:

- Calidad del agua sedimentada;
- Calidad del agua cruda;
- Carga superficial.

## 6.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEDIMENTADA

Los filtros rápidos mejoran apreciablemente su eficiencia al tratar aguas sedimentadas con bajas turbiedades, por lo que resulta crucial que los sedimentadores produzcan agua de la mejor calidad posible para asegurar la remoción de estos huevos de Giardia y Cryptosporidium, los filtros deben producir agua con menos de 0,1 UNT. Esto implica que los decantadores hayan entregado un efluente con una turbiedad menor o igual a 2 UNT. Por lo tanto se deben perfeccionar los diseños y optimizar la operación y mantenimiento para que los decantadores sean más eficientes.

**Objetivo:** Determinar, sobre la base de datos de operación de la planta, la calidad del agua producida en las unidades de sedimentación y/o decantación.

**Procedimiento:** Se agrupan los datos de turbiedad (o color) de agua sedimentada en rangos predeterminados y se calcula su frecuencia de presentación anual, con la cual se puede graficar la curva de frecuencia acumulativa.

**Comentarios:** Los decantadores se pueden clasificar con el siguiente criterio:

**Cuadro 19: Clasificación en función de la calidad del agua producida.  
(Fuente CEPIS/OPS).**

<b>Eficiencia</b>	<b>Turbiedad del agua decantada (UNT)</b>
Excelente	< 5
Muy buena	5 - 10
Buena	10 - 15
Regular	> 15

### 6.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA

La eficiencia del proceso de sedimentación depende sustancialmente de las características físicas, tanto de las aguas (temperatura) como de las partículas (turbiedad, color) y de su estado de presentación (coloidal, suspensión, tamaño y densidad). La eficiencia se incrementa en relación directa con el contenido de partículas en estado de suspensión hasta llegar usualmente a valores de 600 miligramos por litro, sobre los cuales disminuye por presentarse sedimentación interferida.

**Objetivo:** Determinar, a partir de datos de operación de la planta, la eficiencia de una unidad de sedimentación y/o decantación en función de la calidad del agua cruda.

**Procedimiento:**

Agrupar los datos de calidad del agua cruda (turbiedad o color) en rangos predeterminados y encontrar los datos de calidad correspondientes al agua sedimentada.

A partir de estos datos se calculan las constantes y el correspondiente grado de correlación para la ecuación siguiente:

$$y = a + bx$$

Donde:

y = turbiedad (o color) del agua cruda

x = turbiedad (o color) del agua sedimentada

Se grafica en papel logarítmico, aritmético.

Si se comparan estos datos con los resultados obtenidos en ensayos de sedimentación ideal a nivel de laboratorio, puede determinarse el grado de

eficiencia comparativa del proceso. Puede usarse el siguiente índice de comparación:

$$I = \frac{TL}{Tp} * 100$$

**Cuadro 20: Eficiencia comparativa. (Fuente CEPIS/OPS).**

Clasificación	Valor de I
Excelente	> 90
Muy buena	80 - 90
Buena	70 - 80
Regular	< 70

#### **6.4 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD**

La eficiencia de estas unidades es tan buena como lo sean sus estructuras de entrada y salida, por lo que básicamente son estos los puntos los que más atención deben recibir en la evaluación.

##### **Zona de entrada.**

A través de múltiples evaluaciones efectuadas, se ha encontrado que la mejor zona de entrada —esto es, la que evita la formación de cortocircuitos y con la cual se logra mayor porcentaje de flujo de pistón— es la que está constituida por la compuerta de aislamiento de la unidad, seguida de un vertedero a todo lo ancho de la unidad y la pantalla de distribución o cortina perforada, ubicada a una distancia mínima de 0,80 metros del vertedero, de modo de dar espacio suficiente para que las líneas de flujo se abran y distribuyan en toda la sección de la pantalla (ver figura 14).

Al evaluar una unidad de este tipo, debemos determinar si la estructura de entrada tiene la conformación adecuada para atenuar el flujo turbulento y distribuir de manera uniforme las líneas de flujo en toda la sección útil de la unidad. La figura 15 muestra el vórtice que se forma en la entrada de un decantador convencional, que tiene una sola compuerta de entrada y que, además, está trabajando sobrecargado. El caudal entra en forma de chorro por la compuerta y produce un fuerte cortocircuito. Esta unidad también es fuertemente azotada por el viento, que lleva el flujo en sentido contrario a la salida. La eficiencia es de apenas 16%.

**Figura 14: Ingreso con dos compuertas. (Fuente CEPIS/OPS)**



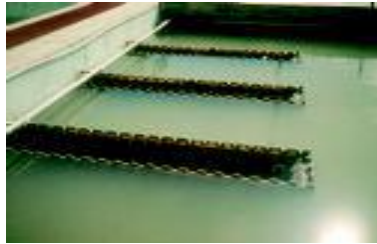
**Figura 15: Una sola compuerta de ingreso. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Zona de salida:** está conformada por vertederos o tuberías perforadas, que deben estar ubicados en el tercio final de la unidad. La longitud de los vertederos que la unidad debe tener depende de la calidad del flóculo y de la tasa de recolección de agua decantada, que varía entre 1,3 y 3,0 litros por segundo por metro de longitud de vertedero.

La figura 16 muestra una zona de salida que reúne los criterios expuestos y tiene un buen comportamiento. No se aprecia arrastre de flóculos hacia la salida, índice de que la velocidad de salida esta muy alta o de que la coagulación tiene problemas.

**Figura 16: Estructura de salida de un decantador convencional. (Fuente CEPIS/OPS)**



### **6.5 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS**

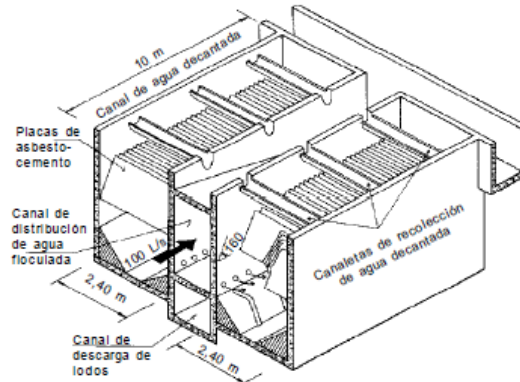
**Zona de sedimentación:** Hazen y Camp establecen como condiciones ideales tres principios básicos que se deben presentar en una unidad de sedimentación, los primeros de los cuales hacen referencia a las siguientes condiciones hidráulicas:

- Que la dirección de flujo sea horizontal y la velocidad sea la misma en todos los puntos de una sección vertical; y
- que la concentración de partículas de cada tamaño sea la misma en todos los puntos de una sección vertical al comienzo de la zona de sedimentación; estos conceptos conducen a la necesidad de obtener un flujo de pistón puro en las unidades de sedimentación y/o decantación.

Usualmente, en la práctica no se cumplen los criterios indicados y es necesario determinar las condiciones hidráulicas que se presentan en las unidades, para lo cual se sugieren los siguientes ensayos de caracterización de flujo:

- 1) Determinación del porcentaje de flujos de pistón y mezclado.
- 2) Determinación de espacios muertos y cortocircuitos.
- 3) Determinación del tiempo real de retención.
- 4) Determinación de líneas de flujo.
- 5) Carga superficial real.

**Figura 17: Decantador laminar de placas paralelas de última generación.  
(Fuente CEPIS/OPS)**



En la figura 17 el canal central intermedio es el canal de distribución uniforme del agua floculada por la parte inferior del módulo de decantación.

## 6.6 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE DECANTACIÓN

Constituida por módulos de decantación de las siguientes características:

- Pantallas planas paralelas, que pueden ser de asbesto-cemento, fibra de vidrio, plástico o lonas de vinilo reforzadas con fibras de poliéster.
- módulos prefabricados de sección cuadrangular, hexagonal o circular, hechos de plástico o de fibra de vidrio.

**Figura 18: Módulos de plástico deteriorados. (Fuente CEPIS/OPS)**



En todos los casos, los módulos deben estar instalados con una altura de agua sobre ellos, variable entre 0,65 y 1,0 metros. Alturas menores pueden ser causa de arrastre de flóculos previamente sedimentados, sobre todo en el caso de flóculos de color.

Los módulos prefabricados normalmente son de material muy delgado que fácilmente se quiebran al ser lavados con agua a presión. Cuando los módulos se rompen, el agua pasa por las aberturas que estos dejan, lo que produce un cortocircuito. La mayor parte del agua pasa por el forado que han dejado los módulos rotos y la eficiencia de la unidad se anula (ver figuras 18).

**Figura 19: Operador parado sobre las pantallas de asbesto-cemento. (Fuente CEPIS/OPS)**



Cuando el personal de operación camina sobre el módulo de placas mientras realiza el lavado con agua a presión, o cuando las sacan para ingresar a la tolva para extraer el lodo en forma manual, las placas se deterioran rápidamente (figura 19).

### **6.7 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE SALIDA**

La estructura de la zona de salida del decantador laminar debe abarcar toda el área de la unidad porque cada espacio entre placa y placa es un pequeño decantador, que debe tener encima su correspondiente zona de recolección del agua decantada. Cuando las líneas de flujo deben arquearse demasiado para

alcanzar la salida, se produce arrastre de flóculos previamente retenidos entre las placas.

La estructura de recolección del agua decantada puede estar constituida por canaletas o tubos perforados repartidos de manera uniforme en toda la superficie de la unidad. En el caso de unidades pequeñas, también pueden ser vertederos perimetrales.

El sistema de recolección debe estar instalado idealmente a una altura de un metro sobre el módulo de placas, pero se puede aceptar una altura mínima de 0,65 metros. Alturas menores pueden ser causa de arrastre de flóculos previamente sedimentados; sobre todo en el caso de flóculos de color.

En la figura 20 podemos observar el sistema completo en operación, con el canal central de la parte superior recolectando el aporte de las tuberías perforadas. Estas deben estar sumergidas y con una carga de agua de alrededor de 0,10 metros para aprovechar toda su capacidad. La unidad de la figura 21 tiene un sistema de recolección mediante canaletas con orificios que aportan al canal central.

Para determinar si el número de canaletas o tubos es adecuado, se debe:

- Contar cuántos tubos o canaletas tiene el decantador y medir la longitud.
- Calcular la tasa de recolección de agua decantada ( $q_a$ ), mediante la ecuación:

$$q_a = \frac{Q}{L}$$

- Comparar con el rango de tasas recomendadas de acuerdo con el tipo de flóculo.

**Figura 20: Sistema de recolección en funcionamiento. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 21: Sistema de recolección en mediante canaletas. (Fuente CEPIS/OPS)**



## **6.8 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA SEDIMENTACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA<sup>10</sup>**

La presente evaluación se tomó de OPTIMIZACIÓN DEL PRETRATAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA LA PTAP DE BOSCONIA DE LA CAMB, realizado por **OSCAR ORLANDO MENDOZA JAIMES Y MÓNICA DEL PILAR GALVIS BELTRÁN** como trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil en el año 2004.

### **SEDIMENTACIÓN.**

**Determinación de la eficiencia.** Se hace mediante la calidad del agua sedimentada. Los datos presentados en el anexo 9 corresponden a los cuatro sedimentadores de la planta agrupados en rangos de turbiedad predeterminados, encontrándose su frecuencia de presentación y el porcentaje de frecuencia acumulada.

Se observa (anexo K) que para un 98.56% del tiempo la turbiedad del sedimentador 1 es menor que 10 UNT, indicando un proceso muy bueno y excelente con un 91.5% para turbiedades inferiores a 5 UNT.

---

<sup>10</sup> **MENDOZA J. Oscar Y GALVIS B. Mónica.** En: optimización del pretratamiento e implementación de dosificación de sulfato de aluminio líquido para la PTAP de Bosconia de la CAMB. 2004

**En función de la calidad del agua cruda.** El grado de eficiencia de la sedimentación depende de la calidad del agua cruda (turbiedad, color, temperatura), es un factor importante, al respecto Camp considera que cuando la concentración volumétrica de sólidos excede en un 0.5% (5000 ppm) en volumen se presenta una disminución en la velocidad de asentamiento, produciéndose una sedimentación auto interferida, usualmente la eficiencia puede incrementarse hasta un contenido de 600 ppm, sobre los cuales disminuye por empezar a presentar este tipo de sedimentación.

En el anexo 31 se encuentran los datos de calidad de agua cruda en función de la turbiedad media del agua sedimentada, este valor se da como promedio de la turbiedad de los cuatro sedimentadores de la planta.

Analizando los datos de las columnas (3) y (4) de la tabla del anexo anteriormente mencionado, y aplicando mínimos cuadrados; la ecuación de eficiencia remocional de turbiedad será:

$$T_s = (\text{LOG}(\text{TAC}) - 1.522) / 0.315$$

Donde  $T_s$  es la turbiedad del agua sedimentada y TAC es la turbiedad del agua cruda.

Adicionalmente, de esta ecuación se puede concluir que para una turbiedad de 600 UNT se consigue una turbiedad sedimentada de 3.98 UNT, y para que la turbiedad del agua sedimentada sea 5 UNT, máximo valor de turbiedad permitido en aguas potables, el valor de la turbiedad del agua cruda es de 1250 UNT, lo que quiere decir que los sedimentadores funcionan eficientemente.

**En función del pretratamiento.** La velocidad de sedimentación de las partículas floculentas depende del tamaño, densidad y consistencia de estas por lo que se encuentra directamente relacionado con la dosis de coagulante utilizado, si se emplearon o no polielectrolitos, de la intensidad y tiempo de mezcla rápida y

floculación; esta evaluación tiene como objetivo determinar la influencia del pretratamiento(coagulación-floculación) en el proceso de sedimentación.

Procedimiento: reproducir en el equipo de jarras las condiciones óptimas de coagulación-floculación y en la sedimentación tomar muestras a intervalos conocidos de tiempo a una altura determinada (H); hallar con estos datos  $V_s = H/T_s$

En planta, tomar tres muestras(2 litros) a la salida de las unidades de floculación, dejar sedimentar y tomar muestras para análisis de turbiedad residual a igual profundidad e intervalos de tiempo que el ensayo anterior; hallar  $V_s = H/T_s$  .

Con los datos de la planta y el laboratorio se hace la figura de turbiedad remanente versus velocidad de sedimentación, obteniéndose la eficiencia teórica y real para el sedimentador de placas.

Para una carga superficial de 170 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día que corresponde a una velocidad de sedimentación de 0.01967 cm/s, el índice de eficiencia es:

$$I = \frac{I_r}{I_p} * 100 = 30.61\%$$

El índice de eficiencia encontrado indica que el proceso de coagulación floculación es deficiente.

**Determinación de las condiciones y las características hidráulicas.** Para la caracterización de flujo se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

Determinación de porcentaje de flujo pistón y flujo mezclado.

Determinación de espacios muertos y cortocircuitos.

Determinación de tiempo real de retención.

Determinación de las líneas de flujo.

Carga superficial real.

**Ensayo con trazadores.** Tiene como objetivo determinar y caracterizar los flujos, evaluar la eficiencia hidráulica del decantador y determinar el tiempo real de retención.

En el anexo N se encuentran los datos concernientes al ensayo con trazadores efectuado al sedimentador 1; a continuación se presenta el análisis de flujos de acuerdo a los tres métodos existentes.

**Método Wolf-Resnick.** Los datos de las columnas (3)  $t/t_0$  y (8)  $1-F(t)$ , se grafican en escala logarítmica-aritmética, obteniéndose la curva de cantidad de trazador que permanece en el sedimentador  $1-F(t)$ , además se tiene en cuenta el efecto del Floculador en el Sedimentador, por análisis de la gráfica se obtienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \emptyset &: 0.75 \\ t/t_0 &: 0.75 \\ t_2/t_0 &: 1.9 \end{aligned}$$

$$\text{Tan}(\theta) = \frac{1}{t/t_0 - t_2/t_0} = 0.869$$

Determinación del Flujo Pistón:

$$P = \frac{\emptyset \times \text{Tan}(\theta)}{0.435 + \emptyset \times \text{Tan}(\theta)} = 0.6$$

Flujo Pistón P, 60%.

Determinación de Espacios Muertos:

$$m = 1 - \emptyset/P = -0.25$$

No hay Espacios Muertos m.

Determinación de Flujo Mezclado:

$$M = 1 - P = 0.4$$

Flujo Mezclado M, 40%.

**Método Convencional.** Con los datos de las columnas (2)  $t$  y (5)  $C-C_0$  se grafican para obtener la variación de la cantidad de trazador con el tiempo total de duración del ensayo  $t_f$  del ensayo con 129 trazadores. A los siguientes valores es necesario restarles 2.25 minutos, es el tiempo de retención de la mezcla rápida y el canal de aguas coaguladas hacia el floculador 1 y 45.75 minutos correspondientes al

tiempo de retención del Floculador 1; haciendo el análisis resultan los siguientes valores:

**Cuadro 21:** Análisis por el Método Convencional Sedimentador 1

CRITERIO	CONSECUENCIA
$t_1/t_0 = 0.161$	Tendencia a Flujo Mezclado. Presencia de cortocircuitos. Espacios muertos negativos o errores en el ensayo.
$t_m/t_0 = 1.05$	
$t_p/t_0 = 0.966$	Predominio de Flujo Pistón en relación al Flujo Mezclado.
$t_c/t_0 = 0.541$	Por debajo del valor correspondiente a la mezcla completa.
$t_b/t_0 = 1.294$	Por debajo del valor correspondiente a la mezcla completa.
$C = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_1)}{t_0}$ $C = 1.275$	Indica la presencia de Flujo Pistón y Flujo Mezclado. Es función de la recirculación.

**Índice de Morril.** En base a los datos de las columnas (2) t y (7) F(t) se elabora la figura , porcentaje de trazador F(t) que pasa en razón al tiempo de duración del ensayo. De acuerdo a ello se estiman los siguientes valores:

$$t_{90}/t_{10} = 4.35$$

Lo que indica la presencia de Flujo Mezclado.

## **7. EVALUACIÓN DE LAS BATERÍAS DE FILTROS DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO<sup>11</sup>**

### **Generalidades de la filtración**

La filtración es el proceso en el cual se lleva a cabo la última barrera física de remoción de turbiedad y es la que brinda un acabado o pulido al agua en términos de remoción de partículas y agentes microbiológicos, lo cual se logra pasando el agua por un medio poroso compuesto generalmente por arena y antracita, para de esta forma retener partículas en su interior. Es importante la calidad del efluente pues el filtro debe recibir menos de 2 UNT para lograr una alta eficiencia en el proceso de filtrado ya que este factor afecta la capacidad de remoción y la carrera de filtración.

### **Componentes de un filtro**

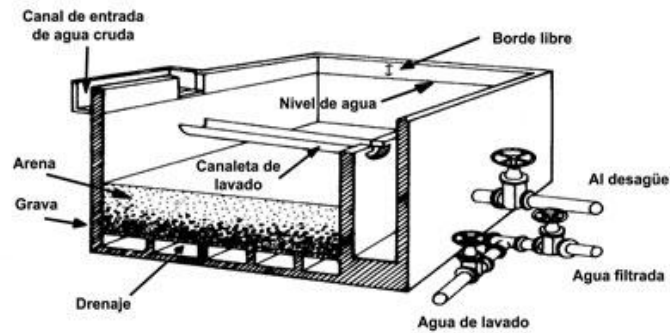
Generalmente un filtro se compone de las siguientes partes (Figura 22): o Medio filtrante, compuesto por un lecho inerte, que puede ser arena, antracita, carbón activado

- Cama de soporte para el medio filtrante, generalmente es grava y la cual cumple dos funciones: servir de soporte al medio filtrante y distribuir uniformemente el agua de lavado del filtro.
- Canales o tuberías para la entrada y salida del agua a filtrar.
- Canales o tuberías para la entrada y salida del agua de lavado.
- Equipos y accesorios de control y monitoreo.

---

<sup>11</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

**Figura 22:** Filtro rápido. (Fuente CEPIS/OPS)



### Tipos de filtros

Los sistemas de filtración pueden ser clasificados en función de: el lecho filtrante, el sentido del flujo durante la filtración, la forma de aplicar la carga de agua sobre el medio filtrante y la forma de control operacional.

El siguiente cuadro resume las diferentes alternativas para cada uno de los parámetros que usualmente se utilizan para clasificar los filtros rápidos.

