

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE PUENGASÍ-EPMAPS-QUITO, E
INVESTIGACIÓN EN COLUMNA DE FILTRACIÓN PILOTO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

JOSÉ FERNANDO OJEDA NOLIVOS

ferojedano@yahoo.com

DIRECTOR: ING. MILTON EFRAÍN SILVA SALAZAR

milton.silva@epn.edu.ec

Quito, abril 2013

DECLARACIÓN

Yo, José Fernando Ojeda Nolivos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

JOSÉ FERNANDO OJEDA NOLIVOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Fernando Ojeda Nolivos, bajo mi supervisión.

Ing. Milton Silva S
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTOS

Al Gran Arquitecto del Universo, fuente de vida y sabiduría

Al ingeniero Milton Silva Salazar por su dirección, orientación y apoyo constante

A la ingeniera Ana Lucia Balarezo e ingeniero Luis Jaramillo por su guía y soporte

A la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), por el apoyo y facilidades técnicas brindadas.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional

Al personal de la Planta de Tratamiento de Puengasí que de diferentes maneras apoyaron en la evaluación y ejecución de las pruebas piloto.

A compañeros y amigos que me brindaron su apoyo

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hijos: Silvana, Lizabeth, Andrea y Byron

Fernando

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTADO DE CUADROS	XII
LISTADO DE GRÁFICOS.....	XIII
LISTADO DE PLANOS.....	XV
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS.....	XV
SIMBOLOGÍA.....	XVI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ	3
2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN QUITO.....	3
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN PITA.....	5
2.2.1 CUENCA DEL RÍO PITA.....	5
2.2.2 CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN.....	6
2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP	7
2.3.1 RESERVA DE AGUA CRUDA.....	8
2.3.2 MEZCLA RÁPIDA	8
2.3.3 CLARIFICADORES	9
2.3.3.1 Operación de los clarificadores.....	9

4.2.2.2.5	Tamaño mínimo	34
4.2.2.2.6	Tamaño máximo.....	34
4.2.2.3	Especificaciones de los materiales filtrantes.....	35
4.2.2.3.1	Arena	35
4.2.2.3.2	Antracita.....	36
4.2.2.3.3	Grava	36
4.2.2.3.4	Espesor de las capas filtrantes.....	36
4.2.2.5	Capa soporte de grava	37
4.3	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	40
4.3.1	TASA DE FILTRACIÓN.....	40
4.3.2	CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE	41
4.3.2.1	Presiones negativas	42
4.3.3	SISTEMA DE OPERACIÓN O CONTROL DE LOS FILTROS.....	42
4.3.3.1	Sistema de filtración de tasa constante	43
4.3.3.2	Sistema de filtración de tasa declinante.....	44
4.3.3.3	Sistema de tasa de filtración y nivel constante	45
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN		48
5.1	IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN	48
5.2	PROCEDIMIENTO DE INFORMACIÓN GENERAL	49
5.3	EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN.....	52
5.3.1	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN.....	52
5.3.2	RESULTADOS DE TASA O VELOCIDAD DE FILTRACIÓN	53
5.3.3	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN.....	53
5.3.4	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	54
5.4	CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS.....	55
5.4.1	CRITERIOS GENERALES	55
5.4.2	CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS EN LA PTAP	57
5.5	EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAVADO	58
5.5.1	ASPECTOS GENERALES	58
5.5.2	PROCEDIMIENTO PARA LA VELOCIDAD DE LAVADO.....	58
5.5.3	RESULTADOS DE VELOCIDAD DE LAVADO.....	60
5.5.4	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN.....	60

5.5.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	62
5.6	EVALUACIÓN DE EXPANSIÓN DEL LECHO	62
5.6.1	ASPECTOS GENERALES	62
5.6.2	DETERMINACIÓN DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE.....	63
5.6.3	RESULTADOS DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE	64
5.6.4	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN.....	65
5.6.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE EXPANSIÓN	65
5.7	EVALUACIÓN DE TIEMPO DE DURACIÓN DE LAVADO.....	67
5.7.1	ASPECTOS GENERALES	67
5.7.2	PROCEDIMIENTO DE TIEMPO ÓPTIMO DE LAVADO.....	67
5.7.3	RESULTADOS DE PRUEBAS DE LAVADO	69
5.7.4	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN.....	69
5.7.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	70
5.8	EVALUACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE	71
5.8.1	ASPECTOS GENERALES	71
5.8.2	PROCEDIMIENTO DE GRANULOMETRÍA Y ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE.....	71
5.8.3	RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA Y ESPESOR DE MEDIO FILTRANTE.....	73
5.8.3.1	Resultados granulométricos de la antracita	74
5.8.3.2	Resultados granulométricos de la arena.....	74
5.8.3.3	Resultados de espesores de medio filtrante	75
5.8.4	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN.....	75
5.8.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE ANTRACITA	76
5.8.6	EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE ARENA	77
5.9	EVALUACIÓN DE LA CAPA SOPORTE O LECHO DE GRAVA.....	78
5.9.1	ASPECTOS GENERALES	78
5.9.2	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA CAPA SOPORTE	79
5.9.3	RESULTADOS EN CAPA SOPORTE DE GRAVA	80
5.9.4	EVALUACIÓN DE RESULTADOS EN CAPA SOPORTE.....	80
5.10	EVALUACIÓN DE FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA	82
5.10.1	ASPECTOS GENERALES	82

5.10.2	PROCEDIMIENTO PARA MEDIR FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA	83
5.10.3	RESULTADOS DE FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA....	84
5.10.4	CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN	84
5.10.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	85
CAPÍTULO 6: INVESTIGACIÓN EN COLUMNAS DE FILTRACIÓN PILOTO ..		87
6.1	OBJETIVO Y CONSIDERACIONES DE LA INVESTIGACIÓN PILOTO....	87
6.1.1	OBJETIVO	87
6.1.2	CONSIDERACIONES EN EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA PILOTO	88
6.1.3	ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACIÓN PILOTO	89
6.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN PILOTO	91
6.3	DESCRIPCIÓN DE MEDIOS FILTRANTES EMPLEADOS EN EL MODULO PILOTO	95
6.3.1	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ARENA Y ANTRACITA	95
6.3.1.1	Criterios de verificación de intermezcla limitada	96
6.3.2	GRANULOMETRÍA Y ESPESORES DE ARENA Y ANTRACITA.....	97
6.3.3	SELECCIÓN DE CAPA SOPORTE DE GRAVA.....	98
6.3.4	PREPARACIÓN DE MEDIOS FILTRANTES Y CAPA SOPORTE.....	99
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE FILTROS Y PRUEBAS EN FILTRO PILOTO DE LA PTAP.....		101
7.1	DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN.....	101
7.2	DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE PRUEBAS PILOTO	101
7.2.1	PRUEBA PILOTO No. 1	102
7.2.1.1	Condiciones de ejecución de la prueba.....	102
7.2.1.2	Resultados de prueba piloto No. 1	103
7.2.2	PRUEBA PILOTO No. 2	104
7.2.2.1	Condiciones de ejecución de la prueba	104
7.2.2.2	Resultados de prueba piloto No. 2.....	105
7.2.3	PRUEBA PILOTO No. 3	106
7.2.3.1	Condiciones de ejecución de la prueba	106
7.2.3.1.1	<i>Fase 1 de prueba No. 3.....</i>	<i>106</i>