**Cuadro 22:** Clasificación de los filtros rápidos. (Fuente CEPIS/OPS)

Parámetro de clasificación			
Lecho filtrante	Sentido del flujo	Carga sobre el lecho	Control operacional
Simple (arena o antracita)	Descendente	A gravedad	Tasa constante y nivel variable
Lechos dobles o múltiples	Ascendente	A presión	Tasa constante y nivel constante
	Ascendente-descendente		Tasa declinante

**Evaluación:** Los filtros se evalúan básicamente a partir de su capacidad para lograr una calidad de agua tratada menor o igual a 0,10 UNT el 95% del tiempo, excluyendo el periodo de 15 minutos posterior al retrolavado, basado en los máximos valores registrados a través de controles cada 4 horas. Se puede aceptar que la turbiedad ascienda a 0,30 UNT después del retrolavado, para recuperarse a menos de 0,10 UNT en 15 minutos. Pues se trata de la meta ideal para cualquier planta de tratamiento en el mundo, para garantizar la inocuidad del agua desde el punto de vista microbiológico. Por el contrario las metas establecidas para la zona rural colombiana es obtener menos de una unidad nefelométrica de turbiedad el 100% del tiempo excluyendo el tiempo de lavado.

El proceso de filtración es muy complejo y envuelve una serie de mecanismos, desde la simple acción de cernido hasta los fenómenos de sedimentación e intercepción, entre otros. Aún no se ha definido cuál es el mecanismo más importante, pero no hay duda sobre la acción simultánea de todos ellos, con mayor o menor intensidad, a lo largo de la carrera de filtración. Esto hace complicada la tarea de establecer un índice o patrón de eficiencia para evaluar este proceso.

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**. Estas características pueden influir en el índice de filtrabilidad, cuya determinación se hace mediante el estudio de parámetros usualmente determinados y fáciles de ser medidos como la turbiedad y la pérdida de carga.

Las características del medio filtrante desempeñan, asimismo, un papel importante en la eficiencia del proceso, principalmente el **diámetro y la granulometría del material filtrante**.

Las características de la suspensión, del medio filtrante, de la **velocidad de filtración, la pérdida de carga y la calidad del agua filtrada** son las variables de

los procesos más fáciles de controlar y posiblemente de mayor significado en la operación del filtro.

A continuación se describen los procedimientos para evaluar cómo influyen todas estas variables en una instalación de filtración rápida:

1. Características de la unidad.
2. Eficiencia del proceso.
3. Características del proceso de filtración.
4. Características del medio filtrante.
5. Características del proceso de lavado.

**Características de la unidad\*:** El análisis consiste en comprobar si la batería de filtros fue bien concebida, si cumple con los requisitos básicos del proyecto para poder operar con tasa declinante y para que un filtro se pueda lavar con el flujo que produce el resto de unidades que componen la batería.

### **Requisitos para la operación de la batería con tasa declinante**

Los requisitos básicos para que la batería pueda operar con tasa declinante son los siguientes:

- Debe estar integrada por un número mínimo de cuatro unidades.
- Debe tener la carga hidráulica necesaria para que cuando un filtro recién lavado entre en operación, la tasa de filtración no sea mayor de 1,5 veces la tasa promedio de proyecto.
- Debe tener un aliviadero móvil en el canal de entrada (para que se pueda modificar el nivel de acuerdo con las necesidades). La función de este aliviadero es limitar la carga hidráulica para el proceso, de tal manera que la condición anterior no sea superada (tasa máx. = 1,5 tasa promedio).

- Los ingresos de agua decantada deben estar ubicados en un nivel inferior al nivel mínimo de operación de la batería.

### **Requisitos básicos para que la batería de filtros sea autolavable**

Los requisitos básicos para que la batería de filtros sea autolavable - es decir, para que un filtro cualquiera de la batería pueda ser lavado con el flujo que producen las unidades restantes - son los siguientes:

1. La sección de cada filtro debe ser tal que al pasar el caudal que producen los filtros restantes (como mínimo tres) por la sección del filtro que se está lavando, se produzca la velocidad ascensional necesaria para expandir el medio filtrante entre 25% y 30%.
2. La batería debe tener un canal que interconecte la salida de todos los filtros.
3. Debe ubicarse un vertedero de salida sobre el canal de interconexión, que puede ser común a toda la batería o individual en cada filtro. Este vertedero debe establecer la carga necesaria para compensar todas las pérdidas que se producen durante la operación de lavado.
4. Este vertedero debe ser móvil, para poder modificar la carga durante la operación, hasta obtener la expansión deseada.

### **7.1 EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA UNIDAD**

#### 1) Estructura de entrada

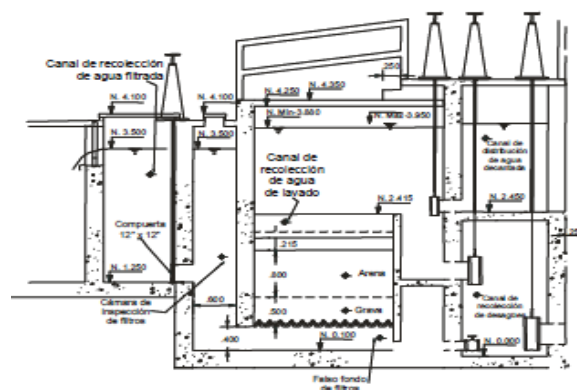
En el caso de que se esté operando con la alternativa de filtración directa, la distribución del agua decantada o coagulada a la batería de filtros debe efectuarse mediante un canal o tubería. Los ingresos a cada filtro deben estar ubicados en un nivel inferior al mínimo de operación, de tal manera que cada filtro tome libremente el caudal que puede tratar, según el estado de colmatación en que se encuentra.

Las baterías con canales tienen la ventaja de que el almacenamiento disponible en los canales amortigua el impacto del movimiento del agua cuando se cierran o abren las válvulas

En los sistemas con tuberías y válvulas operadas eléctricamente o mediante aire comprimido, cuando el sifonaje originado por el accionamiento de las válvulas es muy fuerte, puede producirse el desprendimiento del sedimento retenido en el lecho filtrante.

- El fondo falso. Se llama así al canal o espacio ubicado debajo del drenaje. Este canal debe tener como mínimo 40 centímetros de altura.
- Drenaje. Estructura que permite el paso del agua en forma ascensional durante el lavado y en forma descendente durante el proceso de filtración. El drenaje característico de este tipo de filtros es la vigueta prefabricada de concreto, que durante el lavado distribuye el agua en forma muy pareja en todo el lecho y tiene gran resistencia estructural

**Figura 23: Vista en elevación de la caja del filtro. (Fuente CEPIS/OPS)**



2) En la caja del filtro se encuentran:

- Encima del drenaje debe estar la capa soporte de grava. La función de la capa soporte es evitar que la arena se pierda a través del drenaje, por lo que se gradúa de manera que el tamaño mayor de grava sea un poco más grande que los orificios del drenaje, y el tamaño menor, apenas un poquito más grueso que el tamaño mayor de la arena. La altura y granulometría dependen del tipo de drenaje existente. En el caso de las viguetas prefabricadas, se recomienda una capa de 45 centímetros de altura mínima, con un tamaño de la grava variable entre 1/8" y 2" de diámetro. Véanse las especificaciones en el cuadro 23.

**Cuadro 23: Capa soporte de grava para viguetas de concreto prefabricadas.  
(Fuente CEPIS/OPS)**

Capa	Espesor (cm)	Tamaño
1	7,5	1/8" - 1/4"
2	7,5	1/4" - 1/2"
3	7,5	1/2" - 3/4"
4	10,0	3/4" - 1 1/2"
Fondo	12,5	1 1/2" - 2"
Total	45,0	

- Solo cuando el drenaje es de placas porosas, no se coloca lecho de grava.
- Sobre la grava se encuentra el medio filtrante, que puede ser simple o doble. El medio filtrante simple generalmente es de arena o también puede ser solo de antracita. El medio doble normalmente es la combinación de una capa de arena situada en la parte inferior y una de antracita encima.

**Cuadro 24: Características del medio filtrante. (Fuente CEPIS/OPS)**

Características	Lecho simple	Lecho doble	
		Arena	Antracita
Altura (m)	0,60–0,80	0,25–0,30	0,45–0,50
Tamaño efectivo (mm)	0,55–0,70	0,50–0,60	0,75–0,90
Coef. de uniformidad (CU)	<1,5	<1,5	<1,5
Tamaño mayor (mm)	1,41- 1,65	1,41	2,0–2,38
Tamaño menor (mm)	0,42	0,42	0,70

- Por encima del lecho filtrante se ubican las canaletas de lavado. En el caso de filtros grandes, normalmente las canaletas secundarias vierten a un canal central recolector del agua de lavado (figura 24). Cuando el canal principal está en medio del filtro, se denomina de filtro doble. En filtros pequeños se puede encontrar una canaleta perimetral o un solo canal central para recoger el agua de lavado

**Figura 24:** Canaletas de lavado en Filtros grandes. (Fuente CEPIS/OPS)



- El agua filtrada sale del drenaje al falso fondo y puede pasar a un canal de aislamiento o directamente al canal de interconexión. Normalmente los filtros grandes deben tener canal de aislamiento para poder sacar un filtro a inspección o mantenimiento, mientras que los otros siguen operando. En los

filtros pequeños por lo general no se considera canal de aislamiento e incluso puede darse el caso de que el falso fondo sea el canal de interconexión.

## **7.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO**

**Objetivo:** Determinar si los filtros están produciendo un agua de bebida microbiológicamente apta para consumo humano.

### **Procedimiento**

Este aspecto puede determinarse a través de curvas de frecuencia acumulada de turbiedad de agua filtrada, que se obtienen procesando los promedios diarios de turbiedad de agua filtrada de por lo menos un año. Tenemos dos criterios para analizar el resultado de estas curvas:

1. El filtro debe producir agua con menos de una UNT, para que se pueda garantizar la eficiencia de la desinfección.
2. Para que se pueda garantizar la ausencia de huevos de parásitos en el agua tratada, el efluente de los filtros no debe tener más de 0,10 UNT; pero para que el filtro pueda alcanzar esta meta, el agua decantada debe tener menos de 2 UNT el 95% del tiempo.

### **Características del proceso de filtración**

Debemos evaluar principalmente las variaciones de la velocidad de filtración durante el proceso, la calidad del filtrado inicial que se obtiene y la duración de las carreras de filtración.

**Velocidad y caudal de filtración:** El caudal de filtración de cada filtro, así como la velocidad de filtración, son diferentes en cada unidad de la batería cuando se está operando con tasa declinante.

Al instalar la tasa declinante, desfasando las condiciones de operación de los filtros, cada filtro tiene un diferente estado de colmatación del lecho filtrante, y

como por su especial diseño no admiten más agua que la que el estado del medio filtrante les permite, todos se encuentran operando con diferentes condiciones de caudal y velocidad. Como se lavan siempre en estricto orden consecutivo, el último que se ha lavado es el que está tomando mayor caudal y tiene la velocidad más alta. En los anteriores van decreciendo tanto el caudal como la velocidad y el que tiene más tiempo operando, el más sucio, es el que tiene las condiciones mínimas de caudal y velocidad.

**Objetivo:** Determinar si la batería de filtros está operando con tasa declinante y si la relación de velocidad máxima de operación a velocidad promedio es la adecuada para que el filtro recién lavado produzca agua de buena calidad.

**Procedimiento:** Comenzar por revisar la bitácora o el formulario de operación de filtros y determinar cómo se están lavando estos:

1. Si se están lavando todos los filtros juntos, normalmente durante la noche y sin tener en cuenta un orden correlativo, quiere decir que la tasa duración de las carreras de filtración. Uno de los efectos más negativos de operar con tasa constante una batería de filtros que fue proyectada para operar con tasa declinante es la reducida duración de las carreras por lo general de 4 a 10 horas, dependiendo de la calidad del agua. Esto se debe a que la carga que se considera para operar con tasa declinante es mucho más reducida que la necesaria para operar con tasa constante.
2. Si los filtros se están lavando en orden consecutivo y desfasados durante todo el día, es evidencia de que en alguna medida se está operando con tasa declinante. Para determinar si esta operación se efectúa correctamente, se debe preguntar al operador cuál es su criterio para tomar la decisión de lavar un filtro y cómo lo hace.

Iniciar la prueba lavando el filtro que toca, de acuerdo con el formulario de operación.

- Si cada filtro tiene un vertedero individual a la salida, determinar directamente los diferentes caudales de operación  $q_1$  a  $q_n$  en los vertederos de cada unidad.
- Determinar el área filtrante ( $A_f$ ) de cada unidad mediante medición directa. Estas áreas debieran ser todas iguales.
- Tomando el caudal que corresponde al filtro que recién se lavó, calcular la velocidad de filtración máxima ( $V_{f\text{máx}}$ ) :  $V_{f\text{máx}} \text{ (m}^3/\text{m}^2.\text{d)} = q_{\text{máx}} \text{ (m}^3/\text{d)} / A_f \text{ (m}^2)$
- Se determina la velocidad de filtración promedio ( $V_f \text{ prom.}$ ) en la batería, que es la relación del caudal de operación de la batería  $Q$  en  $\text{m}^3/\text{d}$ , con el área total de filtración de la batería:

$$V_f \text{ prom.} = Q/A_t$$

$$\text{Comprobar la relación} = V_{f\text{máx}} / V_{f\text{prom}} = 1,5$$

- Si esta relación es mayor de 1,5, la calidad del agua producida por el filtro recién lavado podría estar deteriorándose.
- Si los filtros no tienen vertederos individuales, pero tienen canal de aislamiento accesible para fines de muestreo, la única forma de determinar cuánto caudal está pasando por cada unidad sería mediante una prueba de distribución de caudales mediante trazadores.
- El trazador se aplica en el inicio del canal de distribución a los filtros y se toman las muestras en el canal de aislamiento de cada unidad.

- Está sobreentendido que cuando los filtros no tienen canal de aislamiento ni vertedero individual, no será posible efectuar la prueba de distribución de caudales, ni determinar cómo está variando la tasa de velocidad entre los filtros; pero si se están lavando en forma consecutiva y desfasada, los filtros estarán operando con tasa declinante, lo cual también se reflejará en la duración de las carreras.

### 7.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL FILTRADO INICIAL

Después del proceso de lavado, el primer efluente que produce el filtro por lo general tiene una turbiedad mayor que la del resto de la carrera, debido a que una parte de las partículas que se desprendieron durante el lavado todavía permanecen en el filtro y salen al entrar en servicio. Normalmente, cuanto más descuidada sea la operación del filtro y peor se encuentre el medio filtrante, más turbio será el primer efluente que produzca el filtro.

**Objetivo:** Detectar el comportamiento del filtro al iniciar la carrera de filtración y determinar el tiempo que demora en alcanzar la turbiedad normal. Mediante esta prueba se puede determinar también el comportamiento del medio filtrante.

**Materiales:** 15 recipientes de 150 mililitros o más y un turbidímetro.

**Procedimiento:** Abrir el acceso al canal de aislamiento del filtro. Utilizando un tomador de muestras de profundidad y a partir del momento en que se reinicia la operación de filtrado, comenzar a tomar muestras del efluente cada minuto hasta completar 15 minutos. Graficar turbiedad versus tiempo, en papel semi-logarítmico de dos ciclos.

**Interpretación de los resultados:** Cuando las turbiedades iniciales son muy altas, se puede asumir que el filtro quedó mal lavado. Esto, por supuesto, no es una regla absoluta, pues cada filtro puede empezar la carrera con una cierta

turbiedad que depende del estado del lecho filtrante, pero turbiedades por encima de las corrientes sí indican que faltó tiempo de lavado.

#### **7.4 EVALUACIÓN DE LA DURACIÓN DE LAS CARRERAS DE FILTRACIÓN**

En una batería de filtros que funcione correctamente, la duración de las carreras de filtración puede variar entre 30 y 50 horas o más, dependiendo de la calidad del agua coagulada o decantada que reciba. Se denomina carrera de filtración al intervalo entre lavados de un mismo filtro.

Esta determinación se efectúa analizando la bitácora o el formulario de operación de los filtros.

#### **7.5 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LAVADO**

Del comportamiento del sistema de lavado de la batería de filtros depende la conservación del lecho filtrante, por lo que las pruebas que se indican a continuación deben efectuarse durante la puesta en marcha de la planta, a fin de efectuar los ajustes necesarios para que los filtros se conserven en buen estado.

#### **7.6 EVALUACIÓN DE LA EXPANSIÓN DEL MEDIO FILTRANTE**

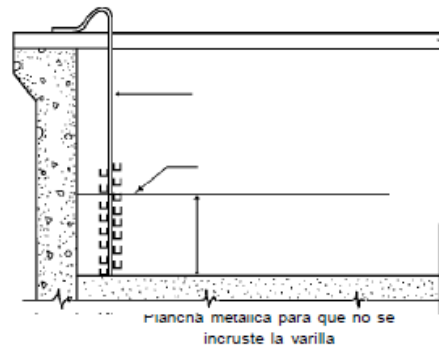
La expansión del lecho filtrante depende del caudal de lavado y del peso de los granos de arena. Este último varía de acuerdo con el diámetro del material granular.

En filtros de diseño americano, con arena fina de 0,45 a 0,55 milímetros de diámetro efectivo, el rango de expansión ideal es de 25% a 30%. Con porcentajes de expansión mayores, en lugar de mejorar, la limpieza de la arena desmejora, porque al distanciarse más los granos de arena, ya no se friccionan entre sí. En los filtros de diseño europeo, con arena gruesa de 0,80 a 1,0 milímetros de diámetro de tamaño efectivo y lavado con aire y agua, el porcentaje de expansión óptima es de 10%.

**Objetivo:** Determinar el porcentaje de aumento de espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado.

**Materiales:** Varilla metálica con cajitas soldadas a una distancia de 5 centímetros entre los bordes de las cajitas. En el extremo final de la varilla, debe haber una planchita metálica para evitar que se introduzca en la superficie de la arena (figura 25).

**Figura 25: Medidor de expansión del lecho filtrante. (Fuente CEPIS/OPS)**



### **Procedimiento:**

1. Antes del inicio del lavado, situar la varilla dentro del filtro colocando el extremo inferior encima del lecho filtrante.
2. Proceder a efectuar el lavado normalmente.
3. Después de 3 minutos, retirar suavemente la varilla, verificar cuántas cajas están llenas del material filtrante y medir la distancia ( $\Delta h$ ) entre la caja más alta que contenga arena y el extremo inferior de la varilla.
4. Determinar la altura del lecho filtrante ( $h$ ) en el punto de medición.
5. Determinar el porcentaje de expansión ( $E$ ) del lecho filtrante:
6. Efectuar esta medición en varios puntos del lecho filtrante para determinar si la expansión es uniforme en toda el área del filtro.

Se recomienda medir en especial el punto opuesto a la salida del agua de lavado y el inmediato. Cuando hay una distribución defectuosa del agua de lavado, estos son los puntos en que hay mayor y menor expansión, respectivamente.

Para que el medio filtrante se lave bien, debe producirse una expansión de 25% a 30% de manera uniforme en toda el área del filtro.

## 7.7 EVALUACIÓN DE LA DURACIÓN DEL PROCESO DE LAVADO

Cuando se hace el lavado de un filtro, la turbiedad del agua de lavado aumenta rápidamente al principio y puede llegar a valores superiores a 1.000 UNT y luego, a medida que la arena se va limpiando, la turbiedad va disminuyendo. Analizando esta curva, se puede determinar el tiempo de lavado más conveniente.

El tiempo de lavado también varía con la calidad del agua cruda. En la época de lluvia, cuando la turbiedad es alta, el tiempo de lavado necesario suele ser mayor que en época de aguas claras.

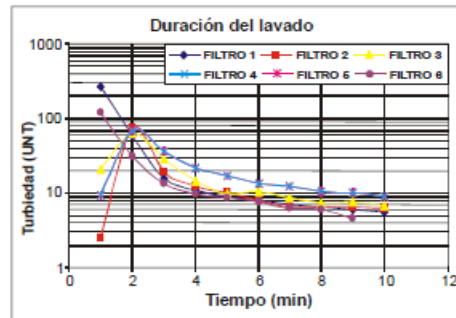
**Objetivo:** Determinar el tiempo óptimo en que debe ejecutarse la operación de lavado.