7.2.3.1.2	<i>Fase 2 de prueba No. 3</i>	107
7.2.3.2	Resultados generales de prueba piloto No. 3	108
7.2.4	PRUEBA PILOTO No. 4	108
7.2.4.1	Condiciones de ejecución de la prueba	108
7.2.4.2	Resultados de prueba piloto No. 4.....	109
7.3	EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE PRUEBAS PILOTO.....	110
7.3.1	CRITERIOS GENERALES PARA EVALUAR RESULTADOS	110
7.3.2	EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 1	111
7.3.3	EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 2	116
7.3.4	EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 3	121
7.3.5	EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 4	127
7.4	CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN PILOTO.....	132
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		134
8.1	CONCLUSIONES	134
8.2	RECOMENDACIONES	140
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		143
ANEXOS		146
ANEXO No. 1: CALIDAD DE AGUA.....		147
ANEXO No. 2: CUADROS Y GRÁFICOS DE FASE DE EVALUACIÓN.....		148
ANEXO No. 3: CUADRO FASE DE INVESTIGACIÓN PILOTO.....		169
ANEXO No. 4: GRÁFICOS FASE DE INVESTIGACIÓN PILOTO.....		192
ANEXO No. 5: PLANOS		206
ANEXO No. 6: FOTOGRAFÍAS FASE DE EVALUACIÓN Y FASE DE INVESTIGACIÓN PILOTO.....		212
ANEXO No. 7: PROCEDIMIENTO DE FILTRACIÓN		225

LISTADO DE CUADROS

CUADRO 2.1: TRAMOS PRINCIPALES DEL SISTEMA PITA-PUENGASÍ.....	6
CUADRO 2.2: PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA LA PTAP (2011).....	13
CUADRO 4.1: CARACTERÍSTICAS DE LA SUSPENSIÓN Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN.....	30
CUADRO 4.2: CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA LECHOS DOBLES.....	39
CUADRO 4.3: COMPOSICIÓN Y PARÁMETROS OPERACIONALES PARA FILTROS DE LECHO DOBLE.....	39
CUADRO 5.1: INFORMACIÓN GENERAL DE FILTROS DE LA PTAP.....	50
CUADRO 5.2: CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS DE LA PTAP.....	57
CUADRO 5.3: PRUEBAS DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO.....	60
CUADRO 5.4: PRUEBAS DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE.....	64
CUADRO 5.5: PRUEBAS DE TIEMPO DE LAVADO EN FILTROS.....	68
CUADRO 5.6: CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ANTRACITA.....	74
CUADRO 5.7: CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE ARENA.....	75
CUADRO 5.8: ESPESOR DE ANTRACITA Y ARENA	75
CUADRO 5.9: CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS DE CAPA SOPORTE.	80
CUADRO 5.10: FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA EN FILTROS.....	84
CUADRO 5.11: CALIDAD DE EFLUENTE Vs. % DE FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA.....	85
CUADRO 6.1: CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE ARENA Y ANTRACITA.....	97
CUADRO 6.2: CARACTERÍSTICA DEL MEDIO SOPORTE DE GRAVA.....	98
CUADRO 7.1: RELACIÓN DE TASAS DE FILTRACIÓN, CAUDALES EN PTAP Y FILTROS PILOTO.....	102

CUADRO 7.2: PRUEBA No. 1, TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL.....	103
CUADRO 7.3: PRUEBA No. 2, TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL.....	105
CUADRO 7.4: PRUEBA No. 3, FASE 1: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL ...	107
CUADRO 7.5: PRUEBA No. 3, FASE 2: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL...	107
CUADRO 7.6: PRUEBA No. 4, TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL.....	109
CUADRO 7.7: PRUEBA PILOTO No. 1, VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACION.....	111
CUADRO 7.8: PRUEBA PILOTO No. 2, VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACION	117
CUADRO 7.9: PRUEBA PILOTO No. 3, VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACION.....	122
CUADRO 7.10: PRUEBA PILOTO No. 4, VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACIÓN	127
CUADRO 7.11: CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y ALTURAS RECOMENDADAS PARA LOS MEDIOS FILTRANTES DE LA PTAP....	132

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1: SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.....	4
GRÁFICO 2.2: IMPLANTACIÓN GENERAL DE LA PTAP	7
GRÁFICO 3.1: COMPONENTES DE UN FILTRO RÁPIDO A GRAVEDAD.....	14
GRÁFICO 4.1: MECANISMOS DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS.....	25
GRÁFICO 4.2: MECANISMOS DE TRANSPORTE DE LAS PARTÍCULAS.....	28
GRÁFICO 4.3: CURVA GRANULOMÉTRICA.....	33
GRÁFICO 4.4: FILTRACIÓN NIVEL CONSTANTE Y TASA CONSTANTE	46
GRÁFICO 5.1: TASAS DE LAVADO Vs. TEMPERATURA DE AGUA.....	61
GRÁFICO 5.2: PUNTOS DE MUESTREO PARA MEDIR EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE.....	66
GRÁFICO 5.3: TIEMPO DE LAVADO Vs. TURBIEDAD DE LAVADO.....	69

GRÁFICO 6.1: SISTEMA DE FILTROS PILOTO.....	93
GRÁFICO 6.2: FILTRO PILOTO Y POSICIÓN DE PIEZÓMETROS.....	99
GRÁFICO 7.1: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 1, PRUEBA No. 1.....	113
GRÁFICO 7.2: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 2, PRUEBA No. 1.....	114
GRÁFICO 7.3: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 3, PRUEBA No. 1.....	115
GRÁFICO 7.4: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 1, PRUEBA No. 2.....	118
GRÁFICO 7.5: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 2, PRUEBA No. 2.....	119
GRÁFICO 7.6: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 3, PRUEBA No. 2.....	120
GRÁFICO 7.7: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 1, PRUEBA No. 3.....	123
GRÁFICO 7.8: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 2, PRUEBA No. 3.....	124
GRÁFICO 7.9: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 3, PRUEBA No. 3.....	125
GRÁFICO 7.10: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 1, PRUEBA No. 4.....	129
GRÁFICO 7.11: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 2, PRUEBA No. 4.....	130
GRÁFICO 7.12: EVOLUCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN LECHO FILTRANTE, FILTRO PILOTO No. 3, PRUEBA No. 4.....	131

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 2.1: CLARIFICADORES.....	10
FOTOGRAFÍA 3.1: VÁLVULA DE SALIDA DE FILTRO.....	18
FOTOGRAFÍA 3.2: FILTRO Y CANALETA DE LAVADO.....	19
FOTOGRAFÍA 3.3: FONDO FALSO LEOPOLD MODERNO.....	21
FOTOGRAFÍA 3.4: FONDO FALSO LEOPOLD ANTIGUO	21
FOTOGRAFÍA 3.5: FILTRO 6, FUERA DE OPERACIÓN	22
FOTOGRAFÍA 6.1: VISTA GENERAL DE LOS FILTROS PILOTO.....	92

LISTADO DE PLANOS

PLANO No. 1: PLANTA TÍPICA DE LOS FILTROS.....	211
PLANO No. 2: SECCIÓN TRANSVERSAL DE FILTROS.....	212
PLANO No. 3: SECCIÓN LONGITUDINAL DE FILTROS.....	213
PLANO No. 4: SECCIÓN TRANSVERSAL GALERÍA DE FILTRO.....	214
PLANO No. 5: SECCIÓN LONGITUDINAL FILTROS.....	215

SIMBOLOGÍA

A	= Área
A_F	= Área transversal del filtro
CU	= Coeficiente uniformidad
d_{10}	= Tamaño efectivo
d_{90}	= Diámetro 90 %
d_{60}	= Diámetro 60 %
EPMAPS	= Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento
H	= altura
$H_{f_{total}}$	= Pérdida de carga total
H_{f_0}	= Pérdida de carga en el medio filtrante limpio
$H_{f(t)}$	= Pérdida de carga en el medio filtrante, en un instante (t)
H disponible	= Carga hidráulica disponible
NTU	= Unidades técnicas nefelométricas
NMP	= Número más probable
$m^3/m^2/d$	= Unidades de tasa de filtración y de lavado
PTAP	= Planta de tratamiento de agua Puengasí
Q_L	= Caudal de lavado
Q_{LM}	= Caudal de lavado registrado en medidor
t	= Tiempo
V_L	= Velocidad de lavado
UTC	= Unidades técnicas de color

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, se desarrolló en la planta de tratamiento de agua potable de Puengasí (PTAP), de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) de Quito, Ecuador. En una primera fase se evaluó los filtros del prototipo, determinándose con pruebas y ensayos las características granulométricas y espesores del lecho filtrante y, sus parámetros operativos como: velocidad de filtración, velocidad de lavado, expansión del lecho filtrante, tiempo de lavado y fluctuaciones de pérdida de carga.

Para la segunda fase, se implementó un sistema de tres columnas de filtración piloto con lechos de doble capa, en las que se empaco antracita con diferentes coeficientes de uniformidad ($CU= 1,3; 1,45$ y $1,6$) y tamaño efectivo de $0,9$ mm y, arena con tamaño efectivo de $0,5$ mm y $CU= 1,4$. Los filtros fueron operados con flujo continuo a gravedad, con el agua de los clarificadores de la planta; los lechos filtrantes piloto fueron evaluados en función de la turbiedad del efluente, carrera de filtración y de la evolución y distribución de la pérdida de carga, parámetros que fueron monitoreados y medidos durante las pruebas.

En la primera prueba, se operó los filtros con una tasa de filtración de $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ que corresponde a la situación actual de la PTAP. En la segunda prueba, se aplicó una tasa de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. La tercera prueba se ejecutó en dos fases, en la primera, se aplicó una tasa de filtración de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, durante 8 horas y en la etapa 2, se disminuyó la tasa a $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. Finalmente en la prueba No. 4, se operó con una tasa declinante, con una tasa de arranque de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. En todas las pruebas se mantuvo una carga hidráulica constante.

Como conclusión de la investigación, se llega a recomendar la granulometría de los medios de arena y antracita que permitirían optimizar la calidad del efluente en términos de turbiedad con carreras de filtración, evolución y distribución de pérdidas de carga adecuadas.

ABSTRACT

The present research was developed in the Puengasí Drinking Water Treatment Plant (PTAP) of the Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) of Quito, Ecuador. In a first phase the filters prototype were evaluated through tests and trials in which the granulometric characteristics and thickness of the filter bed were defined as well as its operating parameters such as filtration rate, backwashing rate, filter bed expansion, backwashing time and head loss fluctuations.

For the second phase, it was implemented a system of three pilot filter columns with double-layer beds, in which anthracite with different coefficients of uniformity (CU = 1.3, 1.45 and 1.6) and effective size of 0.9 mm was packaged, and sand with an effective size of 0.5 mm and CU = 1.4. The filters were operated with continuous gravity flow, with water from the clarifiers of the Treatment Plant. The pilot filter beds were evaluated based on effluent turbidity, filter run and the evolution and distribution of head loss, parameters which were monitored and measured during the tests and trials.

In the first test, filters were operated with a filtration rate of $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ which is the current rate in the PTAP. In the second test, it was tested a rate of $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$. The third test was performed in two stages, at first, testing a filtration rate of $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ for 8 hours while in the second stage, the rate was decreased to $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$. Finally, in test No. 4, it was operated with a declining rate, at a boot rate of $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$. Continual hydraulic load was kept in all trials.

As conclusion of the research, it will recommend the grain of sand and anthracite media could optimize the effluent quality in terms of turbidity with filter runs, evolution and distribution of adequate head losses.

PRESENTACIÓN

La Planta de Tratamiento de Puengasí (PTAP), una de las dos más importantes instalaciones de producción de agua potable de la EPMAPS, cubre el 30% de la demanda de Quito y sirve a todo el sector sur oriental y a la zona norte-centro de la ciudad, debido a sus 36 años de operación, su sistema de filtración exige acciones de rehabilitación y optimización.

La evaluación del sistema de filtración tiene como objetivo determinar la línea base de los parámetros y variables de operación actuales e investigar en filtro piloto la optimización de su lecho filtrante con posibilidad de incrementar la capacidad de filtración y optimizar calidad del agua filtrada. En el desarrollo del presente estudio se incluye: una breve descripción de la PTAP, la descripción del sistema de filtración existente, la descripción teórica de las variables que influyen en el proceso de filtración, los procedimientos para la ejecución de las pruebas y ensayos de campo, los criterios referenciales para la evaluación, la presentación y análisis de los resultados

Respecto a la fase de investigación piloto se realiza la descripción del sistema piloto y de los medios filtrantes utilizados, se detallan las condiciones de ejecución de las pruebas realizadas y el análisis de sus resultados en función de criterios adoptados para la evaluación. Finalmente, se emiten conclusiones y recomendaciones encaminadas a futuras acciones de optimización de los filtros.