**Materiales:** 15 frascos de 150 mililitros, un cronómetro y un turbidímetro.

### Procedimiento

1. Numerar los frascos. El número de frascos dependerá de la época del año y de la forma de lavado; es decir, si el lavado se realiza con aire o con agua.
2. Iniciar el lavado normal del filtro y tan pronto como caiga la primera agua de lavado en las canaletas, llenar el frasco 1 rápidamente. Continuar llenando los frascos cada minuto hasta completar los 15.
3. Determinar turbiedades de las muestras y dibujar la curva de turbiedad versus tiempo en papel logarítmico-aritmético de tres ciclos (ver figura 26).
4. Determinar en la curva el punto de inflexión inferior en donde esta 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. Sería deseable que en este punto se obtuviera un agua con una turbiedad no mayor de 5 UNT.

**Figura 26: Duración de la operación de lavado. (Fuente CEPIS/OPS)**



### 7.8 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FILTRANTE

El medio filtrante es la parte más importante del filtro, constituye propiamente el filtro, y las características que tienen más influencia en la eficiencia del filtro son el tamaño y la forma de los granos, la porosidad del medio filtrante y su altura.

**Cuadro 25: Características usuales de los lechos filtrantes. (Fuente CEPIS/OPS)**

Características	Simple de arena	Lecho doble	
		Arena	Antracita
Espesor del medio filtrante (m)	0,70–1,00	0,25–0,30	0,45–0,50
Tamaño efectivo (T. E.) (mm)	0,50–0,70	0,50–0,60	0,75–0,90
Coef. de uniformidad (CU)	<1,5	<1,5	<1,5

En el caso de los lechos dobles, el diámetro de la capa de antracita más profunda (d90) debe guardar una relación de 3 veces el diámetro de la capa de arena más fina (d10), para que el grado de intermezcla (Im) sea aceptable. Mucho más importantes son el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad de los materiales que componen el lecho filtrante. Su determinación periódica, una o dos veces al año, proporciona información que permite saber si se está perdiendo material durante la operación de lavado, o si se está produciendo el crecimiento de

los granos como consecuencia de la mala remoción de la película adherida a estos.

## 7.9 GRANULOMETRÍA DEL MEDIO FILTRANTE

**Objetivo:** Determinar el tamaño de los granos que componen una muestra del medio filtrante.

**Materiales:** Un juego de mallas de la serie Tyler

### Procedimiento

1. Lavar el filtro normalmente y vaciarlo para poder ingresar (ver figura 27).
2. Obtener una muestra representativa de toda la profundidad del lecho filtrante.
3. Secar y pesar la muestra de material filtrante.
4. Colocar la muestra en el juego de mallas Tyler, en el recipiente superior de mayor abertura y agitar el conjunto mecánica o manualmente, hasta que los granos pasen a través de tantas mallas como su tamaño lo permita.

**Figura 27: Extrayendo una muestra del medio filtrante. (Fuente CEPIS/OPS)**



5. Pesar las porciones de muestra retenidas en cada malla y calcularlas como porcentajes de la muestra total.
6. Graficar los porcentajes obtenidos en un papel logarítmico de probabilidades, colocando los porcentajes en peso acumulado en el eje de las ordenadas

(escala logarítmica) y el tamaño de los granos en milímetros en el eje de las abscisas (escala de probabilidades).

## **7.10 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE FILTRACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA EN BUCARAMANGA<sup>12</sup>**

La presente evaluación se tomó de OPTIMIZACIÓN DEL PRETRATAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA LA PTAP DE BOSCONIA DE LA CAMB, realizado por **OSCAR ORLANDO MENDOZA JAIMES Y MÓNICA DEL PILAR GALVIS BELTRÁN** como trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil en el año 2004.

### **FILTRACIÓN.**

Es un proceso complejo cuyo objetivo es remover partículas que no fueron retenidas en la sedimentación, envuelve una serie de mecanismos que aún no se ha definido cual de ellos es el más importante en la filtración.

Los factores que influyen en la filtración rápida son las características de las partículas suspendidas (tamaño, pH, densidad, resistencia, etc) y por otra parte las características del medio filtrante (tipo, tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad, forma, peso específico, espesor de las capas filtrantes).

**Características del proceso de filtración.** Se busca es determinar el caudal y la velocidad con la que están operando los filtros, así como las pérdidas de carga a lo largo de la carrera de filtración para tener una idea del estado en que se encuentra el proceso.

**Velocidad y Caudal de filtración.** Para determinarlos es necesario introducir una mira en el filtro, cerrar la válvula de ingreso de agua sedimentada y medir el tiempo en que el nivel desciende 10 cm, tomar varios tiempos y promediar.

---

<sup>12</sup> **MENDOZA J. Oscar Y GALVIS B. Mónica.** En: optimización del pretratamiento e implementación de dosificación de sulfato de aluminio líquido para la PTAP de Bosconia de la CAMB. 2004

$$V_f (m^3 / m^2 - día) = \frac{Q(m / s) * 86400}{A_L}$$

$$Q(m / s) = \frac{A_f(m^2) * 0.1m}{t(s)}$$

**Cuadro 26:** Velocidad y caudal de filtración.

FILTRO No.	AREA (m2)		TIEMPO DE DESCENSO (S)	DISTANCIA DE DESCENSO (m)	CAUDAL CALCULADO l/s	VELOCIDAD DE FILTRACIÓN (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -día)
	FILTRO A <sub>f</sub>	LECHO A <sub>L</sub>				
1	57	48.91	120	10	47.5	83.92
2	57	48.91	131	10	43.51	76.86
3	57	48.91	125	10	45.6	80.55
4	57	48.91	126	10	45.52	79.91
5	57	48.91	142	10	40.1	70.90
6	57	48.91	150	10	38	67.12
7	57	48.91	130	10	43.84	77.45
8	57	48.91	127	10	44.88	79.28
9	57	48.91	134	10	42.53	75.14
10	57	48.91	150	10	38	67.12
11	57	48.91	152	10	37.5	66.24
12	57	48.91	144	10	39.58	69.92

**Pérdidas de carga en el filtro.** Para determinar la evolución de las pérdidas de carga es necesario iniciar con las baterías de filtros limpias, es decir se lavaron todos los filtros y se abrió la compuerta que comunica las aguas decantadas de las dos etapas de los sedimentadores. Se colocaron dos reglas graduadas, una en la caja del filtro y la otra en la salida del agua filtrada, el cero de las dos reglas debe coincidir con el nivel del agua del filtro recién lavado, cuando empieza a operar, se toman los datos de los niveles en la caja y la salida, las turbiedades del afluente y el efluente y medir las fluctuaciones de carga en el efluente.

En los anexos O se pueden verificar los datos concernientes a los filtros 7, cuyas curvas de pérdidas de carga indican una penetración muy limitada de materia coagulada dentro del medio filtrante, condición normal de operación de los filtros. En la calidad del agua filtrada se puede ver que a medida que pasa el tiempo la calidad de esta es generalmente menor a 0.5 UNT, algunos incrementos se presentaron por aumentos en la turbiedad del afluente o por variación en el caudal

de operación en la planta, pero casi siempre fue menor a este valor lo que hace este proceso muy eficiente.

**Calidad de la etapa inicial de filtración.** Al ser puesto en operación un filtro después de lavarlo generalmente se tienen turbiedades más altas del efluente que en el resto de la operación del mismo, esto se presenta debido a que ciertas partículas que han sido desprendidas durante el proceso de lavado han quedado retenidas en el lecho y dentro de este, saliendo al comenzar la operación. En el anexo P se muestran los datos correspondientes a este ensayo.

La máxima turbiedad dada recién entraron en operación los filtros fue de 1 UNT, lo que indica que el proceso de lavado es eficiente para remover la colmatación de los filtros.

**Bolas de barro.** La presencia de bolas de barro indica el grado de deterioro del lecho filtrante o puede indicar el lavado deficiente que no remueve el material retenido en el lecho, o también a una frecuencia inadecuada de retrolavados.

El procedimiento fue el siguiente: después de un lavado normal del filtro, se drena hasta un nivel bajo; se extrajo una muestra representativa del medio filtrante (en 4 puntos del filtro) y se determinó su volumen, se tomó el material por partes y se depositó en el tamiz No. 10 y sumergirlo en un balde con agua, de esta forma quedan retenidas las bolas de barro. En una bureta se depositó un volumen de agua conocido; el volumen de bolas de barro fue el volumen de aumento cuando se agreguen las bolas de barro.

$$\% \text{ bolas de barro} = V_b/V_o * 100$$

Donde

$V_b$  = Volumen de las bolas de barro, en ml.

$V_o$  = Volumen total de la muestra analizada, en ml.

De acuerdo a la clasificación de la cuadro 27, los 12 filtros de la planta se encuentran en buen estado, el lavado es eficiente, comprobado también en la calidad inicial del agua filtrada.

**Cuadro 27:** Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de barro.

% DE VOLUMEN DE BOLAS DE BARRO	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 Mal
2.5-5.0	Mal
>5.0	Muy Malo

**Características del proceso de lavado.** Es muy importante determinar las condiciones de lavado ya que generalmente los problemas que ocurren por operación del filtro son debidos a la eficiencia con la que son lavadas estas unidades.

**Velocidad de lavado del filtro.** Tiene como objetivo determinar la velocidad y el caudal de lavado con que está operando el filtro. Primero se introduce una mira a la caja del filtro se cierra la válvula de ingreso de agua sedimentada y se deja descender hasta el nivel más bajo, se cierra la válvula de salida de agua filtrada, se abre la válvula de ingreso de agua de lavado y medir el tiempo en que tarda en subir el nivel del agua en la caja una altura de 10 cm.

El rango de la velocidad de lavado con agua normalmente debe encontrarse entre 0.6 m/min y 1.0 m/min, valor recomendado por la norma RAS 2000, en la planta se encuentran velocidades entre 0.6-0.8m/min por lo que la planta cumple con este requisito, como detalla la cuadro 28 que podremos apreciar enseguida:

**Cuadro 28:** Determinación de la velocidad y el caudal de lavado

FILTRO No.	AREA (m <sup>2</sup> )		TIEMPO DE SUBIDA (S)	DISTANCIA DE SUBIDA (Cm)	CAUDAL LAVADO L/S	VELOCIDAD DE LAVADO(m/min)
	FILTRO A <sub>F</sub>	LECHO A <sub>L</sub>				
1	57	48.91	9	10	543	0.66
2	57	48.91	10	10	489.1	0.60
3	57	48.91	10	10	489.1	0.60
4	57	48.91	10	10	489.1	0.60
5	57	48.91	9.5	10	514.8	0.63
6	57	48.91	9	10	543	0.66
7	57	48.91	9	10	543	0.66
8	57	48.91	11	10	444.63	0.55
9	57	48.91	8	10	611.37	0.75
10	57	48.91	11	10	444.63	0.55
11	57	48.91	10	10	489.1	0.60
12	57	48.91	9	10	543	0.66

**Expansión del lecho filtrante.** Para determinar el porcentaje de aumento del lecho durante el lavado fue necesario fijar una varilla con cajitas soldadas distanciadas 5 cm entre sí, dentro del filtro colocando el extremo inferior encima del medio filtrante. Se efectúa el lavado normal y cuando se suspenda el mismo medir la distancia a la tapa más alta que contenga material filtrante.

La expansión depende de la velocidad con la que se inyecte el agua de lavado y el diámetro del medio granular.

**Cuadro 29:** Porcentaje de expansión del lecho filtrante

FILTRO No.	EXPANSIÓN (cm)	PROFUNDIDAD DEL LECHO (cm)	% DE EXPANSIÓN
1	25	95	26.32
2	30	95	31.58
3	35	95	36.84

FILTRO No.	EXPANSIÓN (cm)	PROFUNDIDAD DEL LECHO (cm)	% DE EXPANSIÓN
4	35	95	36.84
5	30	95	31.58
6	20	95	21.05
7	25	95	26.32
8	30	95	31.58
9	35	95	36.84
10	35	95	36.84
11	30	95	31.58
12	25	95	26.32

**Duración del proceso de lavado.** El objetivo de esta actividad era determinar como varía la turbiedad del agua de lavado a fin de deducir el tiempo óptimo en que debe ejecutarse esta operación.

El procedimiento seguido fue iniciar el lavado normal del filtro y tan pronto como empezó a caer el agua de lavado en las canaletas se tomaron muestras a intervalos de tiempo predeterminados para finalmente determinárseles la turbiedad.

En el anexo R están consignados los datos de este ensayo, de la curva correspondiente el tiempo óptimo de lavado es de 8 a 10 minutos para las dos baterías.

## 8. EVALUACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE CLORACIÓN<sup>13</sup>

### Generalidades de la cloración

La desinfección es un proceso selectivo para la destrucción de los microorganismos patógenos, que involucra un tratamiento especializado mediante el empleo de un agente químico para la destrucción de aquellos microorganismos que pueden ser peligrosos o que sean capaces de producir enfermedades en la población, que incurren en una disminución en la calidad de vida la población servida y conlleva graves consecuencia en el desarrollo y salud de las población más vulnerable como los ancianos y niños en proceso de crecimiento.

En términos prácticos, desinfectar significa eliminar los microorganismos existentes, capaces de producir enfermedades.

Para la desinfección de las aguas de abastecimiento público, se usan generalmente las siguientes sustancias químicas.

- Cloro y sus compuestos (la más común en el medio colombiano).
- Ozono.
- Luz ultravioleta (usada generalmente en la producción de agua embotellada).

El cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las características requeridas, incluyendo su fácil dosificación y costo conveniente. Sin embargo, como todo presenta algunas desventajas:

- Es muy corrosivo.
- Puede producir sabor desagradable en el agua, incluso en concentraciones que no significan riesgo para el consumidor.

---

<sup>13</sup> CEPIS/OPS. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, 2006

- Su manejo y almacenamiento requiere ciertas normas de seguridad, para evitar riesgos en la salud de los operadores.
- El cloro, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas verde, dos y media veces más pesado que el aire.

**Evaluación:** Por lo general, la cloración es el proceso final utilizado para asegurar la inocuidad del agua desde un punto de vista biológico, bajo el supuesto de que todos los procesos unitarios anteriores a la desinfección sean eficientes; es decir la coagulación, decantación y filtración no están cumpliendo con la meta de remoción, la cloración por sí sola sea suficiente para lograr el objetivo.

La cloración solo debe servir para asegurar que la calidad del agua producida por la planta no desmejore al ser transportada a las viviendas de los usuarios. La remoción de la contaminación presente en la fuente debe ser mayormente efectuada por la decantación y completada en los filtros.

Los factores que modifican la eficiencia remocional de la cloración se relacionan con:

- Las características del agua.
- Las características del sistema de cloración.

Las características del agua que más influyen en la eficiencia del proceso son las siguientes:

- a. La temperatura y el pH.
- b. La concentración de la turbiedad, el color, la materia orgánica, el nitrógeno amoniacal, Fe, Mn, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.
- c. Tipo y concentración de microorganismos.

Las características del sistema que más influyen en la eficiencia de la cloración son:

- a. El tiempo real de contacto.
- b. La dosis de cloro aplicada.
- c. Las características del sistema de aplicación.
- d. Las características del compuesto de cloro utilizado.
- e. Las características de la caseta de cloración.

A continuación se indican algunos de los ensayos que se deben llevar a cabo para evaluar las características de estas instalaciones.

## **8.1 EVALUACIÓN DEL TIEMPO REAL DE CONTACTO**

**Objetivo:** Determinar el tiempo real que el cloro permanece en contacto con la masa de agua, antes de que esta empiece a distribuirse.

**Materiales:** Los necesarios para determinar el cloro residual de acuerdo con los métodos estándar de la AWWA para análisis de agua.

### **Procedimiento**

1. Definir las estructuras que son atravesadas por el agua clorada antes de la primera conexión domiciliaria.
2. En los tramos en que el agua atraviesa tuberías se produce flujo de pistón puro, por lo que el tiempo teórico de retención ( $T_o$ ) y el tiempo de retención real ( $T_r$ ), son similares.
3. El tiempo de retención real en la cámara de contacto y en el reservorio se puede determinar de la siguiente manera:
  - a. Tomar una muestra de agua clorada a la salida de la estructura y determinar el cloro residual presente.
  - b. Incrementar súbitamente la dosis de cloro en 30%, y a partir de este momento, establecido como punto de partida para el ensayo, seguir

tomando muestras cada minuto hasta que el incremento en la dosis se perciba en el cloro residual de las muestras extraídas.

- c. Tomar el tiempo correspondiente a la muestra en que se presentó el incremento de cloro residual.
- d. El intervalo de tiempo transcurrido entre el incremento de la dosis que estaba aplicando el clorador y la presentación del incremento de cloro residual a la salida de la estructura estará indicando el tiempo de retención real ( $T_r$ ) entre el punto de aplicación del cloro y el lugar en el que se tomaron las muestras.

## **8.2 EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE CLORO:**

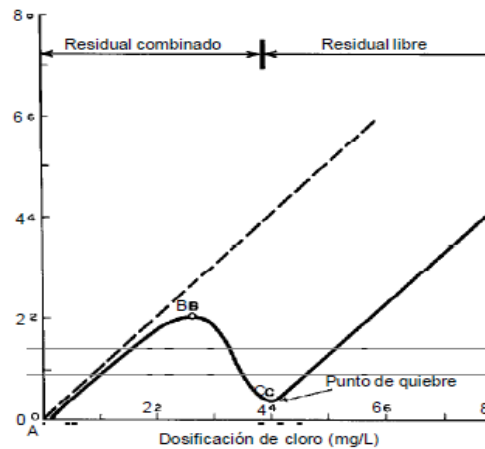
Es la dosis que produce el residual de cloro estipulado por las normas en el punto más alejado de la red de distribución.

**Objetivo:** Determinar la dosis de cloro que satisface la demanda de todo el sistema produciendo el residual apropiado en el punto más alejado.

### **Procedimiento**

1. Determinar el tiempo de retención entre el punto de aplicación y el punto más alejado de la red de distribución ( $T_f$ )
2. Graduar el clorador en la apertura correspondiente a la dosis calculada a nivel de laboratorio (curva de demanda de cloro al punto de quiebre), ver figura 28.
3. Transcurrido el tiempo de retención medido ( $T_f$ ), tomar tres muestras en el punto de aplicación y en el punto más alejado de la red, determinar el cloro residual y el residual promedio de las tres muestras.
4. Repetir el ensayo incrementando gradualmente la dosis, hasta encontrar en el punto más alejado de la red el contenido de cloro residual estipulado por las normas.

**Figura 28: Demanda de cloro al punto de quiebre. (Fuente CEPIS/OPS)**



#### **Observaciones:**

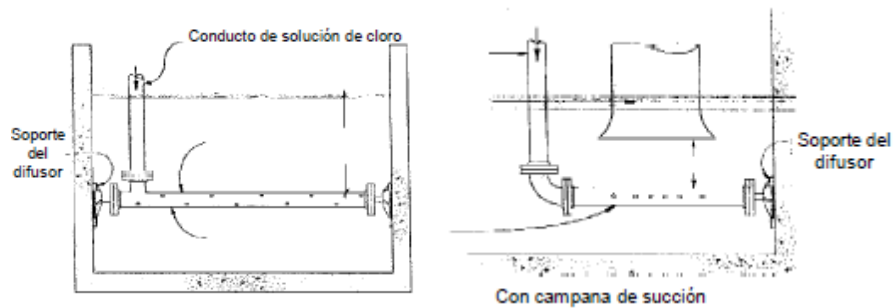
- La diferencia de cloro residual medido entre el punto de aplicación y el punto más alejado refleja la demanda de cloro del agua, más la demanda en la red de distribución.
- La demanda de cloro del agua varía con la calidad de esta. La demanda de cloro en la red de distribución suele ser constante en sistemas en los cuales se viene clorando por mucho tiempo. Cuando la cloración se implanta por primera vez, la demanda es muy alta, va disminuyendo a medida que pasa el tiempo y se satisface la demanda en la red, hasta volverse prácticamente constante.
- Si en un sistema de distribución se ha venido clorando durante mucho tiempo y la demanda de cloro en la red se incrementa súbitamente, se estaría poniendo de manifiesto la aparición de un nuevo foco de contaminación.

### **8.3 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE APLICACIÓN**

Para que el cloro se aplique en forma correcta, el sistema debe reunir las siguientes condiciones:

- Debe aplicarse en forma sumergida.

**Figura 29: Difusores de cloro en tuberías y canales. (Fuente CEPIS/OPS)**



- Debe distribuirse de manera uniforme en toda la masa de agua mediante un difusor (figura 29).
- El difusor debe localizarse en un punto en que el agua esté generando turbulencia para que el cloro entre rápidamente en contacto con toda la masa de agua.