Para el desarrollo del estudio y ejecución de las pruebas y ensayos se consultó publicaciones técnicas, libros, estudios y trabajos técnicos que brindan referencias, metodologías y procedimientos para determinar los parámetros y eficiencias del proceso de filtración y dan soporte documental al marco de la investigación piloto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

En una planta de tratamiento es importante contar con procedimientos que permitan la evaluación de sus procesos unitarios de tratamiento con el objetivo de verificar las condiciones de diseño, operación, optimizar los procesos, realizar proyectos de rehabilitación u optimización, cualquiera que sea el objetivo de la evaluación la determinación de los parámetros operativos reales permite determinar e identificar los defectos, errores y procedimientos con los cuales se está ejecutando su operación y control.

La evaluación del proceso de filtración unida a la investigación en filtro piloto permitirá valorar las variables operativas y proporcionara criterios para determinar si el proceso es factible de ser optimizado y determinar el grado de adecuación y eficiencia esperada de los cambios, mejoras o modificaciones propuestas.

El presente estudio desarrollará la metodología para la evaluación del sistema de filtración de la Planta de Tratamiento de Agua de Puengasí (PTAP), la cual unida a la ejecución de las pruebas respectivas en sitio y a la investigación en columnas de filtración piloto permitirá analizar y determinar las condiciones operativas actuales de los filtros y obtener criterios para optimizar los parámetros y variables de optimización y operación de los filtros.

Finalmente, el estudio permitirá elaborar la línea base del estado actual de los filtros y su operación y constituirá un referente de las condiciones desde las cuales se originen acciones de optimización y rehabilitación de los filtros de la PTAP.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general planteado en la presente investigación es realizar la evaluación de los filtros de la Planta de Puengasí (PTAP) de la EPMAPS-Quito, con el objeto de determinar las condiciones actuales del lecho filtrante y los valores de las variables operativas, a saber: pérdida de carga, velocidad de filtración, velocidad y tiempo de lavado y, determinar mediante pruebas en columnas de filtración piloto las características del lecho filtrante, tasas de filtración y longitud de carrera de filtración, adecuadas que permitan obtener un efluente de calidad y la optimización del sistema de filtros.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Desarrollar y aplicar en planta, procedimientos de ensayos y pruebas de evaluación para los filtros.
- b) Determinar las condiciones del lecho filtrante y los parámetros operativos con los que vienen operando los filtros.
- c) Analizar e interpretar los resultados obtenidos en las pruebas de evaluación
- d) Investigar en columna de filtración piloto los valores óptimos de las variables del proceso y condiciones granulométricas del lecho filtrante.
- e) Análisis de los resultados obtenidos en la evaluación del sistema de filtración actual y en la investigación realizada en los filtros piloto, formulación de conclusiones y recomendaciones.

Conviene mencionar que el presente estudio, contó con el auspicio de la EPMAPS, institución que autorizó y facilitó la realización de los trabajos de evaluación e investigación que se desarrollaron entre junio del 2012 y febrero del 2013.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ

2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN QUITO

La Planta de Tratamiento de Puengasí (PTAP) de la Empresa Metropolitana de Agua potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), constituye parte importante de las instalaciones de producción de agua potable para la ciudad de Quito, procesa aproximadamente 2128 l/s que cubren el 33% de la demanda de total de 6200 l/s, sirve a todo el sector sur oriental y a la zona norte-centro de la ciudad.

El sistema de filtración de la PTAP, debido a sus 36 años de operación, presenta acentuado deterioro, situación que tiene el riesgo de afectar la producción diaria de agua potable por la potencial posibilidad de que las unidades de filtración salgan de operación, además del paulatino deterioro del efluente debido al mal estado de los fondos falsos y lechos filtrantes.

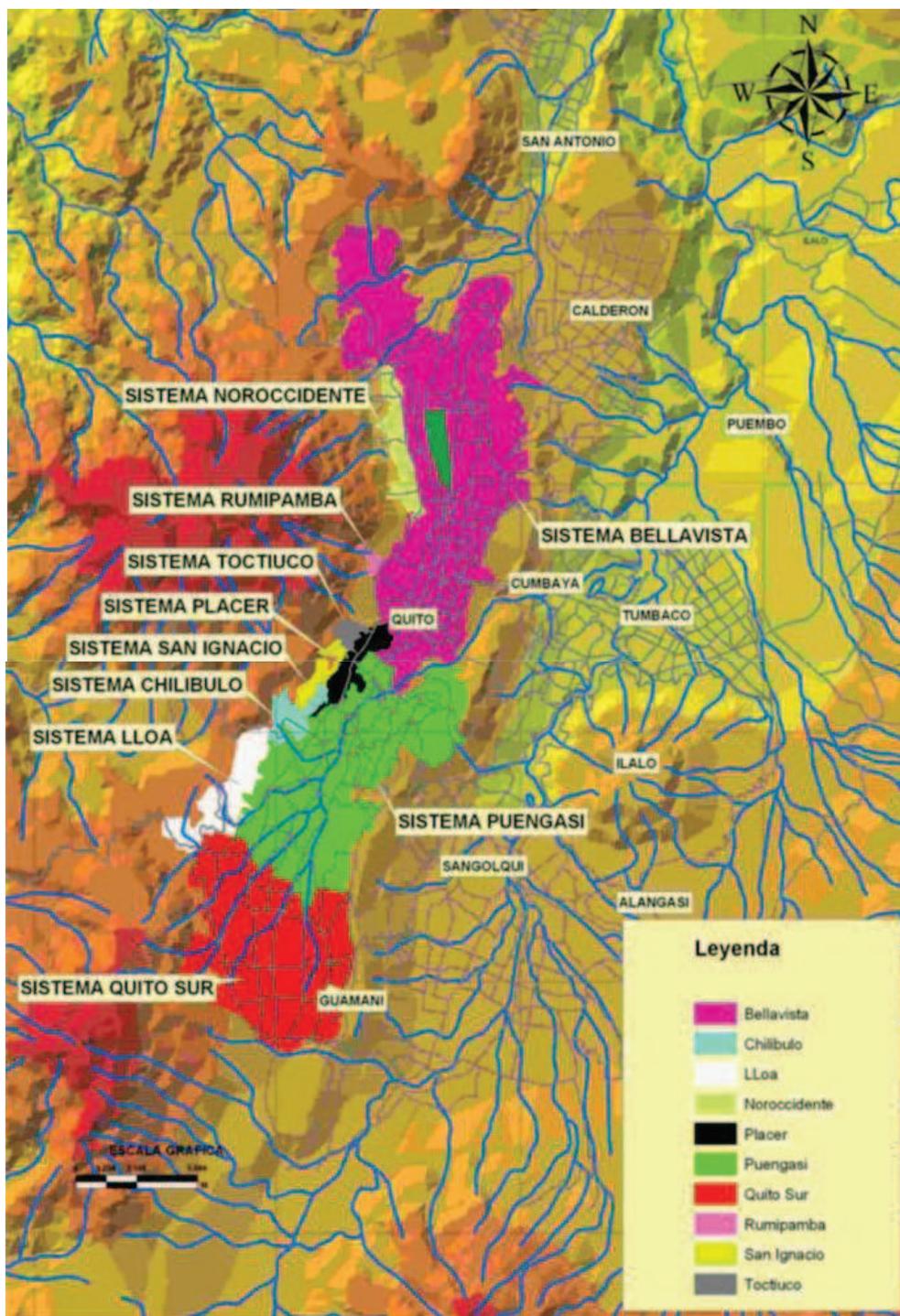
La EPMAPS, opera 22 plantas de tratamiento de agua potable (PTAPs), distribuidas en la zona urbana y en las parroquias del distrito metropolitano de Quito, estas procesaron 6.282 l/s en promedio el año 2011, las plantas más importantes, por los caudales tratados y el porcentaje que cubren respecto a la producción total son:

- Puengasí = 2.128 l/s (33,3 %)
- Bellavista = 2.122 l/s (33,2 %)
- El Placer = 475 l/s (7,43 %)
- El Troje = 483 l/s (7,57 %)

En el gráfico 2.1, se indican los principales sistemas de abastecimiento de agua potable de Quito.

GRÁFICO 2.1

SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE PARA QUITO



Fuente: EPMAPS, 2012

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN PITA

El agua cruda es captada en el río Pita y es transportada a la PTAP por medio del sistema de conducción "Pita", que comprende el conjunto de obras civiles: captación, canal, sifones, túneles, estructuras de alivio y control que permiten a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), transportar, 2.614 l/s de agua cruda a la ciudad de Quito que provienen de las siguientes fuentes: 2.114 l/s del río Pita y 500 l/s provenientes del sistema de la laguna La Mica.

El caudal transportado, se reparte e ingresa para su tratamiento en las Plantas de Puengasí 2.128 l/s, Conocoto 186 l/s y El Placer 300 l/s (caudales promedios correspondientes al año 2011).

En 1962, se contrató los estudios definitivos del Sistema Pita - Puengasí, incluida la planta de tratamiento, con la firma americana Gannet Fleming Corddry and Carpenter, INC, y fueron concluidos en 1967.

El Sistema Pita - Puengasí, entró en operación en julio de 1976 con la entrega inicial de 350 l/s para la Planta de El Placer, su importancia es tal, que el agua cruda captada del río Pita, una vez tratada en las Plantas antes indicadas, cubre aproximadamente el 41 % de la demanda de agua potable de la ciudad de Quito y el 80 % de Conocoto.

Además, el canal del Pita, transporta aproximadamente 500 l/s provenientes del sistema de La Mica que ingresan al mismo a la altura de la planta del Troje, ubicada al sur de Quito.

2.2.1 CUENCA DEL RÍO PITA

La cuenca del río Pita a la cual confluyen los escurrimientos y deshielos del Cotopaxi e Illinizas, cubre un área total de drenaje de 195 km², de acuerdo a la clasificación climatológica, el área de la cuenca tiene "clima de páramo".

La precipitación media anual sobre la cuenca es de aproximadamente 1400 mm. Las precipitaciones son por lo general muy bajas de julio a agosto (verano) y, tienen dos períodos altos, anuales iguales, octubre a noviembre y de marzo hasta abril.

2.2.2 CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN

La captación se ubica, sobre el río Pita a 3320 m.s.n.m, en el sitio denominado Bocatoma, desde donde se conduce a gravedad el agua cruda a través de canal abierto, túneles y dos sifones, hasta su entrega en las Plantas de Conocoto y Puengasí, luego de un recorrido total de 49.820 m.

Por la longitud de recorrido, importancia de obras civiles e hidráulicas el sistema de conducción desde la bocatoma del río Pita hasta la Planta de Puengasí, se lo puede dividir en tres tramos principales, como se indica en el cuadro No. 2.1.

CUADRO 2.1

TRAMOS PRINCIPALES DEL SISTEMA PITA-PUENGASÍ

TRAMO 1 BOCATOMA-SIFÓN SAN PEDRO	
<i>Captación Bocatoma del río Pita</i>	
Cota de captación (caucasiana)	3320 m.s.n.m
Caudal medio anual captado	2114 l/s
<i>Conducción:</i>	
Longitud total Bocatoma-San Pedro	25.452 m
Longitud canal abierto	13691 m
Longitud de túneles (28)	11340 m
<i>Sifón El Salto:</i>	
Longitud y diámetro	421 m, diámetro 48 pulg.
Cota de: entrada / salida	3315 m / 3310 m
TRAMO 2 SIFÓN SAN PEDRO	
Caudal de diseño	1680 l/s/tramo
Longitud total	6.771 m
Diámetro de tubería en cada ramal / No ramales	32 pulgadas. / 2
No de ramales	2
Cota de: entrada / salida / punto más bajo	3102,40 m / 2999,41 / 2578
TRAMO 3 SALIDA SIFÓN SAN PEDRO –PLANTA PUENGASÍ	
<i>Conducción:</i>	
Longitud total	15.670 m
Longitud canal abierto	9936 m
Número de túneles / longitud de túneles	22 / 5734 m

Fuente: EPMAPS, (2000)

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP

La Planta de tratamiento de Puengasí (PTAP), se ubica en el sector sur-centro de la ciudad de Quito en el barrio la Loma de Puengasí, a una altura de 2.985 m.s.n.m, fue construida por la firma C&C/BOHER y está en operación desde mayo de 1977.

A fin de incrementar la capacidad de tratamiento de la PTAP a 2500 l/s, en junio de 1986, se puso en operación el modulo oriental de la PTAP, consistente en cuatro clarificadores circulares, un mezclador rápido y otros componentes. En el gráfico 2.2, se presenta la implantación general de la PTAP; como se indicó, la PTAP en el año 2011, proceso en promedio 2128 l/s.

GRÁFICO 2.2

IMPLANTACIÓN GENERAL DE LA PTAP



Fuente: Google maps, 2012

A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes de la PTAP.

2.3.1 RESERVA DE AGUA CRUDA

Comprende dos estanques que reciben y almacenan el agua cruda proveniente del sistema Pita y permiten ecualizar los caudales; además tienen la capacidad de neutralizar y homogenizar las variaciones bruscas de la calidad de agua cruda, permitiendo que la operación y tratamiento sean más eficientes. Los dos reservorios tienen 91 567 m³ y 71 945 m³ de capacidad, que dan un total combinado de 163 512 m³, y una capacidad útil total de 120 000 m³.