**Objetivo:** Determinar si el cloro está siendo aplicado en forma correcta.

### **Procedimiento**

1. Verificar si el cloro se está aplicando mediante un difusor.
2. Comprobar si el difusor se encuentra totalmente sumergido.
3. Comprobar si existe turbulencia en el punto de aplicación del cloro.

**Observaciones:** La forma correcta de aplicación es en la turbulencia que produce el vertedero de entrada a la cámara de cloración y el difusor se encuentra sumergido con una altura mínima de agua de 1,50 metros, que es mantenida por la ubicación del vertedero de salida de la cámara.

Normalmente, cuando la forma de aplicación es incorrecta al destapar la cámara de cloración, el gas se percibe fuertemente en el ambiente porque no se está mezclando en el agua.

## **8.4 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES DE CLORACIÓN**

Al evaluar las instalaciones o ambientes en los que se está efectuando la operación de este proceso, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios generales:

- Instalaciones en las que el consumo de cloro es mayor de 50 kg/d debieran emplear cilindros de cloro de una tonelada.
- En instalaciones con consumo de hasta 50 kg/d, los equipos de cloración y el almacén de los cilindros de cloro pueden compartir la misma área. En instalaciones de mayor capacidad, deben ubicarse en áreas separadas. Tanto la sala o caseta de cloración como el almacén deben reunir una serie de características cuya finalidad es facilitar la operación del sistema en forma segura y evitar riesgos para el personal que lo opera.

Existen dos tipos de instalaciones: las salas herméticas con sistema artificial de ventilación y extracción del aire, en las que la manipulación se efectúa siguiendo rígidas medidas de seguridad (esto es, con vestimenta apropiada, máscaras y balón de oxígeno) (figuras 30).

La sala de cloración de la figura 30 ha sido proyectada con ventilación forzada, pero se puede apreciar un solo punto de ventilación (debajo de la ventana) y muy alto. El cloro quedaría depositado a nivel del suelo.

El almacén de cilindros de cloro que corresponde a la sala de la figura 30 también tiene ventilación forzada

Del mismo modo que en la sala de cloración, hay un solo punto de ventilación, debajo de la ventana y por encima de los cilindros.

Se debe tener en cuenta que para que una fuga evacue rápidamente, toda la parte baja de los muros, a la altura del piso, debe estar cubierta de puntos de ventilación. Cuando se emplea ventilación forzada, esta debe cubrir todo el

contorno. En Colombia son usuales las salas de cloración totalmente abiertas y con ventilación natural, donde se espera que las fugas se dispersen con rapidez en el ambiente circundante, por lo que generalmente se ubican bastante alejadas del resto de la planta, de tal manera que si se presentara una emergencia, el efecto corrosivo del cloro no cause daños a equipos e instalaciones.

### **Criterios para evaluar la sala de cloración y el almacén de cilindros de cloro**

- Ventilación a la altura del piso, natural o forzada. En caso de una fuga, ello no contribuirá en nada a desalojar el cloro acumulado a nivel del piso.

**Figura 30: Sala de cloración con ventilación forzada. (Fuente CEPIS/OPS)**



El almacén de cloro debe ser exclusivamente para este fin. No debe depositarse en este ambiente ningún otro tipo de materiales, porque se entorpecería la manipulación de los cilindros en caso de una emergencia

- Debe haber un equipo de cloración y una bomba de agua alterna. En estas condiciones, esta unidad está operando en perenne estado de emergencia y en cualquier momento puede presentar un desperfecto y la cloración se suspendería.
- Las bombas deben estar en otro ambiente para que no se deterioren por efecto de las fugas.

- Verificar la existencia y estado de alarmas para indicar la presencia de fugas en el sistema

La mayoría de las salas de cloración en Colombia son abiertas; esto es, ventiladas en forma natural. Para que la operación sea segura, deberá comprobarse la existencia de las siguientes facilidades:

- Ventilación apropiada. La ventilación debe ubicarse en la parte inferior de los muros (el gas cloro es más pesado que el aire y tiende a depositarse a nivel del piso) y las puertas o muros preferentemente deben ser de malla o de ladrillo hueco.
- Comprobar la existencia de máscaras de protección en buen estado y correctamente ubicadas en un lugar exterior a la caseta de cloración, conjuntamente con la botellita de amoníaco para detectar fugas y el equipo para reparar fugas. Este equipo debe estar siempre fácilmente accesible por los operadores.
- Comprobar si los operadores han sido capacitados para usar el equipo de protección para fugas correctamente.
- Verificar las facilidades con que se cuenta para el traslado de cilindros dependiendo de la capacidad (150 ó 2.000 lb). Para cilindros de 2.000 libras, debe contarse con una grúa.
- Existencia y estado de la balanza para controlar el peso del cilindro en uso.

El sistema de la figura 31 carece de balanza, de ventilación apropiada y de grúa para trasladar los cilindros de 2.000 libras del camión a la sala de cloración.

Cuando no hay grúa para trasladar los cilindros, el personal debe ingeniar formas de hacerlo y los riesgos que surgen son muy grandes (figura 32).

- Comprobar si la capacidad del almacén es adecuada, así como el número de cilindros llenos y vacíos que se mantienen almacenados y la forma en que se aseguran para evitar caídas en caso de sismos.

- Comprobar si hay un sistema alternativo de emergencia que opere por gravedad para cuando falta la energía eléctrica.

**Figura 31: Sistema incompleto operación riesgosa. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 32: Operación de descarga de alto riesgo. (Fuente CEPIS/OPS).**



- Comprobar que el cilindro de cloro que está en uso no se encuentre escarchado o congelado por fuera.

El cilindro de la figura 34 se encontraba congelado (muy frío al tacto y chorreando agua). Esto ocurre cuando se está extrayendo más de lo que la capacidad máxima del cilindro permite.

El cuadro 30 indica las dosis que se pueden extraer a un cilindro dependiendo de su capacidad.

En estos casos deben colocarse más cilindros en operación unidos mediante una tubería matriz o manifold. (Figura 35)

- Comprobar si existen carretillas para trasladar en forma segura los cilindros de cloro.

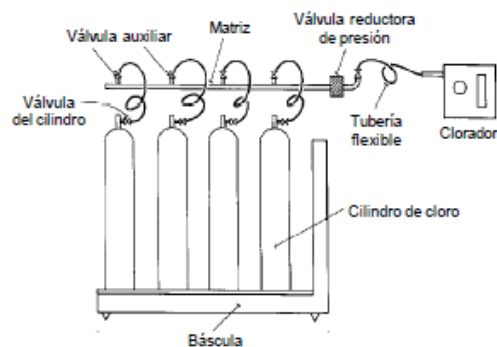
**Cuadro 30: Características de los cilindros de cloro. (Fuente CEPIS/OPS)**

Peso del contenido		Peso del cilindro		Peso total del cilindro lleno		Máximo flujo de cloro que se puede extraer de un cilindro	
kg	lb	kg	lb	kg	Lb	kg	lb
50	100	33	73	83	173	11,7	26
75	150	40-59	90-130	115-134	240-280	18,2	40
2.000	1.000	680	1.500	1.680	3.500	400	182

**Figura 33: Extracción de cloro máximo permisible. (Fuente CEPIS/OPS)**



**Figura 34: Sistema de conexión tubería matriz. (Fuente CEPIS/OPS)**



El cuadro 31 permite calcular el número de cilindros que deben estar almacenados, para comprobar si el almacén tiene la capacidad necesaria.

**Cuadro 31: Número de cilindros necesarios, según la capacidad requerida.  
(Fuente CEPIS/OPS)**

Cilindro de 75 kg				Cilindros de 1.000 kg			
Capacidad requerida DGS/día	En servicio	Vacios	Reserva mínima	Capacidad requerida (kg/día)	En servicio	Vacios	Reserva mínima
0 – 18	1	2	3	54 – 180	1	1	2
18 – 36	2	4	6	180 – 360	2	2	4
36 – 54	3	6	9	360 – 540	3	3	6
54 – 72	4	8	12	540 – 720	4	4	8
72 – 90	5	10	15	720 – 900	5	5	10
90 – 100	6	12	18	900 – 1.000	6	6	12
				> 1.000	Usar evaporador		

## **9. RELACIÓN DE LOS ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

Con la finalidad de hacer practica y facilitar la referencia de los diferentes ensayos que se deben realizar para viabilizar la evaluación de una planta se resumen los ensayos para obtener la información necesaria para diagnosticar una planta de tratamiento de filtrado rápido de tecnología CEPIS/ OPS en sus aspectos principales y más influyentes que afectan las metas de producción de agua de calidad apta para el consumo humano.

### **Ensayos para las unidades de coagulación y floculación**

- Determinación de la dosis y concentración de coagulante.
- Determinación del PH óptimo de coagulación
- Determinación de las condiciones óptimas de mezcla (punto de aplicación y gradiente de velocidad, tiempo de retención)
- Determinación de la eficiencia de la mezcla.
- Determinación de las características y propiedades de los floculos
- Determinar la eficiencia de coagulación
- Determinar la eficiencia del ayudante de coagulación
- Ensayo de trazadores y caracterización de los flujos en la unidad de floculación y cálculo del tiempo de retención.
- Determinación de los gradientes de velocidad en cada uno de los tramos del floculador.

### **Ensayos para la evaluación de la sedimentación**

- Ensayo de velocidad de sedimentación y eficiencia del mismo.
- Ensayo de trazadores y caracterización de los flujos en la unidad de floculación, tiempos de retención, y distribución de caudales.

- Determinación de la carga superficial real.
- Determinación de las líneas de flujo en el sedimentador.
- Caracterizar y determinar la topografía de la zona de depósito de lodos
- Determinar la turbiedad remanente, eficiencia del proceso.

### **Ensayos para la evaluación de la unidad de filtración rápida.**

- Determinación de la velocidad de filtración
- Determinar el caudal de filtración
- Determinar el tiempo de lavado del filtro
- Duración de la carrera de filtrado
- Obtención de las bolas de barro
- Ensayo de granulometría del lecho filtrante
- Dimensionamiento del lecho filtrante y su composición y estado.
- Determinar el porcentaje de expansión del lecho filtrante.
- Ensayo de trazadores y tiempos de retención.
- Turbiedad remanente, eficiencia del proceso de remoción de turbiedad y microbiológica.

### **Ensayos para la evaluación del proceso de desinfección.**

- Determinar el tipo de desinfectante y la dosis optima
- Determinación del tiempo de contactó del cloro
- Determinar el cloro residual libre
- Eficiencia del proceso de cloración

## 10. CONCLUSIONES

- En nuestro país la evaluación y mejora continua de los procesos de potabilización del agua, es parte de los objetivos planteados para mejorar la calidad de vida de la población rural y urbana, por lo tanto todo esfuerzo orientado en dicha dirección, para generar base teórica y práctica que nos permitirá viabilizar y acercarnos cada día al objetivo.
- La evaluación integral de una planta de tratamiento es un labor compleja que incluye el trabajo mancomunado de múltiples profesionales de amplios conocimientos y años de experiencia, implementándose en PTAP de grandes centros urbanos, quienes cuentan con los recursos para llevarlo a cabo, pero en las pequeñas poblaciones rurales económicamente limitadas no es posible mantener un programa de evaluación, por lo tanto se busca dirigir esfuerzos en crear metodologías que permitan simplificar y hacer más práctica, económica y sostenible la mejora de los procesos en las PTAP rurales.
- Alrededor del mundo se tienen muchas investigaciones y experiencias exitosas en cuanto a la revisión y mejora de los procesos en PTAP, se tienen metodologías de evaluación bastante complejas y también algunas prácticas orientadas a países en desarrollo como el nuestro, por lo tanto se deben dirigir esfuerzos en aterrizar dichos avances a la realidad de las plantas de tratamiento en la zona rural de Colombia para de esta forma implementar metodologías probadas y vigentes para así asegurar un consumo de agua microbiológicamente aceptable.
- Las normativas y estándares internacionales en materia de potabilización y calidad son parámetros de alta exigencia imposibles de alcanzar en nuestro país en la zona rural, la normativa colombiana es flexible y aterrizada a

nuestra realidad en cuanto a las metas de calidad exigidas pues se tiene conciencia de las limitaciones económicas, tecnológicas y de desarrollo e investigación en la materia, y aun así las metas de potabilización no se cumplen.

- El presente material pretende ser una herramienta útil, y dar una introducción en materia de diagnóstico y evaluación de plantas de tratamiento.
- En el presente manual se tratan los procedimientos de evaluación para plantas de filtrado rápido para plantas convencionales de filtrado rápido que comprenden coagulación, mezcla rápida floculación, sedimentación, filtración y cloración.
- Teniendo en cuenta que la aplicación de la teoría para la evaluación y diagnóstico en toda su extensión, es una tarea ardua y compleja, el presente texto aspira ser una ayuda, ya que se simplifica y está orientada para las PTAP en municipios de escasos recursos en la zona rural Colombiana.
- Se observa habitualmente una política poco consistente en los municipios en la inversión de infraestructura, dotación y personal calificado. Estos parámetros son indispensables para un buen funcionamiento de las PTAP. Por lo tanto es necesario tener una política clara y asignar recursos para lograr un suministro de agua que garantice la potabilidad y cumplimiento de la normatividad sanitaria.

## BIBLIOGRAFÍA

Aurazo de Zumaeta, Margarita. Manual I Teoría. Tomo I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Aspectos biológicos de la calidad del agua, Lima, OPS/CEPIS, 2004.

Barrenechea Martel, Ada y Cánepa de Vargas, Lidia. Manual I, Teoría. Tomo I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Desinfección, Lima, OPS/CEPIS, 2004.

Barrenechea Martel, Ada. Manual I Teoría. Tomo I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, Coagulación, Lima, OPS/CEPIS, 2004.

Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental [sitio internet]  
<<http://www.bvsde.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>>

Cánepa de Vargas, Lidia. Manual I Teoría. Tomo I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Procesos unitarios y plantas de tratamiento, Mezcla rápida, Floculación, Lima, OPS/CEPIS, 2004.

Cánepa de Vargas, Lidia. Tomo I, Manual III: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Evaluación de plantas de tecnología apropiada, Capítulo 1, Inspección inicial, Lima, OPS/CEPIS, 2006

Cánepa de Vargas, Lidia. Tomo I, Manual III: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Evaluación de plantas de tecnología apropiada, Capítulo 2, Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención, Lima, OPS/CEPIS, 2006

Cánepa de Vargas, Lidia. Tomo I, Manual III: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Evaluación de plantas de tecnología apropiada, Capítulo 3, Evaluación de plantas convencionales, Lima, OPS/CEPIS, 2006

Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación, NTC 1486, sexta actualización 2008-08-04, Bogotá DC.

Maldonado Yactayo, Víctor. Manual I Teoría. Tomo I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Sedimentación, Filtración, Lima, OPS/CEPIS, 2004.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000. Ministerio de Desarrollo Económico, Bogotá, 2000.Documentacion.

Romero, R. Jairo. Acuípurificación, diseño y sistemas de purificación de aguas. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1995.

Diagnostico y optimización de la planta de tratamiento de agua potable, municipio de puente nacional, **Jerson Hernan Saavedra Bolivar** Universidad Industrial de Santander trabajo de grado 2005.

Optimización del pretratamiento e implementación de dosificación de sulfato de aluminio líquido para la pta de bosconia de la CAMB, **Oscar Orlando Mendoza Jaimes y Mónica del Pilar Galvis Beltrán** Universidad Industrial de Santander trabajo de grado 2004.

## ANEXOS

### ANEXO A. Formato de inspección inicial.

El presente anexo contiene la ficha que se debe diligenciar como parte de la inspección inicial del proceso de evaluación preliminar de una planta de tratamiento de filtrado rápido, con el objetivo de caracterizar y de crear una idea global del estado de las unidades y procesos que tiene la misma, al momento de la inspección y de esta forma obtener la información necesaria para dar inicio a la evaluación de los procesos críticos para lograr la meta de potabilización.

#### A. UBICACIÓN

Fecha.....

1. País: Colombia

2. Nombre de la planta \_\_\_\_\_

3. Poblaciones abastecidas \_\_\_\_\_

4. Localización:

**Departamento:** \_\_\_\_\_ **Provincia:** \_\_\_\_\_ **Municipio:** \_\_\_\_\_

5. Dirección de la planta: \_\_\_\_\_

Distancia de la cabecera municipal: \_\_\_\_\_ km

Altitud: \_\_\_\_\_ m. s. n. m.

6. Institución propietaria o administradora: \_\_\_\_\_

#### B. FUENTE DE ABASTECIMIENTO, CAPTACIÓN, CONDUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO PREVIO

7. Fuente de abastecimiento:

a) Quebrada: \_\_\_\_\_

b) Río \_\_\_\_\_

c) Lago o embalse \_\_\_\_\_

7.1 Tipo de toma:

- a) bocatoma lateral
- b) bocatoma de fondo

7.2 Conducción de agua cruda:

- a) Por gravedad
- b) Por bombeo

7.3 remoción de partículas por sedimentación (arena).

- a) Desarenador
- b) Presedimentador

Dimensiones:

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área: \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

Carga superficial: \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d

### **C. CALIDAD DE LA FUENTE**

Solicitar información de calidad del agua cruda de los archivos de la planta de por lo menos un año. Básicamente, promedios mensuales de turbiedad, color, pH, alcalinidad, número más probable (NMP) de coliformes termotolerantes y también promedios diarios de turbiedad del mes más lluvioso y del mes más seco

### **D. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA**

8. Caudal de la planta (En el momento de la visita) \_\_\_\_\_ L/s

8.1 **Caudal de proyecto** (Diseño): \_\_\_\_\_ L/s

8.2 Caudal máximo con el que opera la planta: \_\_\_\_\_ L/s

(Indique los meses del año o situaciones en que se da esta condición): \_\_\_\_\_

8.3 Caudal mínimo con el que opera la planta \_\_\_\_\_ L/s

Indique los meses del año o las situaciones en que se da esta condición): \_\_\_\_\_

9. **Tipo de planta:** filtración rápida

- a) Patente

b) Convencional clásica

c) Tipo CEPIS/OPS

Año en que se diseñó: \_\_\_\_\_

Año en que se remodeló/amplió/optimizó: \_\_\_\_\_

10. Descripción:

10.1 Medidor de caudal

Tipo:

a) Canaleta parshall

b) macromedidor

### 10.2 Mezcla rápida

Tipo de mezclador:

a) mecánico: retromezclador \_\_\_\_\_

b) hidráulico parshall \_\_\_\_\_ vertedero\_\_\_\_\_

Punto de aplicación:

a) punto de mayor agitación

b) fuera del punto de mayor agitación

### 10.3 Floculadores

Tipo:

a) mecánico

b) hidráulico: flujo vertical\_\_ flujo horizontal\_\_

En serie\_\_\_\_\_ paralelo\_\_\_\_\_

Número de unidades: \_\_\_\_\_

Número de tramos: \_\_\_\_\_ (un floculador tiene min 3 etapas o tramos)

Profundidad útil: \_\_\_\_\_ m

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área de cada unidad: \_\_\_\_\_

### 10.4 Decantadores

Tipo

a) convencional

b) de placas paralelas o laminar.

forma: rectangular\_\_\_\_\_ cuadrado\_\_\_\_\_

Número de unidades: \_\_\_\_\_

Profundidad útil: \_\_\_\_\_ m

Largo: \_\_\_\_\_ m

Ancho: \_\_\_\_\_ m

Área de cada unidad: \_\_\_\_\_

### 10.5 Filtros

a) Tipo de filtro:

Tasa constante

Tasa declinante

Número de unidades \_\_\_\_\_

b) Tipo de lecho filtrante:

Simple

Doble

c) Área de cada filtro \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

### 10.6 Dosificación

#### a) Coagulante

Cual:

Sulfato de aluminio

Cloruro férrico

Policloruro de aluminio (PAC)

Sulfato ferroso o férrico

Otro \_\_\_\_\_

Tipo de dosificador en solución:

Gravimétrico

Volumétrico

Número de dosificadores\_\_\_\_\_

**b) Modificador del ph:**

Cual:

Oxido de calcio (cal viva)

Hidróxido de calcio

Carbonato de sodio

Hidróxido de sodio

Otro\_\_\_\_\_

Tipo de dosificador del modificador de ph en solución:

Gravimétrico

Volumétrico

Número de dosificadores\_\_\_\_\_

**d) Desinfectante:**

Cual:

Cloro liquido

Cloro gaseoso

Ozono

Permanganato de potasio.