Cada reservorio dispone de dos torres de hormigón armado de 9,25 m de altura, la primera sirve para el drenaje y desborde de los caudales de exceso hacia el tanque ecualizador de excesos, a través de una compuerta, próxima al fondo del reservorio. La otra torre denominada de captación-salida, posee dos compuertas, que sirven para captar el agua cruda tanto de la parte superior e inferior del reservorio, permitiendo la adecuada circulación del volumen almacenado y minimizando la formación de cortocircuitos y espacios muertos en el reservorio.

Desde el reservorio No 2, ubicado al Oeste de la PTAP, sale la línea de conducción del sifón Puengasí- el Placer que conduce 350 l/s de agua cruda a la planta El Placer.

Para efectos de la descripción de las unidades de tratamiento, a continuación se detalla las características de solo un módulo de tratamiento, el otro se entenderá que es de similares condiciones; con la salvedad de que los cuatro clarificadores ubicados al lado oriental son de forma circular, pero sus componentes y funcionamiento son similares a los que describirá para la batería de clarificadores de forma cuadrada ubicados al occidente de la PTAP.

2.3.2 MEZCLA RÁPIDA

El agua cruda ingresa al tratamiento y se reparte, hacia dos módulos independientes e iguales de: dosificación, mezcla rápida y clarificación, que convergen a un sistema común de filtros.

La mezcla rápida mecánica se realiza con un mezclador de turbina de eje vertical, montado en una cámara de mezcla, de forma cuadrada, de 4,56 m² de área y 4,6 m. de altura, la aplicación del sulfato de aluminio se realiza en el centro del eje de rotación.

2.3.3 CLARIFICADORES

El agua cruda que ha recibido la aplicación de sulfato de aluminio y polímero circula a través de un tubo Venturi de 36 pulgadas de diámetro, hacia una cámara central de distribución, desde la cual se reparte a los cuatro clarificadores.

Cada clarificador tiene una capacidad de 312,5 l/s y comprende un tanque de hormigón armado que tiene una base cuadrada de 22,55 m por lado y 4,57 m de altura, con un volumen útil de 2177 m³ y un tiempo de retención de 1,94 horas, la cota del nivel máximo de operación es de 2985,91 m.s.n.m. En el fondo de cada tanque clarificador existe una barredera giratoria que traslada el lodo sedimentado hacia tres pozos de recolección, desde donde se lo evacua periódicamente.

2.3.3.1 Operación de los clarificadores

Los clarificadores son del tipo ACCELATOR, INFILCO DEGREMONT, (ver fotografía No. 2.1), disponen de una zona central de reacción rodeada por una zona de sedimentación, estas dos zonas se comunican por la parte superior e inferior. El agua coagulada entra a la unidad por un conducto que la lleva al centro de la zona de mezcla primaria, toma contacto con la masa de lodos recirculados que se hallan en esta cámara en estado de movimiento, iniciando la etapa de floculación; este movimiento de circulación dentro de la cámara o zona primaria cumple con una acción de barrido de fondo, dado que se producen gradientes de velocidad que evitan la formación de áreas muertas y cortocircuitos.

En la zona primaria el tiempo de retención es el necesario para el proceso de floculación, completándose en la zona secundaria donde se produce un incremento en el tamaño del floculo en virtud del menor gradiente existente en la

misma, desde esta zona la masa fluida de lodo en recirculación (agua coagulada más lodo recirculado) sale perimetralmente hacia la zona de clarificación y toma un sentido vertical descendente por la acción de una banda circular deflectora. La zona de clarificación debido a su mayor área produce una disminución de su velocidad ascensional, lo cual permite la separación de la fase líquida (agua clarificada) del resto.

FOTOGRAFÍA 2.1 CLARIFICADORES



Fuente: Planta de Puengasí

El lodo o barro en exceso, formado durante el proceso de clarificación debe ser periódicamente evacuado al exterior de la unidad para mantener la concentración de los mismos en toda la masa en circulación, dentro de rangos adecuados para la operación del clarificador, así una parte (la más pesada) de los lodos se acumulan en el fondo y son descargados hacia el tanque de ecualización de lodos, otra parte, la más liviana vuelve por circulación inducida a entrar a la zona de mezcla primaria, con lo que se establece el proceso de recirculación, se produce así un enriquecimiento del lodo, con el que se consigue una floculación rápida y la formación de un precipitado denso.

En una unidad de flujo ascendente como los clarificadores, se establece un equilibrio entre la velocidad ascensional del agua y la velocidad de sedimentación de las partículas floculadas. Cuando la concentración de las partículas floculadas

llega a una determinada concentración, forman un manto de lodos que actúa en dos formas: como un floculador y como un filtro fluidificado; así el agua floculada que sale de la zona de mezcla secundaria fluye hacia la parte inferior del manto de lodos, una parte pasa por el “filtro de lodo” y sale clarificada por la parte superior de la unidad, donde es recolectada por medio de canaletas dispuestas radialmente en toda la unidad, toda el agua recolectada (agua clarificada) converge a un canal de hormigón que igualmente recibe el agua clarificada de la otra batería de clarificadores ubicada al lado oriental de la PTAP, de este canal el agua se reparte a las dos baterías de filtros.

El 16 de mayo de 1989 entraron en operación cuatro clarificadores adicionales, que se ubican en el costado oriental de la planta, cuyos componentes y funcionamiento son similares al descrito antes; diferenciándose en su forma, que corresponde a tanques de forma circular de 25,91 m de diámetro, 4,57 m de altura total, 4,28 m de altura útil, para un volumen útil de 2256 m³ y un tiempo de retención de 2 horas. Igualmente su capacidad es de 1250 l/s.

La capacidad total de tratamiento del conjunto de clarificadores es de: 2500 l/s para operación normal con ocho clarificadores; de 2760 l/s para condiciones extremas y de 2400 l/s para cuando sale de operación una unidad, en este último caso si la calidad del agua cruda lo permite se puede usar el by-pass para compensar la reducción del caudal de producción.

2.3.4 FILTROS

La descripción del sistema de filtración de la PTAP y medios filtrantes, será ampliamente detallada en el capítulo 3, subcapítulo 3.2, aquí solo mencionaremos que el efluente de los dos módulos de clarificación, (cuatro circulares y cuatro cuadrados) se recolectan en un canal central que reparte el agua clarificada a los 8 filtros rápidos de cámara doble que se ubican en dos baterías de 4 filtros cada una, ubicadas a los costados sur y norte del edificio de filtros.

2.3.5 DESINFECCIÓN

El efluente de los filtros, se conduce a un tanque subterráneo de concreto, donde se realiza la desinfección y se da el tiempo de contacto necesario para este proceso unitario. Para el proceso de desinfección se utiliza un sistema de cloración automático, que emplea cloro gas para la aplicación de cloro al efluente de los clarificadores (agua clarificada) antes de su ingreso a los filtros (pre-cloración) y al agua filtrada antes de su ingreso al tanque de reserva de agua tratada (post-cloración) que al mismo tiempo sirve como tanque de contacto de cloro.

2.3.6 TANQUE DE RESERVA DE AGUA TRATADA

Luego de la desinfección el efluente de los filtros, se conduce a gravedad a dos tanques subterráneos de concreto que tienen una capacidad de almacenamiento de agua tratada de 17 000 m³ y 15 000 m³ cada uno, intercomunicados entre sí y desde los cuales salen tres líneas de distribución principales de agua potable a saber: Itchimbía-Bellavista, Chiriyacu y Suroccidente desde el primero y Alma Lojana y Los Pinos, del segundo tanque. Igualmente existen dos líneas de salida a bombeo, San Isidro y Puengasí.

2.4 CALIDAD DE AGUA CRUDA Y TRATADA

En el cuadro No. 1, Anexo No. 1, se presentan los valores mensuales promedio de los principales parámetros de calidad del agua cruda, clarificada y tratada de la PTAP, registrados en el año 2011, y a continuación en el cuadro 2.2, se indica el resumen de los valores promedios anuales de dichos parámetros.

Para el caso del agua cruda, es de resaltar, que esta presenta bajos valores de turbiedad y altos valores de color, que son características de aguas de difícil tratamiento, a pesar de ello, el agua que sale de los clarificadores tiene una turbiedad de 1,07 NTU y la del efluente de los filtros de 0,52 NTU; valores que indican que en la PTAP, se logra en promedio eficiencias de remoción de

turbiedad del 87,5 % en los sedimentadores y del 94 % en los filtros, en relación a la turbiedad del agua cruda.

CUADRO 2.2

PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA LA PTAP (2011)

PARÁMETRO	CRUDA	CLARIFICADA	TRATADA
TURBIEDAD (NTU)	8,61	1,07	0,52
COLOR (UTC)	50	8	2
pH	7,98	7,20	7,11
TEMPERATURA (°C)	14,6	14,7	14,6
ALCALINIDAD (mg/l)	64	47	45
COLIFECALES (NMP/100 cm ³)	70	0	0

Fuente: Laboratorio de calidad de la PTAP, 2011

En los filtros, se tiene en promedio eficiencias de remoción de turbiedad del 51,5 % en relación a la turbiedad del agua clarificada o sedimentada. En general el agua tratada por la PTAP, cumple con los valores límites máximos establecidos en la Norma INEN 1108:2011.

CAPÍTULO 3

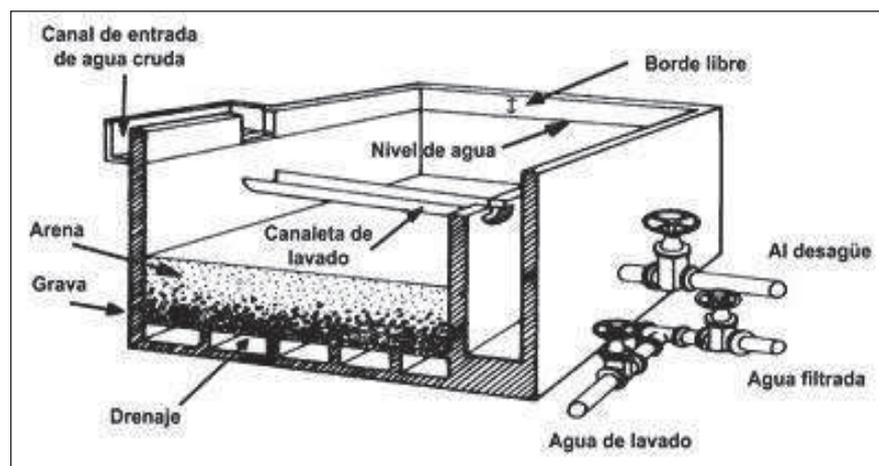
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EXISTENTE

3.1 COMPONENTES DE UN FILTRO RÁPIDO

Previo a describir el sistema de filtración existente de la PTAP, es necesario dar una breve descripción general de los principales componentes de un filtro rápido a gravedad, tal como se indican en el gráfico 3.1.

GRÁFICO 3.1

COMPONENTES DE UN FILTRO RÁPIDO A GRAVEDAD



Fuente: Romero Rojas, J. (1995)

3.1.1 MEDIO FILTRANTE

Este se encuentra sobre la capa soporte de grava, y puede ser de simple o doble capa. 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 en la parte superior. También se puede tener medios de triple capa: arena, antracita y granate pero en nuestro país estos no han sido aplicados, excepto en la PTAP, en el diseño original de los filtros.

No todo material granular puede ser utilizado como filtro, el material debe cumplir con ciertas características como: resistencia a la abrasión, estar libre de impurezas y tener una distribución de granos uniforme. Generalmente se utiliza como medio filtrante arena proveniente de ríos, previo un proceso de tamizado a fin de que cumpla con los requerimientos del diseño.

3.1.2 CAPA SOPORTE DE GRAVA

La función de la capa soporte es evitar que la arena pase o se pierda a través del drenaje, por lo que esta 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.

La capa soporte, también permite recoger el agua filtrada y, durante el lavado del filtro distribuye uniformemente el aire y el agua de lavado. Esta zona, suele ser del mismo material que el medio filtrante, pero de mayor granulometría.

3.1.3 DRENAJE

Estructura que permite el paso del agua en forma ascensional durante el lavado y en forma descendente durante el proceso de filtración y está relacionado con constitución y granulometría de la capa soporte. El sistema de drenaje debe permitir una distribución uniforme del agua de lavado y del aire de limpieza, si se emplea aire en el lavado, no producir una pérdida de carga demasiado alta y ser económico. Existen los siguientes tipos de drenaje:

- Fondo falso con boquillas
- Fondo Wheeler
- Tuberías perforadas
- Bloques tipo Leopold
- Vigas Prefabricadas

3.1.4 CANALETAS DE LAVADO

Estas se ubican arriba del lecho filtrante y permiten la recolección y salida del agua de lavado del filtro, deben estar ubicadas a una distancia del lecho filtrante que permita la adecuada expansión del medio granular y evitar que este salga por la canaleta al momento del lavado.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FILTROS DE LA PTAP

3.2.1 LECHO FILTRANTE

El sistema de filtros, comprende ocho unidades de filtros dobles, divididos en dos baterías, cuyo medio filtrante, está compuesto de un lecho triple de: antracita, arena y granate o arena de alta densidad, esta última con el transcurso de la operación de la planta se ha mezclado totalmente con la arena o se ha fugado a través del fondo falso.