Tipo de dosificador en solución:

Bombas inyectoras

Hidroeyectores

Número dosificadores: \_\_\_\_\_

**E. OBSERVACIONES**

Indicar cualquier situación extraordinaria observada en la planta de tratamiento. Como también los aspectos relevantes que no se encuentren enumerados en la ficha de inspección, y que sean determinantes para un diagnóstico adecuado de la planta.

## **F. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR**

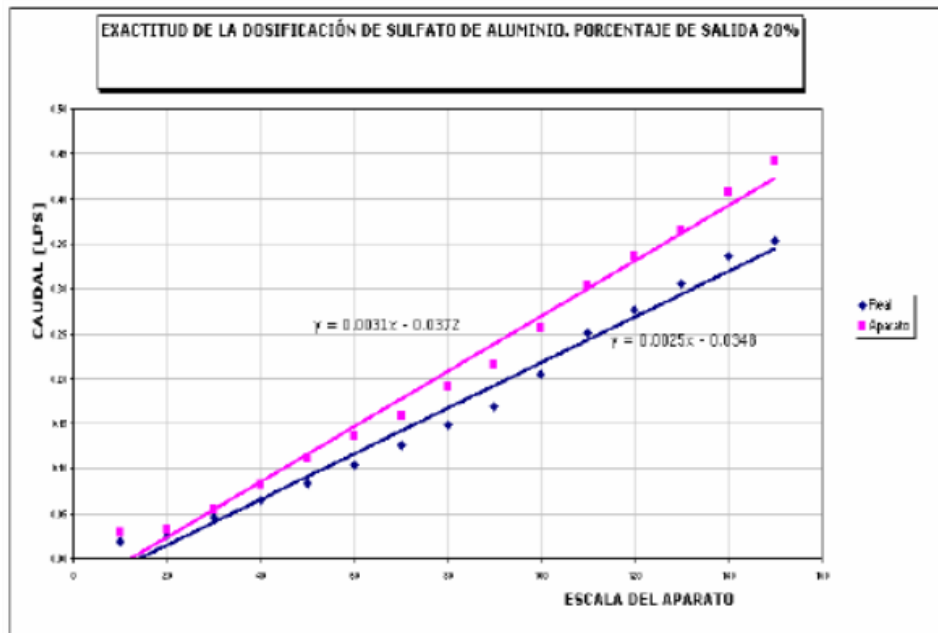
Se efectuará sobre la base de todo lo observado y la información procesada y se indicará cuáles son los procesos más críticos cuyas unidades requieren ser evaluadas con profundidad para determinar el origen de los problemas.

## ANEXO B. Calibración de dosificador de sulfato.

Calibración del dosificador de sulfato de aluminio sólido.

ESCALA DEL APARATO	VOLUMEN (L)	TIEMPO PROM(SEG)	Q <sub>R</sub> (Lps)	Q <sub>T</sub> (Lps)
<b>porcentaje de salida 20%</b>				
10	1.2	66.59	0.02	0.03
20	1.2	45.41	0.03	0.03
30	1.2	25.72	0.05	0.06
40	1.2	18.54	0.06	0.08
50	1.2	14.21	0.08	0.11
60	1.2	11.47	0.10	0.14
70	1.2	9.50	0.13	0.16
80	1.2	8.09	0.15	0.19
90	1.2	7.10	0.17	0.22
100	1.2	5.88	0.20	0.26
110	1.2	4.78	0.25	0.30
120	1.2	4.34	0.28	0.34
130	1.2	3.93	0.31	0.37
140	1.2	3.57	0.34	0.41
150	1.2	3.40	0.35	0.44

Calibración del dosificador de sulfato.



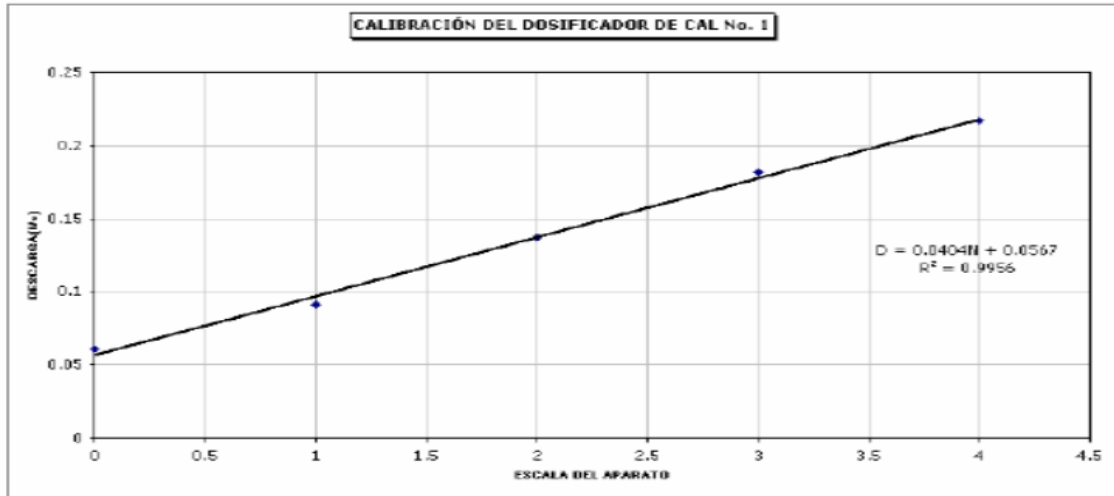
### ANEXO C. Calibración de dosificador de cal.

Calibración del dosificador de cal. Dosificador de Cal No. 1.

ESCALA DEL APARATO	VOLUMEN (l)	TIEMPO PROMEDIO (Seg)	DESCARGA (l/s)
0	1.2	19.77	0.0606
1	1.2	13.19	0.0909
2	1.2	8.703	0.137
3	1.2	6.576	0.182
4	1.2	5.523	0.217

Calibración de los dosificadores de cal. Dosificador de Cal No. 2.

ESCALA DEL APARATO	VOLUMEN (l)	TIEMPO PROMEDIO (Seg)	DESCARGA (l/s)
0	1.2	20.17	0.0594
1	1.2	13.076	0.0917
2	1.2	8.756	0.137
3	1.2	6.966	0.172
4	1.2	5.313	0.226



## ANEXO D. Eficiencia de la mezcla rápida.

### Ensayo de jarras para determinar la eficiencia del proceso de mezcla rápida:

- 1. Equipo de jarras:** Volumen de las jarras: 2000 ml
- 2. Agua cruda:** Turbiedad: 120 UNT Color: 396 UPC Ph: 8.11 Alcalinidad: 58.2 mg/l CaCO<sub>3</sub>
- 3. Dosis optima de coagulante:** Coagulante Sulfato de aluminio: 35 ppm
- 4. Mezcla Rápida optima:** Velocidad: 90 rpm Gradiente de velocidad:110 s-1 Tiempo de mezcla:80 seg
- 5. Floculación:** Velocidad: 40 rpm Gradiente de velocidad:33 s-1 Tiempo de mezcla:15 min
- 6. Sedimentación:** Tiempo: 10 min Profundidad de la muestra: 10 cm.

LABORATORIO		PLANTA	
Mezcla rápida, floculación y sedimentación		Mezcla Rápida Planta Bosconia. Laboratorio floculación y sedimentación	
Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)	Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)
1	1.7	1	4.1
2	1.5	2	2.6
3	1.4	3	4.1
Turbiedad promedio	1.5	Turbiedad promedio	3.8

### Ensayo de jarras para determinar la eficiencia del proceso de mezcla rápida:

- 1. Equipo de jarras:** Volumen de las jarras: 2000 ml
- 2. Agua cruda:** Turbiedad: 250 UNT Color: 371 UPC Ph: 8.19 Alcalinidad: 55.8 mg/l CaCO<sub>3</sub>
- 3. Dosis optima de coagulante:** Coagulante Sulfato de aluminio: 50 ppm
- 4. Mezcla Rápida optima:** Velocidad: 100 rpm Gradiente de velocidad:130 s-1 Tiempo de mezcla:100 seg

**5. Floculación:** Velocidad:40 rpm Gradiente de velocidad:33 s-1 Tiempo de mezcla:15 min

**6. Sedimentación:** Tiempo: 10 min Profundidad de la muestra: 10 cm.

LABORATORIO		PLANTA	
Mezcla rápida, floculación y sedimentación		Mezcla Rápida Planta Bosconia. Laboratorio floculación y sedimentación	
Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)	Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)
1	2.5	1	4.0
2	2.3	2	4.7
3	1.7	3	3.5
Turbiedad promedio	2.2	Turbiedad promedio	4.06

#### ANEXO E. Eficiencia de la flocucion.

**Ensayo de jarras para determinar la eficiencia del proceso de floculación:**

**1. Equipo de jarras:** Volumen de las jarras: 2000 ml

**2. Agua cruda:** Turbiedad: 23 UNT Color:87 UPC pH:8.0 Alcalinidad: 63 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**3. Dosis optima de coagulante:** Coagulante Sulfato de aluminio:20 ppm

**4. Mezcla Rápida optima:** Velocidad:80 rpm Gradiente de velocidad: 100 s-1  
Tiempo de mezcla: 60 seg

**5. Floculación optima:** Velocidad:30 rpm Gradiente de velocidad:23 s-1 Tiempo de mezcla:24 min

**6. Sedimentación:** Tiempo:10 min Profundidad de la muestra: 10 cm.

LABORATORIO		PLANTA	
Mezcla rápida, floculación y sedimentación		Mezcla Rápida floculación Planta Bosconia sedimentación : 10 min	
Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)	Muestra No.	Turbiedad Residual (UNT)
1	1.2	1	5.5
2	0.8	2	4.7
3	2.3	3	6.0
Turbiedad promedio	1.4	Turbiedad promedio	5.4

**Ensayo de jarras para determinar la eficiencia del proceso de floculación:**

1. **Equipo de jarras:** Volumen de las jarras: 2000 ml
2. **Agua cruda:** Turbiedad: 120 UNT Color: 396 UPC pH:8.11 Alcalinidad: 58.2 mg/l CaCO<sub>3</sub>
3. **Dosis optima de coagulante:** Coagulante Sulfato de aluminio:35 ppm
4. **Mezcla Rápida optima:** Velocidad: 90 rpm Gradiente de velocidad: 110 s-1Tiempo de mezcla: 80
5. **Floculación optima:** Velocidad: 20 rpm Gradiente de velocidad: 13s-1 Tiempo de mezcla:24 min
6. **Sedimentación:** Tiempo: 10 min Profundidad de la muestra: 10 cm.

#### **ANEXO F. Ensayo con trazadores.**

Condiciones hidráulicas de los canales que comunican a los Floculadores:

**Tiempo de retención mezcla rápida-compuerta. Floculador 1.**

N. Muestra	Tiempo (seg)	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co
1	5	172	0	0
2	10	172	0	0
3	15	890	718	718
4	20	3900	3728	4446
5	25	5700	5528	9974
6	30	5300	5128	15102
7	35	4400	4228	19330
8	40	3500	3328	22658
9	45	2960	2788	25446
10	50	2170	1998	27444
11	55	1570	1398	28842
12	60	1390	1218	30060

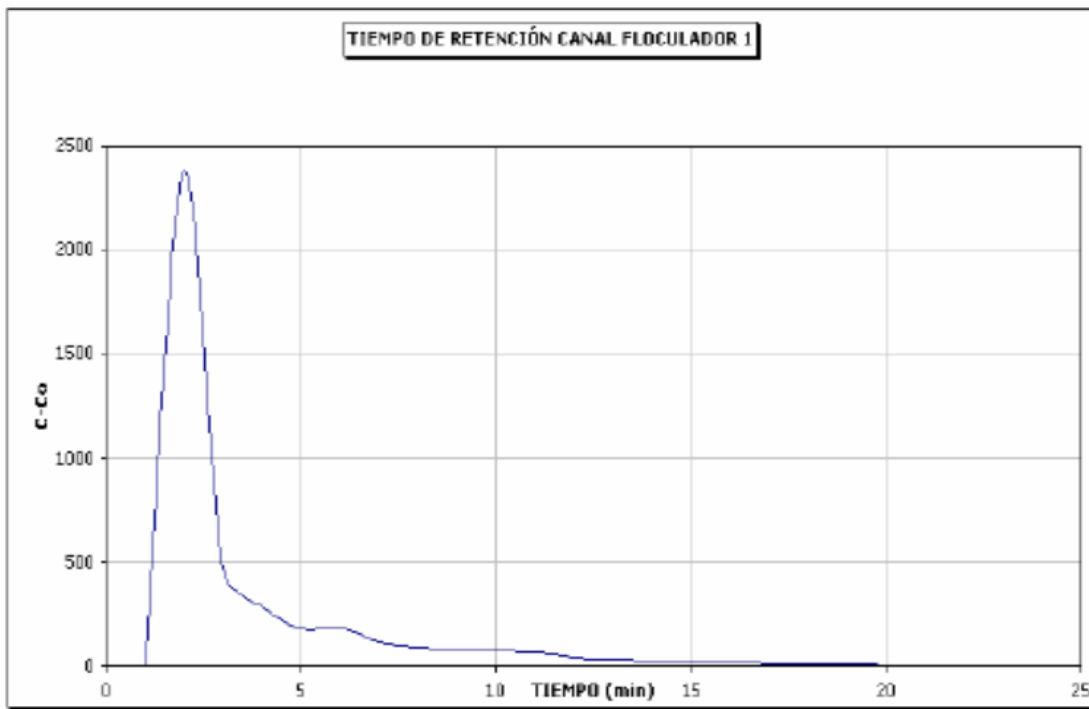
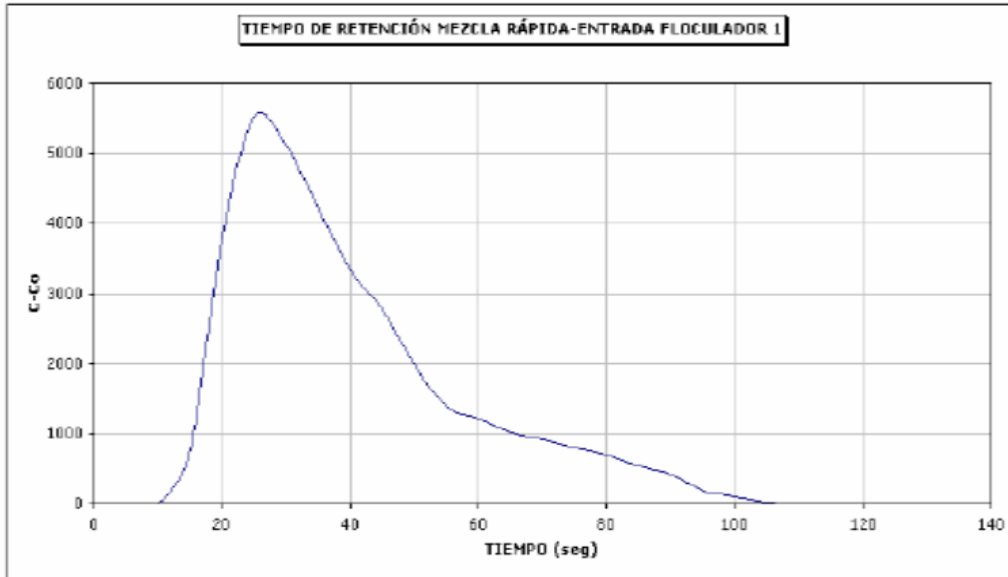
13	65	1180	1008	31068
14	70	1080	908	31976
15	75	970	798	32774
16	80	863	691	33465
17	85	702	530	33995
18	90	581	409	34404
19	95	346	174	34578
20	100	275	103	34681
21	105	197	25	34706
22	110	178	6	34712
23	115	172	0	34712
24	120	172	0	34712

Tiempo de retención: 25 segundos.

Tiempo de retención de la compuerta a la entrada al al Floculador 1

N. Muestra	Tiempo (min)	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co
1	1	172	0	0
2	2	2551	2379	2379
3	3	646	474	2853
4	4	459	287	3140
5	5	355	183	3323
6	6	356	184	3507
7	7	290	118	3625
8	8	264	92	3717
9	9	245	73	3790
10	10	243	71	3861
11	11	238	66	3927
12	12	213	41	3968
13	13	202	30	3998
14	14	200	28	4026
15	15	192	20	4046
16	16	189	17	4063
17	17	181	9	4072
18	18	178	6	4078
19	19	177	5	4083
20	20	174	2	4085
21	21	173	1	4086
22	22	172	0	4086
23	23	172	0	4086

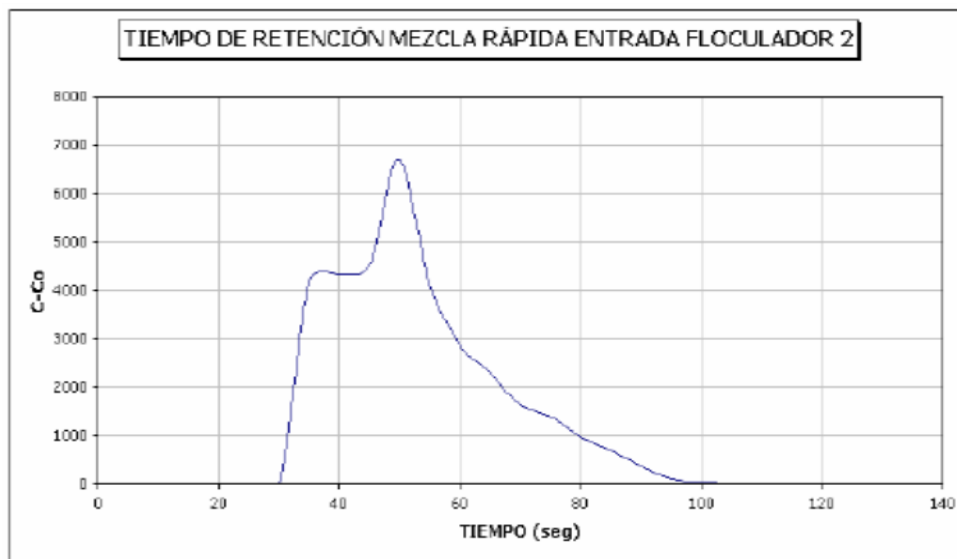
Tiempo de retención: 2 minutos



**Tiempo de retención canal que comunica alFloculador 2.**

N. muestra	Tiempo (seg)	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co
1	5	172	0	0
2	10	172	0	0
3	15	172	0	0
4	20	172	0	0
5	25	172	0	0
6	30	174	2	2
7	35	4400	4228	4230
8	40	4500	4328	8558
9	45	4700	4528	13086
10	50	6860	6688	19774
11	55	4300	4128	23902
12	60	3020	2848	26750
13	65	2480	2308	29058
14	70	1816	1644	30702
15	75	1570	1398	32100
16	80	1140	968	33068
17	85	860	688	33756
18	90	540	368	34124
19	95	297	125	34249
20	100	200	28	34277
21	105	185	13	34290
22	110	172	0	34290
23	115	172	0	34290

Tiempo de retención: 50 segundos



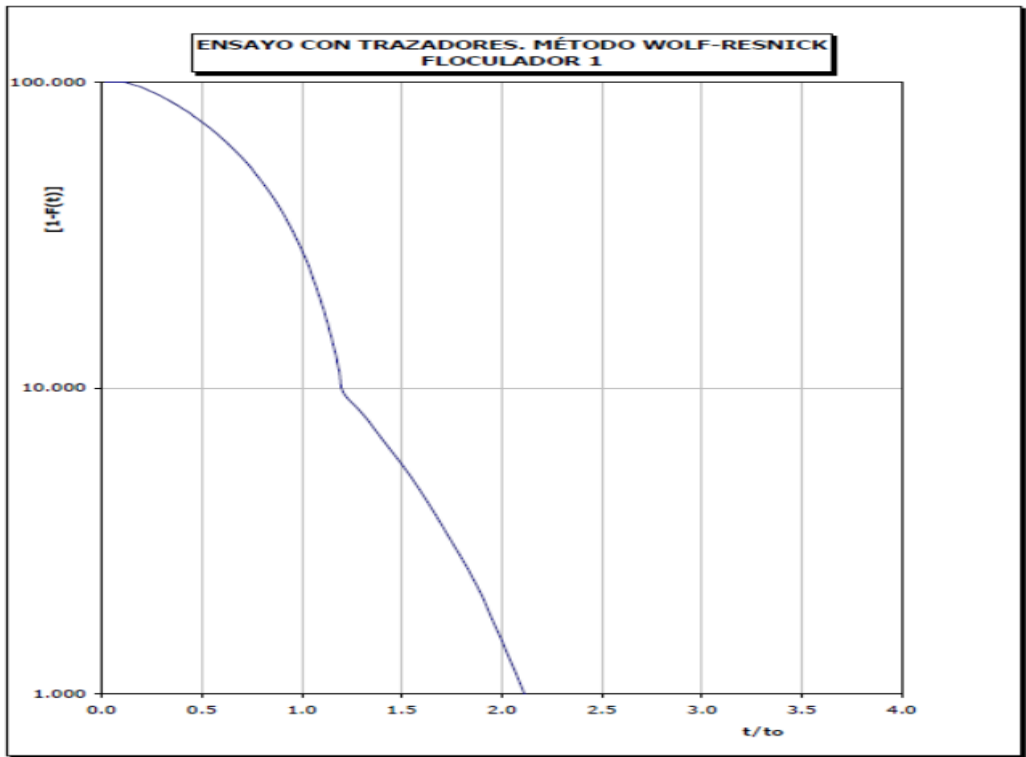
## ANEXO G. Ensayo con trazadores.

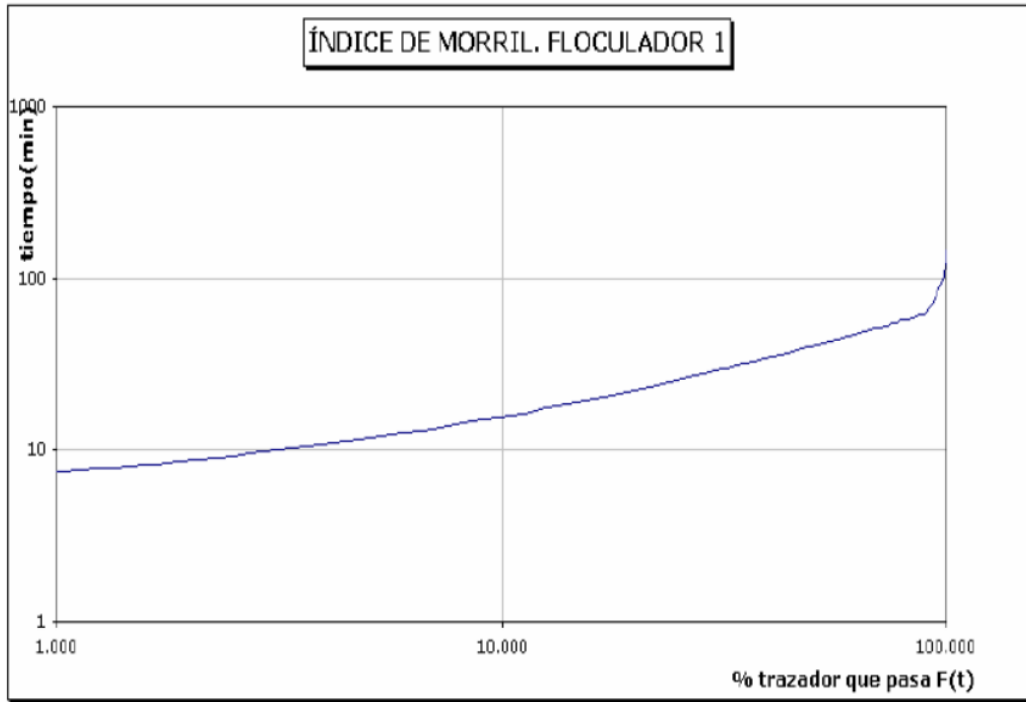
Condiciones hidráulicas del floculador 1.

Resultado prueba de trazadores floculador 1.

N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	1	0.019	172	0	0	0.000	100.000
2	2	0.038	172	0	0	0.000	100.000
3	3	0.058	172	0	0	0.000	100.000
4	4	0.077	172	0	0	0.000	100.000
5	5	0.096	172	0	0	0.000	100.000
6	6	0.115	172	0	0	0.000	100.000
7	7	0.134	193	21	21	0.699	99.301
8	8	0.153	195	23	44	1.464	98.536
9	9	0.173	197	25	69	2.295	97.705
10	10	0.192	197	25	94	3.127	96.873
11	11	0.211	204	32	126	4.192	95.808
12	12	0.230	208	36	162	5.389	94.611
13	13	0.249	210	38	200	6.653	93.347
14	14	0.269	210	38	238	7.917	92.083
15	15	0.288	211	39	277	9.215	90.785
16	16	0.307	212	40	317	10.546	89.454
17	17	0.326	214	42	359	11.943	88.057
18	18	0.345	214	42	401	13.340	86.660
19	19	0.365	215	43	444	14.770	85.230
20	20	0.384	215	43	487	16.201	83.799
21	21	0.403	218	46	533	17.731	82.269
22	22	0.422	218	46	579	19.261	80.739
23	23	0.441	218	46	625	20.792	79.208
24	24	0.460	218	46	671	22.322	77.678
25	25	0.480	219	47	718	23.886	76.114
26	26	0.499	219	47	765	25.449	74.551
27	27	0.518	220	48	813	27.046	72.954
28	28	0.537	221	49	862	28.676	71.324
29	29	0.556	221	49	911	30.306	69.694
30	30	0.576	223	51	962	32.003	67.997
31	31	0.595	223	51	1013	33.699	66.301
32	32	0.614	223	51	1064	35.396	64.604
33	33	0.633	223	51	1115	37.092	62.908
34	34	0.652	224	52	1167	38.822	61.178
35	35	0.672	224	52	1219	40.552	59.448
36	36	0.691	224	52	1271	42.282	57.718
37	37	0.710	225	53	1324	44.045	55.955
38	38	0.729	225	53	1377	45.808	54.192
39	39	0.748	225	53	1430	47.572	52.428
N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)

40	40	0.767	226	54	1484	49.368	50.632
41	41	0.787	226	54	1538	51.164	48.836
42	42	0.806	226	54	1592	52.961	47.039
43	43	0.825	227	55	1647	54.790	45.210
44	44	0.844	227	55	1702	56.620	43.380
45	45	0.863	227	55	1757	58.450	41.550
46	46	0.883	227	55	1812	60.279	39.721
47	47	0.902	227	55	1867	62.109	37.891
48	48	0.921	229	57	1924	64.005	35.995
49	49	0.940	228	56	1980	65.868	34.132
50	50	0.959	228	56	2036	67.731	32.269
51	51	0.979	228	56	2092	69.594	30.406
52	52	0.998	226	54	2146	71.391	28.609
53	53	1.017	226	54	2200	73.187	26.813
54	54	1.036	226	54	2254	74.983	25.017
55	55	1.055	226	54	2308	76.780	23.220
56	56	1.074	225	53	2361	78.543	21.457
57	57	1.094	225	53	2414	80.306	19.694
58	58	1.113	224	52	2466	82.036	17.964
59	59	1.132	224	52	2518	83.766	16.234
60	60	1.151	222	50	2568	85.429	14.571
61	61	1.170	221	49	2617	87.059	12.941
62	62	1.190	222	50	2667	88.723	11.277
63	63	1.209	220	48	2715	90.319	9.681
64	68	1.305	216	44	2759	91.783	8.217
65	73	1.401	213	41	2800	93.147	6.853
66	78	1.497	207	35	2835	94.311	5.689
67	83	1.592	204	32	2867	95.376	4.624
68	88	1.688	200	28	2895	96.307	3.693
69	93	1.784	196	24	2919	97.106	2.894
70	98	1.880	192	20	2939	97.771	2.229
71	103	1.976	190	18	2957	98.370	1.630
72	108	2.072	186	14	2971	98.836	1.164
73	113	2.168	183	11	2982	99.202	0.798
74	118	2.264	180	8	2990	99.468	0.532
75	123	2.360	178	6	2996	99.667	0.333
76	128	2.456	177	5	3001	99.834	0.166
77	133	2.552	175	3	3004	99.933	0.067
78	138	2.648	174	2	3006	100.000	0.000
79	143	2.744	172	0	3006	100.000	0.000
80	148	2.840	172	0	3006	100.000	0.000





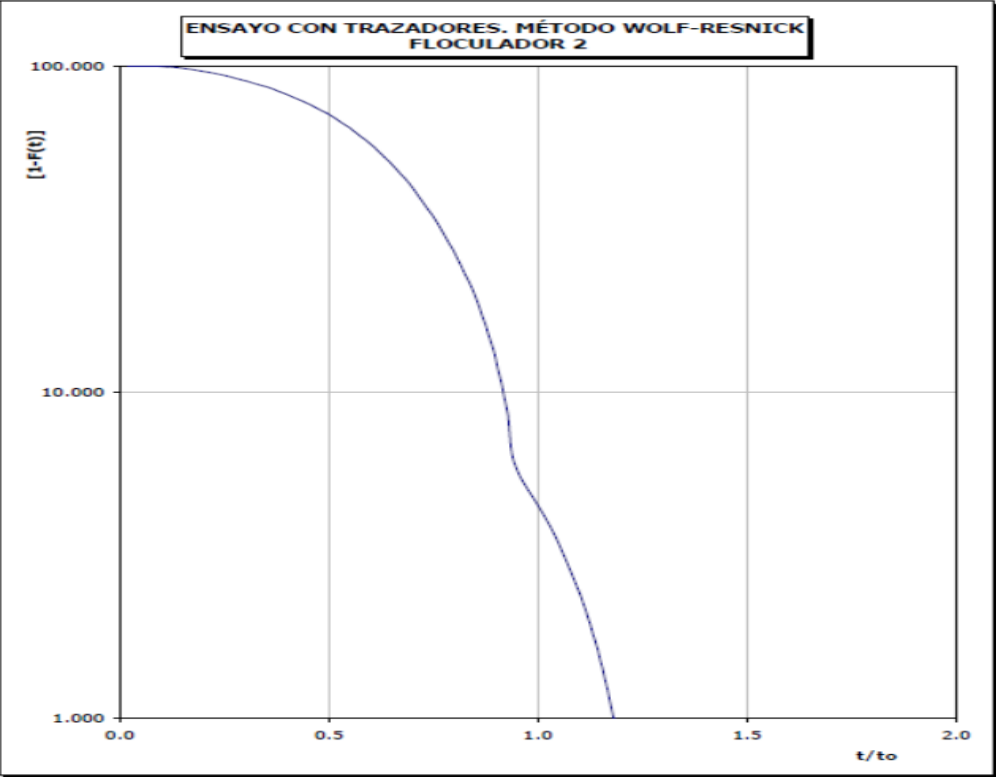
## ANEXO H. Ensayo con trazadores.

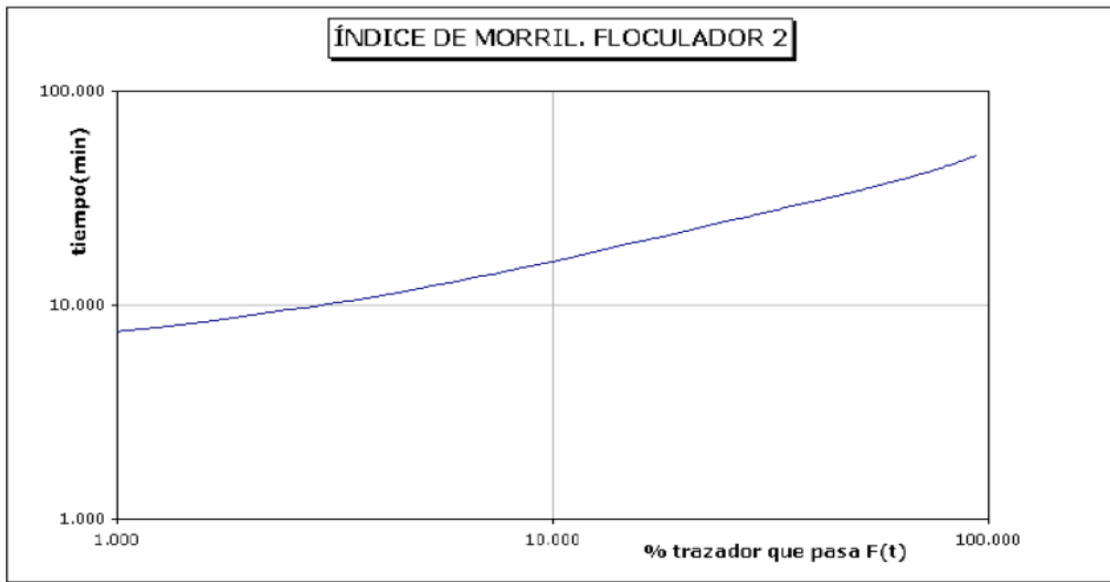
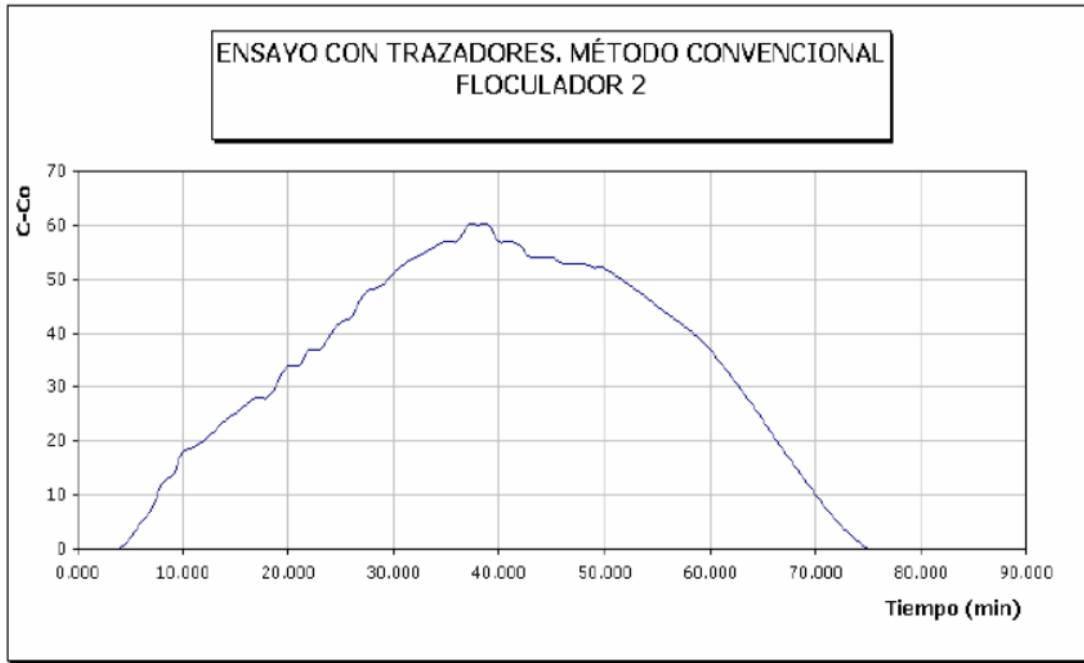
Condiciones hidráulicas del floculador 2.

N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	1.000	0.019	153.000	0	0	0.000	100.000
2	2.000	0.038	153.000	0	0	0.000	100.000
3	3.000	0.057	153.000	0	0	0.000	100.000
4	4.000	0.076	153.000	0	0	0.000	100.000
5	5.000	0.095	155.000	2	2	0.102	99.898
6	6.000	0.114	158.000	5	7	0.356	99.644
7	7.000	0.133	160.000	7	14	0.712	99.288
8	8.000	0.152	165.000	12	26	1.322	98.678
9	9.000	0.171	167.000	14	40	2.034	97.966
10	10.000	0.190	171.000	18	58	2.949	97.051
11	11.000	0.208	172.000	19	77	3.915	96.085
12	12.000	0.227	173.000	20	97	4.931	95.069
13	13.000	0.246	175.000	22	119	6.050	93.950
14	14.000	0.265	177.000	24	143	7.270	92.730
15	15.000	0.284	178.000	25	168	8.541	91.459
16	16.000	0.303	180.000	27	195	9.914	90.086
17	17.000	0.322	181.000	28	223	11.337	88.663
18	18.000	0.341	181.000	28	251	12.761	87.239
19	19.000	0.360	184.000	31	282	14.337	85.663
20	20.000	0.379	187.000	34	316	16.065	83.935
21	21.000	0.398	187.000	34	350	17.794	82.206
22	22.000	0.417	190.000	37	387	19.675	80.325
23	23.000	0.436	190.000	37	424	21.556	78.444
24	24.000	0.455	193.000	40	464	23.589	76.411
25	25.000	0.474	195.000	42	506	25.724	74.276
26	26.000	0.493	196.000	43	549	27.911	72.089
27	27.000	0.512	200.000	47	596	30.300	69.700
28	28.000	0.531	201.000	48	644	32.740	67.260
29	29.000	0.550	202.000	49	693	35.231	64.769
30	30.000	0.569	204.000	51	744	37.824	62.176
31	31.000	0.588	206.000	53	797	40.519	59.481
32	32.000	0.607	207.000	54	851	43.264	56.736
33	33.000	0.625	208.000	55	906	46.060	53.940
34	34.000	0.644	209.000	56	962	48.907	51.093
35	35.000	0.663	210.000	57	1019	51.805	48.195
36	36.000	0.682	210.000	57	1076	54.703	45.297
37	37.000	0.701	213.000	60	1136	57.753	42.247
38	38.000	0.720	213.000	60	1196	60.803	39.197
39	39.000	0.739	213.000	60	1256	63.854	36.146
N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)
40	40.000	0.758	210.000	57	1313	66.751	33.249
41	41.000	0.777	210.000	57	1370	69.649	30.351
42	42.000	0.796	209.000	56	1426	72.496	27.504

43	43.000	0.815	207.000	54	1480	75.241	24.759
44	44.000	0.834	207.000	54	1534	77.987	22.013
45	45.000	0.853	207.000	54	1588	80.732	19.268
46	46.000	0.872	206.000	53	1641	83.427	16.573
47	47.000	0.891	206.000	53	1694	86.121	13.879
48	48.000	0.910	206.000	53	1747	88.815	11.185
49	49.000	0.929	205.000	52	1799	91.459	8.541
50	50.000	0.948	205.000	52	1851	94.103	5.897
51	55.000	1.042	198.000	45	1896	96.390	3.610
52	60.000	1.137	190.000	37	1933	98.271	1.729
53	65.000	1.232	177.000	24	1957	99.492	0.508
54	70.000	1.327	163.000	10	1967	100.000	0.000
55	75.000	1.422	153.000	0	1967	100.000	0.000
56	80.000	1.516	153.000	0	1967	100.000	0.000

Resultado prueba de trazadores floculador 2.

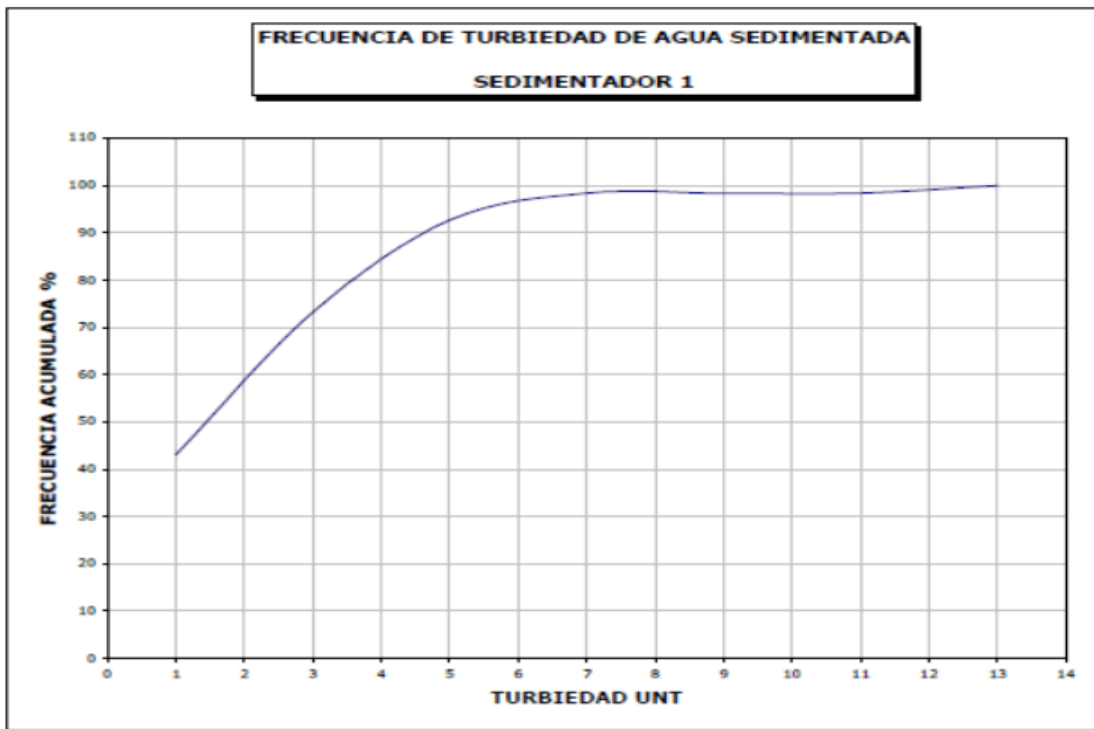




**ANEXO I. Eficiencia de los sedimentadores en función del agua sedimentada.**

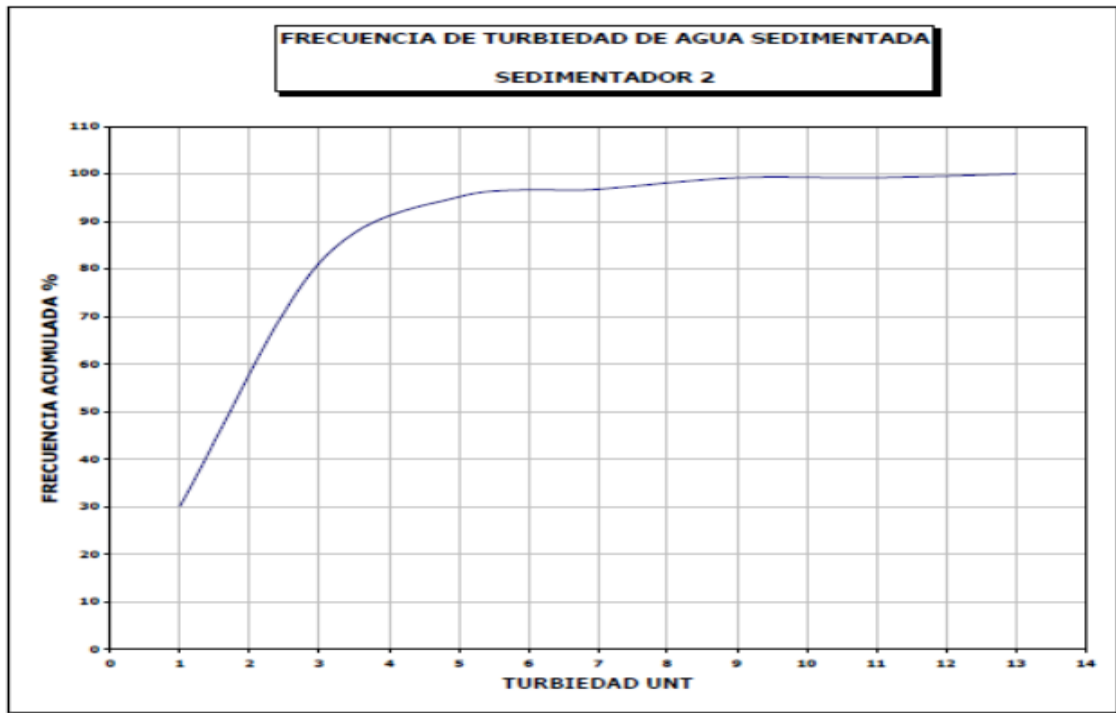
### Calidad del agua sedimentada sedimentador 1.

RANGO	P.M	FRECUENCIA		
		PARCIAL	ACUMULADA	%
0-1.99	1	53	53	43.08
2.0-3.99	3	37	90	73.17
4.0-5.99	5	24	114	92.68
6-7.99	7	7	121	98.37
8-9.99	9	0	121	98.37
10-11.99	11	0	121	98.37
12-13.99	13	2	123	100



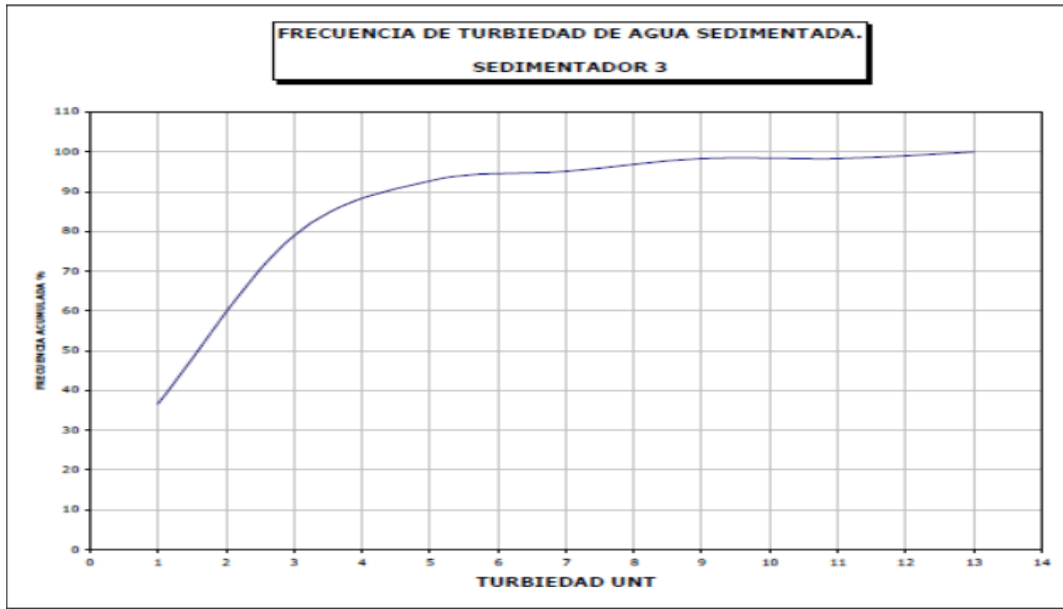
### Cálida del agua sedimentada. Sedimentador 2

RANGO	P.M	FRECUENCIA		
		PARCIAL	ACUMULADA	%
0-1.99	1	37	37	30.08
2.0-3.99	3	63	100	81.3
4.0-5.99	5	17	117	95.12
6-7.99	7	2	119	96.75
8-9.99	9	3	122	99.19
10-11.99	11	0	122	99.19
12-13.99	13	1	123	100



### Calidad del agua sedimentada, sedimentador 3.

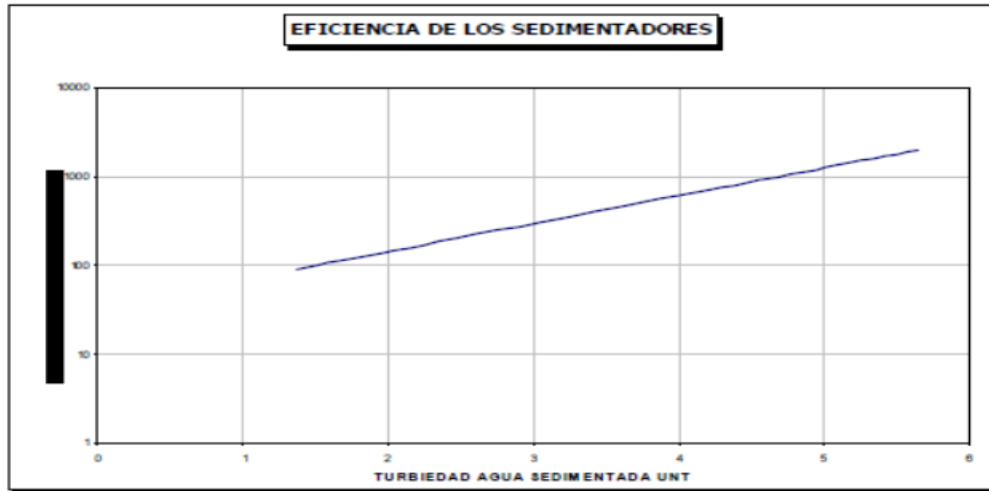
RANGO	P.M	FRECUENCIA		
		PARCIAL	ACUMULADA	%
0-1.99	1	45	45	36.58
2.0-3.99	3	52	97	78.86
4.0-5.99	5	17	114	92.68
6-7.99	7	3	117	95.12
8-9.99	9	4	121	98.37
10-11.99	11	0	121	98.37
12-13.99	13	2	123	100



Calidad agua sedimentada, sedimentador 4

RANGO	P.M	FRECUENCIA		
		PARCIAL	ACUMULADA	%
0-1.99	1	67	67	54.47
2.0-3.99	3	36	103	83.74
4.0-5.99	5	12	115	93.5
6-7.99	7	3	118	95.93
8-9.99	9	1	119	96.75
10-11.99	11	2	121	98.37
12-13.99	13	2	123	100

## ANEXO J. Eficiencia de la sedimentación en función del agua cruda.



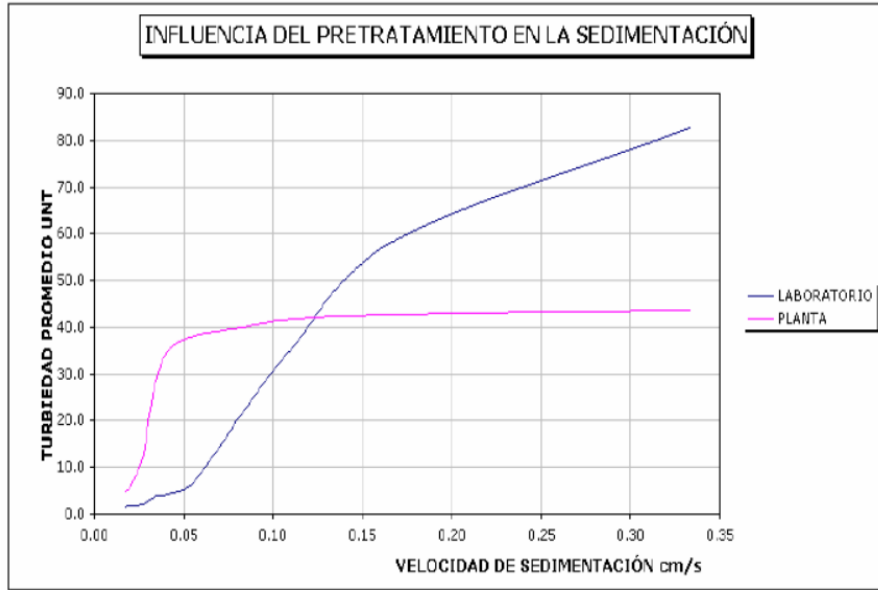
TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA UNT		VALORES MEDIOS DE TURBIEDAD DE AGUA SEDIMENTADA UNT	LOG(T <sub>ac</sub> )
RANGO	P.M		
(1)	(2)	(3)	(4)
0-49.9	25	1.30	1.40
50-99.9	75	1.50	1.88
100-149.9	125	1.80	2.10
150-199.9	175	2.00	2.24
200-249.9	225	2.20	2.35
250-299.9	275	2.60	2.44
300-349.9	325	2.90	2.51
350-399.9	375	3.00	2.57
400-499.9	425	3.00	2.63
500-599.9	550	3.40	2.74
600-699.9	650	3.70	2.81
700-799.9	750	3.90	2.88
800-999.9	900	4.90	2.95
1000-1199.9	1100	5.80	3.04

**ANEXO K. Ensayo de jarras para medir la eficiencia del sedimentador de Placas.**

**Ensayo de jarras para determinar la eficiencia del proceso de sedimentación en función del pretratamiento:**

- 1. Equipo de jarras:** Volumen de las jarras : 2000 ml
- 2. Agua cruda:** Turbiedad: 120 UNT Color : 396 UPC pH: 8.11 Alcalinidad : 58.2 mg/L CaCO<sub>3</sub>
- 3. Dosis optima de coagulante:** Coagulante Sulfato de aluminio : Sulfato de aluminio solución al 1 %
- 4. Sedimentación:** predeterminada.

LABORATORIO						PLANTA LABORATORIO			
Dosis óptima: 35 ppm    Velocidad: 90 rpm Tiempo: 80 seg Floculación    Velocidad: 20 rpm Tiempo: 24 min						Coagulación-floculación: Planta Bosconia			
T <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	Muestra No.			Prom.	Muestra No.			Prom.
(s)	(cm/s)	1	2	3	UNT	1	2	3	UNT
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
30	0.33	93.0	72.0	83.0	82.7	46.0	44.0	41.0	43.7
60	0.17	65.0	60.0	50.0	58.3	44.0	43.0	41.0	42.7
90	0.11	40.0	37.0	30.0	35.7	43.0	42.0	40.0	41.7
120	0.08	25.0	23.0	18.0	22.0	42.0	40.0	38.0	40.0
180	0.06	9.4	7.4	4.5	7.1	40.0	38.0	36.0	38.0
240	0.04	5.0	3.9	4.3	4.4	38.0	35.0	32.0	35.0
300	0.03	3.9	3.2	3.5	3.5	28.0	27.0	26.0	27.0
360	0.03	2.5	2.4	1.7	2.2	15.0	12.0	11.0	12.7
480	0.02	2.3	2.0	1.5	1.9	7.0	6.6	4.6	6.1
600	0.02	1.9	1.5	1.2	1.5	6.5	4.6	3.5	4.9



**TURBIEDAD REMOVIDA DE ACUERDO A LA CARGA SUPERFICIAL**

**To = 120 UNT**

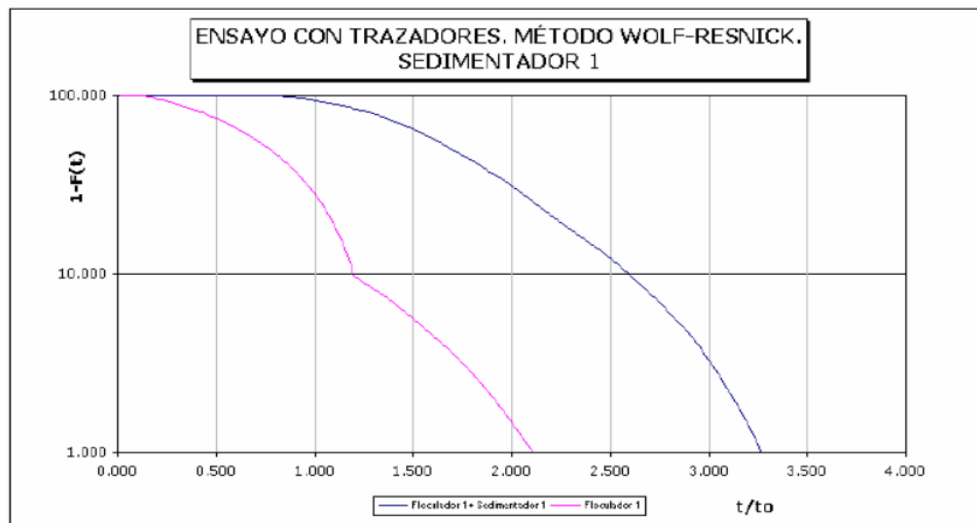
q m/d	Vs cm/s	Co	Rt	Tr UNT	Tf UNT
20	0.023	0.012	0.9963	119.56	0.44
30	0.035	0.033	0.9999	119.99	0.01
40	0.046	0.060	0.9957	119.48	0.52
50	0.058	0.091	0.9868	118.42	1.58
60	0.069	0.126	0.9748	116.97	3.03
70	0.081	0.164	0.9601	115.21	4.79
80	0.093	0.205	0.9434	113.21	6.79
90	0.104	0.249	0.9251	111.01	8.99
100	0.116	0.294	0.9054	108.65	11.35
110	0.127	0.340	0.8849	106.19	13.81
120	0.139	0.387	0.8637	103.65	16.35
130	0.150	0.434	0.8423	101.07	18.93
140	0.162	0.479	0.8208	98.50	21.50
150	0.174	0.524	0.7997	95.96	24.04
160	0.185	0.567	0.7792	93.50	26.50
170	0.197	0.607	0.7596	91.15	28.85
180	0.208	0.644	0.7413	88.95	31.05

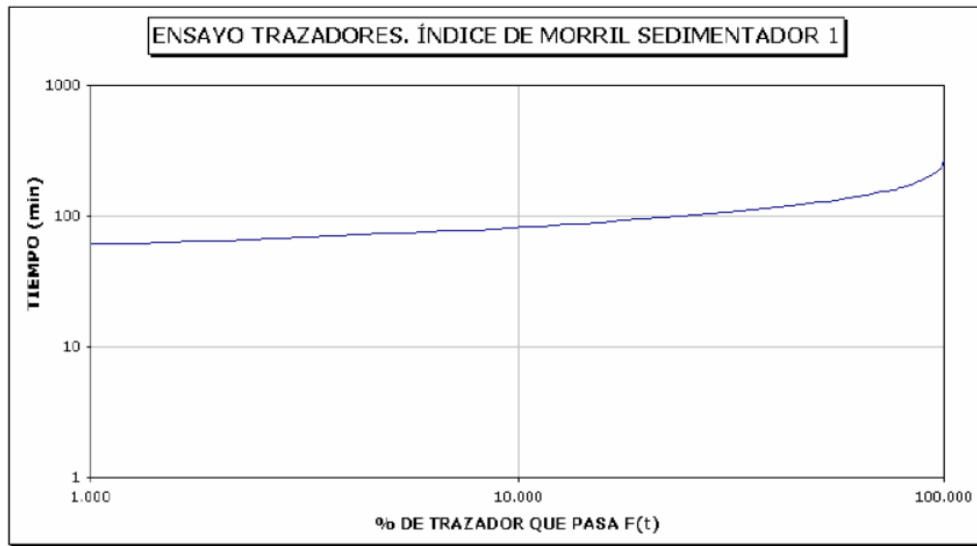
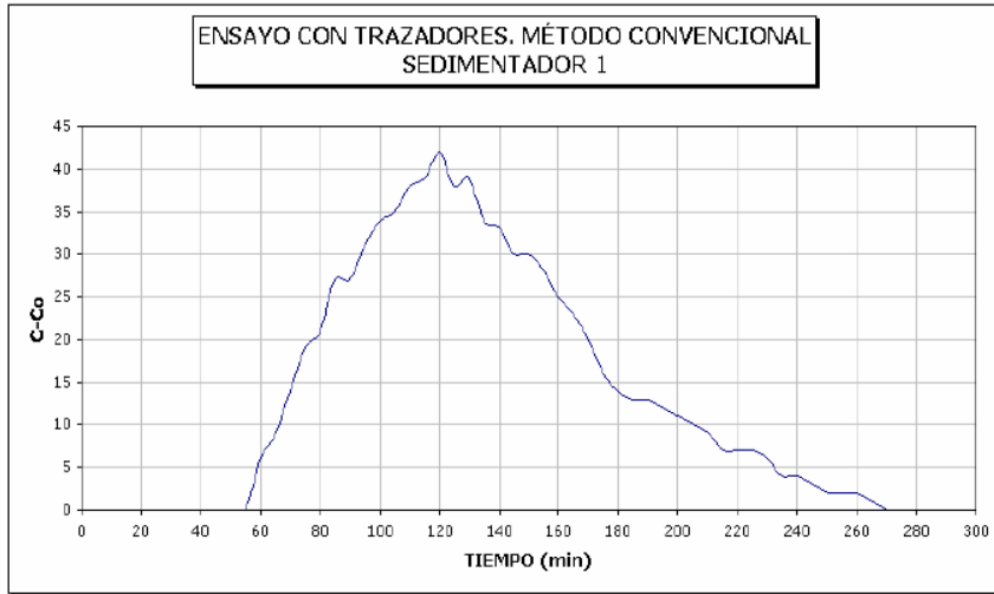
**ANEXO L. Ensayo con trazadores, determinación de las condiciones  
hidráulicas del sedimentador 1.**

Resultados prueba trazadores sedimentador 1

N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	5	0.067	172	0	0	0.000	100.000
2	10	0.134	172	0	0	0.000	100.000
3	15	0.201	172	0	0	0.000	100.000
4	20	0.269	172	0	0	0.000	100.000
5	25	0.336	172	0	0	0.000	100.000
6	30	0.403	172	0	0	0.000	100.000
7	35	0.470	172	0	0	0.000	100.000
8	40	0.537	172	0	0	0.000	100.000
9	45	0.604	172	0	0	0.000	100.000
10	50	0.672	172	0	0	0.000	100.000
11	55	0.739	172	0	0	0.000	100.000
12	60	0.806	178	6	6	0.764	99.236
13	65	0.873	181	9	15	1.911	98.089
14	70	0.940	186	14	29	3.694	96.306
15	75	1.007	191	19	48	6.115	93.885
16	80	1.074	193	21	69	8.790	91.210
17	85	1.142	199	27	96	12.229	87.771
18	90	1.209	199	27	123	15.669	84.331
19	95	1.276	203	31	154	19.618	80.382
20	100	1.343	206	34	188	23.949	76.051
21	105	1.410	207	35	223	28.408	71.592
22	110	1.477	210	38	261	33.248	66.752
23	115	1.544	211	39	300	38.217	61.783
24	120	1.612	214	42	342	43.567	56.433
25	125	1.679	210	38	380	48.408	51.592
26	130	1.746	211	39	419	53.376	46.624
27	135	1.813	206	34	453	57.707	42.293
28	140	1.880	205	33	486	61.911	38.089
29	145	1.947	202	30	516	65.732	34.268
30	150	2.015	202	30	546	69.554	30.446
31	155	2.082	200	28	574	73.121	26.879
32	160	2.149	197	25	599	76.306	23.694
33	165	2.216	195	23	622	79.236	20.764
34	170	2.283	192	20	642	81.783	18.217
35	175	2.350	188	16	658	83.822	16.178
36	180	2.417	186	14	672	85.605	14.395
37	185	2.485	185	13	685	87.261	12.739

N. Muestra	Tiempo(min)	T/To	C( $\Omega$ )	C-Co	$\Sigma$ C-Co	F(t)	1-F(t)
38	190	2.552	185	13	698	88.917	11.083
39	195	2.619	184	12	710	90.446	9.554
40	200	2.686	183	11	721	91.847	8.153
41	205	2.753	182	10	731	93.121	6.879
42	210	2.820	181	9	740	94.268	5.732
43	215	2.888	179	7	747	95.159	4.841
44	220	2.955	179	7	754	96.051	3.949
45	225	3.022	179	7	761	96.943	3.057
46	230	3.089	178	6	767	97.707	2.293
47	235	3.156	176	4	771	98.217	1.783
48	240	3.223	176	4	775	98.726	1.274
49	245	3.290	175	3	778	99.108	0.892
50	250	3.358	174	2	780	99.363	0.637
51	255	3.425	174	2	782	99.618	0.382
52	260	3.492	174	2	784	99.873	0.127
53	265	3.559	173	1	785	100.000	0.000
54	270	3.626	172	0	785	100.000	0.000
55	275	3.693	172	0	785	100.000	0.000

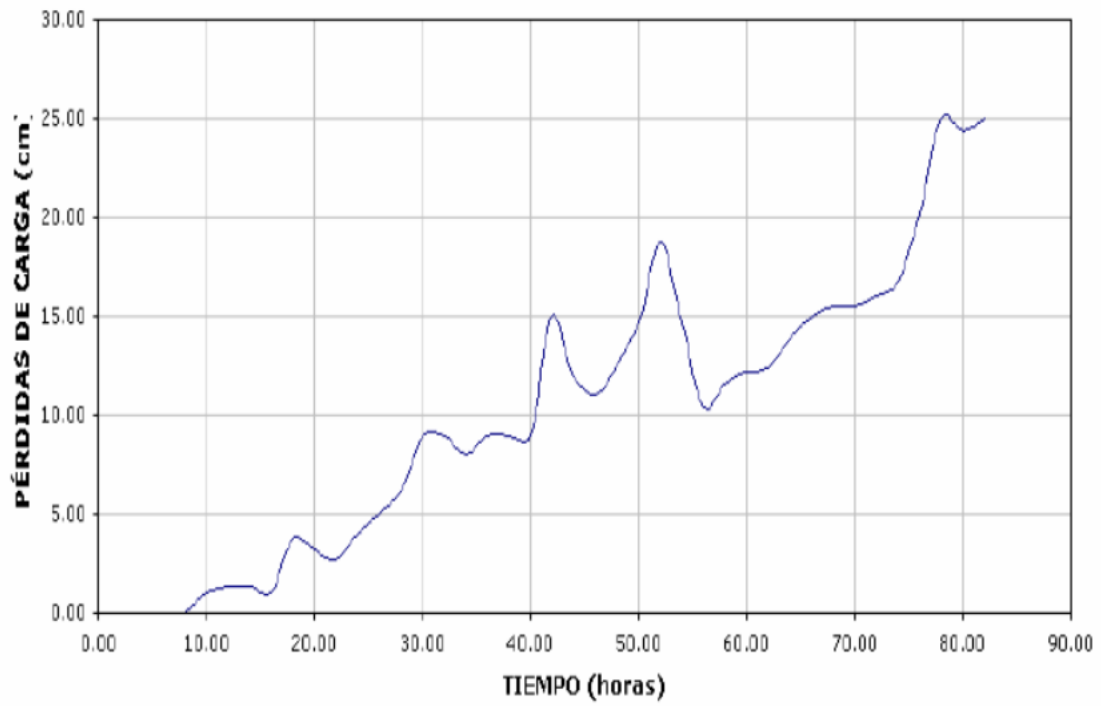




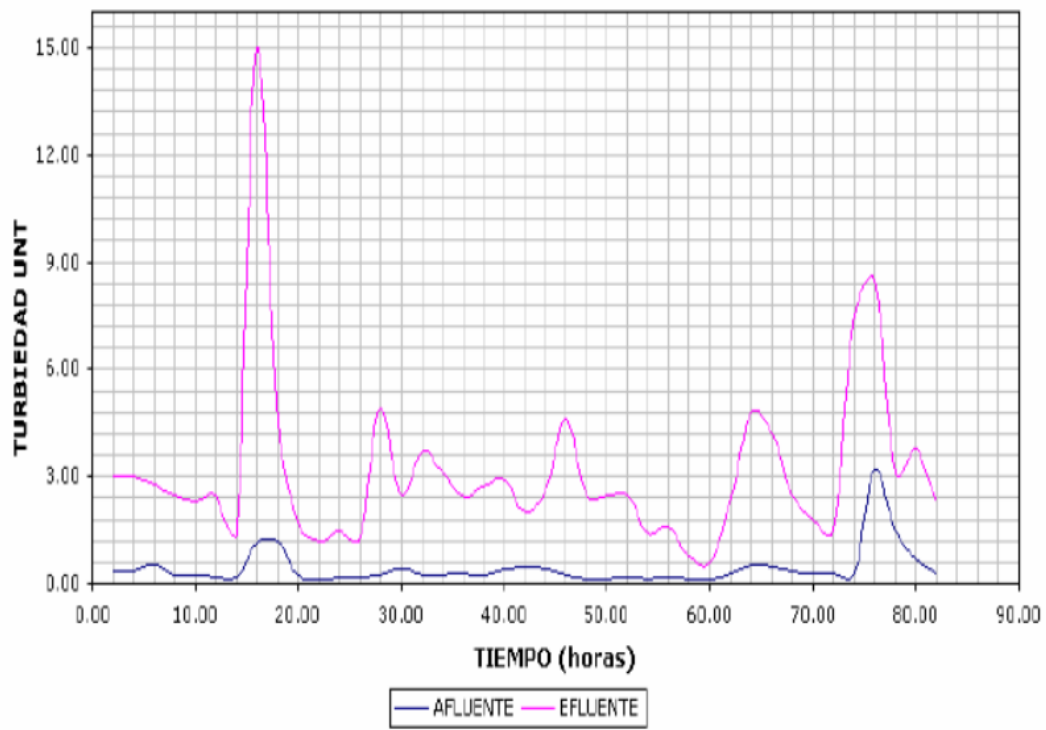
## ANEXO M. Pérdidas de carga del filtro 7.

FILTRO 7							
DÍA	HORA	NIVEL (cm)		PÉRDIDA DE CARGA(h) cm	TURBIEDAD UNT		OBSERVACIONES
		FILTRO	SALIDA FILTRO		AFLUENTE	EFLUENTE	
07-Nov-03	21:00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.35	
07-Nov-03	23:00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.35	
07-Nov-03	01:00	0.00	0.00	0.00	2.80	0.55	
07-Nov-03	03:00	0.00	0.00	0.00	2.50	0.22	suspendido tratamiento
07-Nov-03	10:00	1.00	0.00	1.00	2.30	0.21	inicio tratamiento
07-Nov-03	12:00	1.40	0.00	1.40	2.50	0.19	
07-Nov-03	14:00	1.40	0.00	1.40	1.50	0.17	
07-Nov-03	16:00	1.50	0.50	1.00	15.00	1.10	
07-Nov-03	18:00	4.00	0.30	3.70	4.60	1.20	
07-Nov-03	20:00	3.20	0.00	3.20	1.70	0.24	
07-Nov-03	22:00	3.40	0.70	2.70	1.20	0.14	
07-Nov-03	24:00	4.00	0.00	4.00	1.50	0.18	suspendido tratamiento
08-Nov-03	10:00	6.00	1.00	5.00	1.30	0.16	inicio tratamiento
08-Nov-03	12:00	7.30	1.00	6.30	4.90	0.24	
08-Nov-03	14:00	9.00	0.00	9.00	2.50	0.42	
08-Nov-03	16:00	9.00	0.00	9.00	3.70	0.25	
08-Nov-03	18:00	9.00	1.00	8.00	3.10	0.26	
08-Nov-03	20:00	10.00	1.00	9.00	2.40	0.29	
08-Nov-03	22:00	9.00	0.00	9.00	2.70	0.26	
08-Nov-03	24:00	9.00	0.00	9.00	2.90	0.40	
09-Nov-03	02:00	16.00	1.00	15.00	2.00	0.45	
09-Nov-03	04:00	13.00	1.00	12.00	2.60	0.39	suspendido tratamiento
09-Nov-03	12:00	12.00	1.00	11.00	4.60	0.24	inicio tratamiento
09-Nov-03	14:00	13.80	1.20	12.60	2.50	0.12	
09-Nov-03	16:00	16.00	1.30	14.70	2.50	0.12	
09-Nov-03	18:00	21.00	2.20	18.80	2.50	0.16	
09-Nov-03	20:00	16.00	1.30	14.70	1.40	0.12	suspendido tratamiento
10-Nov-03	07:00	11.40	1.00	10.40	1.60	0.15	inicio tratamiento
10-Nov-03	09:00	12.40	0.80	11.60	0.78	0.10	
10-Nov-03	11:00	13.00	0.80	12.20	0.58	0.11	
10-Nov-03	13:00	13.20	0.80	12.40	2.40	0.30	
10-Nov-03	15:00	14.00	0.00	14.00	4.80	0.55	
10-Nov-03	17:00	15.00	0.00	15.00	4.20	0.50	
10-Nov-03	19:00	16.00	0.50	15.50	2.50	0.33	suspendido tratamiento
11-Nov-03	06:00	16.00	0.50	15.50	1.80	0.32	inicio tratamiento
11-Nov-03	08:00	17.00	1.00	16.00	1.50	0.30	
11-Nov-03	10:00	17.80	1.00	16.80	7.50	0.28	
11-Nov-03	12:00	20.20	0.00	20.20	8.50	3.20	
11-Nov-03	14:00	25.50	0.50	25.00	3.10	1.50	
11-Nov-03	16:00	25.20	0.80	24.40	3.80	0.68	
11-Nov-03	18:00	25.80	0.80	25.00	2.30	0.27	

### PÉRDIDAS DE CARGA FILTRO 7



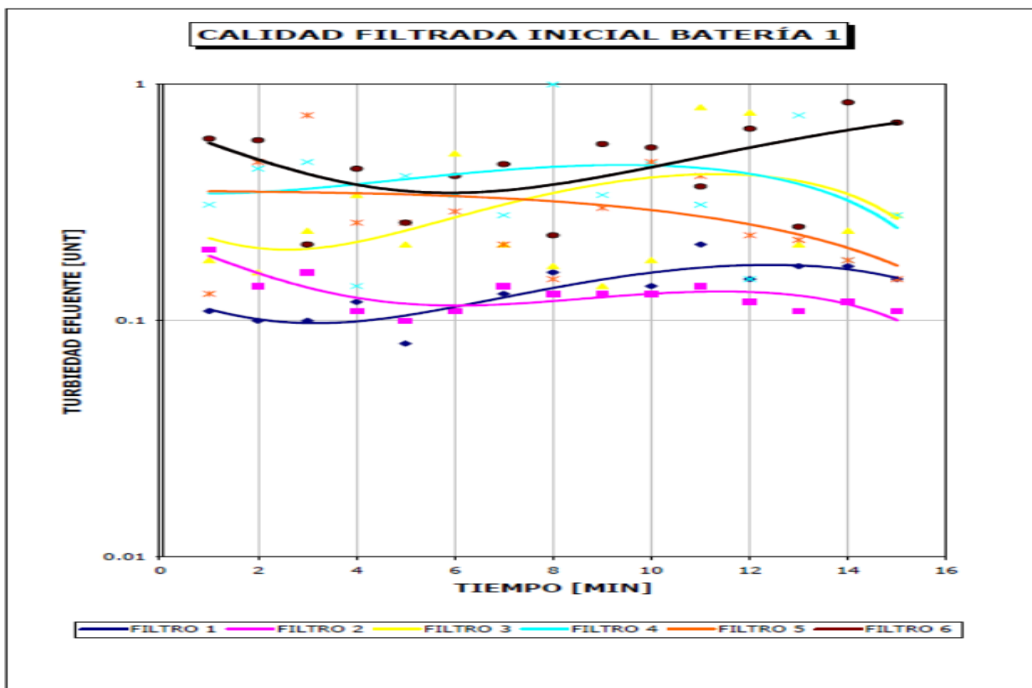
### TURBIEDAD DEL EFLUENTE, FILTRO 7



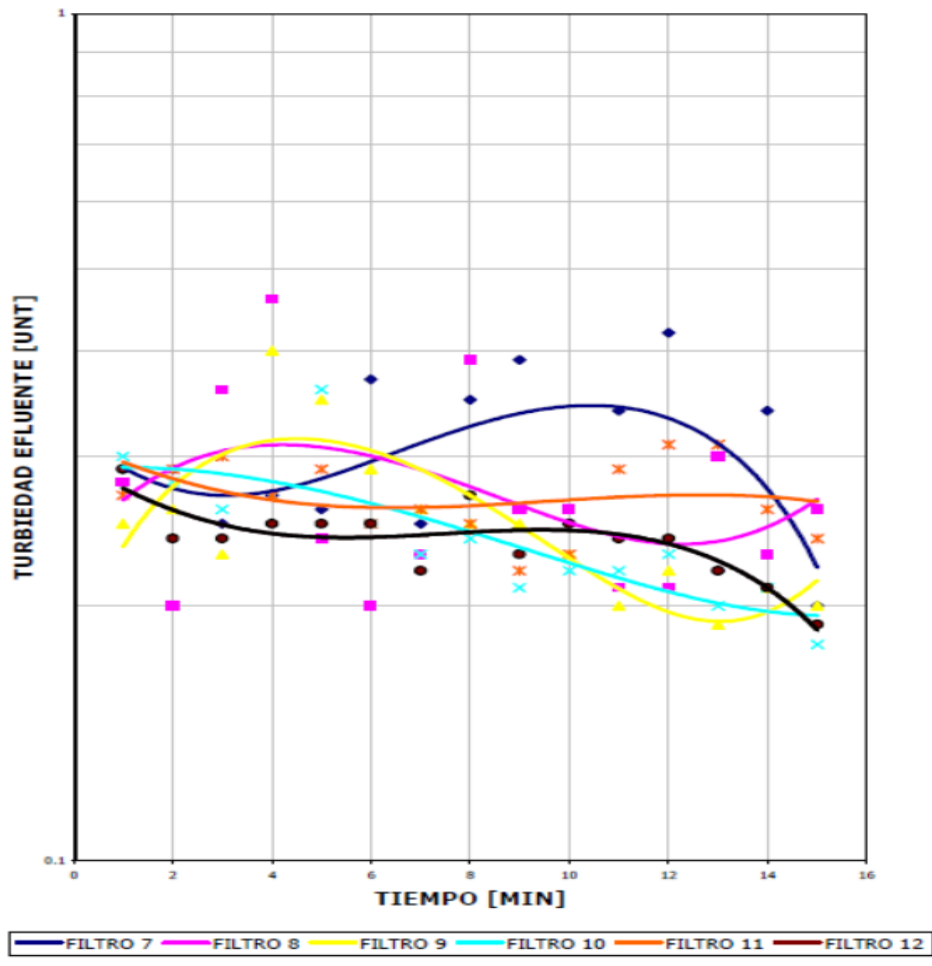
## ANEXO N. Calidad del filtrado inicial.

### CALIDAD DE AGUA FILTRADA

Filtro No.	TIEMPO DE TOMAS DE MUESTRAS (min)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	TURBIEDAD DE LAS MUESTRAS (UNT)														
1	0.11	0.1	0.1	0.12	0.08	0.11	0.13	0.16	0.13	0.14	0.21	0.15	0.17	0.17	0.15
2	0.2	0.14	0.16	0.11	0.1	0.11	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11
3	0.18	0.16	0.24	0.34	0.21	0.51	0.21	0.17	0.14	0.18	0.8	0.76	0.21	0.24	0.28
4	0.31	0.44	0.47	0.14	0.41	0.34	0.28	1.00	0.34	0.46	0.31	0.15	0.74	0.18	0.28
5	0.13	0.47	0.74	0.26	0.26	0.29	0.21	0.15	0.3	0.47	0.41	0.23	0.22	0.18	0.15
6	0.59	0.58	0.21	0.44	0.26	0.41	0.46	0.23	0.56	0.54	0.37	0.65	0.25	0.84	0.69
7	0.29	0.29	0.25	0.27	0.26	0.37	0.25	0.35	0.39	0.25	0.34	0.42	0.22	0.34	0.2
8	0.28	0.2	0.36	0.46	0.24	0.2	0.23	0.39	0.26	0.26	0.21	0.21	0.3	0.23	0.26
9	0.25	0.26	0.23	0.4	0.35	0.29	0.26	0.25	0.25	0.23	0.2	0.22	0.19	0.21	0.2
10	0.3	0.28	0.26	0.27	0.36	0.25	0.23	0.24	0.21	0.22	0.22	0.23	0.2	0.21	0.18
11	0.27	0.29	0.3	0.27	0.29	0.25	0.26	0.25	0.22	0.23	0.29	0.31	0.31	0.26	0.24
12	0.29	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.22	0.27	0.23	0.25	0.24	0.24	0.22	0.21	0.19



### CALIDAD FILTRADA INICIAL BATERÍA 2



## ANEXO O. Bolas de barro.

Porcentaje de bolas de barro.

FILTRO No.	VOLUMEN ml		% DE BOLAS DE BARRO	CONDICIONES DEL LECHO
	MUESTRA	BOLAS DE BARRO		
1	2345	11	0.47	BUENO
2	2345	9	0.38	BUENO
3	2345	8.5	0.36	BUENO
4	2345	9.8	0.42	BUENO
5	2345	10.6	0.45	BUENO
6	2345	11	0.47	BUENO
7	2345	10.4	0.44	BUENO
8	2345	11.6	0.49	BUENO
9	2345	8.7	0.37	BUENO
10	2345	9.7	0.41	BUENO
11	2345	10	0.43	BUENO
12	2345	10	0.43	BUENO

**ANEXO P. Duración del proceso de lavado en los filtros.**

TIEMPO DE MUESTREO(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	TURBIEDAD DE LAS MUESTRAS UNT										
FILTRO No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	57	500	1350	1000	700	300	63	41	26	20	14
2	10	24	1100	1100	210	95	55	28	30	26	21
3	28	192	1000	880	400	125	88	33	27	23	18
4	68	852	246	55	29	15	11	9.8	8.5	8	8
5	49	560	390	170	93	52	30	26	23	23	20
6	71	500	740	390	230	120	83	49	33	25	21
7	16	710	480	210	120	88	56	33	27	24	17
8	20	680	352	245	140	87	45	29	20	13	11
9	35	328	375	120	90	54	42	30	26	25	22
10	23	810	530	228	110	88	51	32	24	20	18
11	88	420	220	141	90	85	43	27	20	16	14
12	15	150	480	270	190	100	67	44	26	22	17