Los filtros son del tipo rápido, la capa superior es de 49,5 cm de antracita que tiene un tamaño efectivo de 1,05 mm con un rango de 1 mm a 1,1 mm, luego de esta capa se encuentra una capa de arena graduada en un espesor de 22,9 cm que tiene un tamaño efectivo en el rango de 0,42 mm a 0,55 mm. A continuación de la capa de arena, se tiene una capa de 3,8 cm de granate o arena de alta densidad con un tamaño efectivo en el rango de 0,21 mm a 0,32 mm, coeficiente de uniformidad menor a 1,8 y peso específico de 4 g/cm³.

3.2.2 CAPA SOPORTE

El lecho filtrante está soportado por una capa soporte de grava de cuatro capas de tamaños: 1/8, 1/4, 1/2 y 3/4 de pulgada, de 25,5 cm de espesor. Todo el lecho filtrante descansa sobre un sistema de bloques de arcilla vitrificada (tipo Leopold) de 28,73 cm de ancho y 66,67 cm de largo que están divididos en dos compartimientos: El inferior que sirve de conducto de distribución y el superior que se comunica con el de abajo por un orificio de 2,54 cm de diámetro.

En la cara que queda en contacto con la grava, hay 108 orificios por bloque, de 4 mm de diámetro, que permiten distribuir el agua de lavado: Todas las filas de bloques se orientan a un canal central de repartición para el caso del agua de lavado y de recolección en caso del agua filtrada: Los bloques se asientan sobre una capa de mortero 12,5 mm de espesor.

3.2.3 SISTEMA DE VÁLVULAS

El agua clarificada recolectada en las canaletas de los clarificadores, converge desde cada módulo de clarificadores a un canal común de hormigón, desde el cual se distribuye a las dos baterías de filtros, ubicadas una al lado norte y otra al lado sur, ingresando a cada filtro por una compuerta que es operada desde la mesa del filtro respectivo y se distribuye dentro de él por medio de cuatro canaletas de hormigón.

Cada una de las 16 unidades de filtración, dispone de válvulas para la salida del agua filtrada, entrada de agua de lavado, salida de agua de lavado y drenaje las cuales se ubican en la galería de filtros: estas son de tipo mariposa y disponen de interruptores limitadores que activan luces piloto en las mesas de control de los filtros de acuerdo a su posición. Todas las válvulas de los filtros son operadas manualmente desde ocho mesas de operación, ubicadas en el piso superior sobre la galería de filtros.

En la tubería del efluente de cada filtro, se dispone de controladores de caudal de 16" de diámetro, (ver fotografía No. 3.1), que por un sistema de diferencial de presión, creado por un tubo Venturi, permiten regular el caudal de filtrado y mantenerlo constante durante la carrera del filtro. La presión diferencial aumenta cuando se incrementa la rata de filtración, el flujo de agua filtrada debe ser tal que provoque una presión diferencial suficiente para balancear el peso fijado en la barra graduada de la contrapesa, en forma similar la tasa de filtración disminuye al incrementarse las pérdidas de carga en el filtro, entonces para compensar la diferencia en presión diferencial la rata de filtrado se incrementa.

El agua filtrada, se recolecta por medio de un canal de hormigón localizado debajo del piso de la galería de filtros, el cual llega al tanque de reserva de agua tratada.

FOTOGRAFÍA 3.1

VÁLVULA DE SALIDA DE FILTRO



Fuente: Filtro No. 6, PTAP

3.2.4 MEDICIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA

Cada una de las 16 unidades de filtración, dispone de mecanismos de transmisión de flujo y pérdidas de carga que se visualizan en los manómetros indicadores de las mesas de operación de filtros. Estos mecanismos por efecto de su operación a la fecha se hallan dañados, el control del flujo de filtración se realiza por la lectura directa en las barras de deslizamiento de la pesas y el control de pérdida de carga se obtiene con lecturas directas en los piezómetros que se han instalado en la tuberías de salida del agua filtrada de cada filtro.

3.2.5 SISTEMA DE LAVADO

Cada filtro dispone de dos mecanismos de lavado: superficial y retrolavado. Para el lavado superficial cada filtro dispone de dos brazos rotatorios superficiales que giran propulsadas por el par producido por los chorros de agua a alta velocidad que salen por las boquillas ubicadas en cada brazo y que se dirigen contra la

superficie del lecho de antracita. Antes de aplicar el lavado superficial el nivel del agua en el cajón del filtro, debe estar unos 5 cm debajo del borde inferior del brazo rotatorio, durante el retrolavado el lavado superficial debe pararse totalmente, a fin de evitar la resuspensión de la antracita y su salida por las canaletas de lavado.

FOTOGRAFÍA 3.2

FILTRO Y CANALETAS DE LAVADO



Fuente: Filtro PTAP

Para el control del lavado ascensional (retrolavado) cada filtro dispone de una válvula tipo mariposa de 24" de diámetro, cuyo fin es el de regular y controlar el caudal de lavado del filtro.

El manual de operación de la planta, recomienda que a fin de mantener operaciones eficientes el consumo total de agua por lavado de filtros, sobre un período de tiempo dado, no debe sobrepasar el 3% de la producción total del agua filtrada de la planta.

De igual manera el manual de operación indica y recomienda que el valor máximo de turbiedad del efluente filtrado, no debe sobrepasar de 0,5 NTU para una operación correcta de la PTAP y que el lavado del filtro debe efectuarse cuando la pérdida de carga marque 2,44 m ó cuando la turbiedad del efluente se aproxime a 0,5 NTU.

3.2.6 TANQUE DE LAVADO

Para el lavado de los filtro se dispone de un tanque elevado de hormigón de 1495 metros cúbicos de capacidad, que se ubica en la cota 3.022 m, la carga hidrostática disponible para cuando el tanque se halla a la mitad de su capacidad es de 38,65 m. El agua es bombeada desde el tanque de reserva de agua tratada con dos bombas de 100 HP, el caudal de bombeo de cada bomba es de 100 l/s.

Por cada unidad doble de filtración se dispone de una mesa de operación, es decir hay ocho mesas de control que permiten controlar las operaciones del proceso de filtración. Todas las válvulas con excepción de la de drenaje pueden ser operadas manualmente desde la mesa de control.

Cada mesa de control dispone de luces piloto que indican la posición de apertura o cierre de cada válvula. En el inicio de operación de la PTAP cada filtro tuvo un medidor de caudal de agua filtrada y uno de pérdida de carga, los cuales a la fecha están dañados.

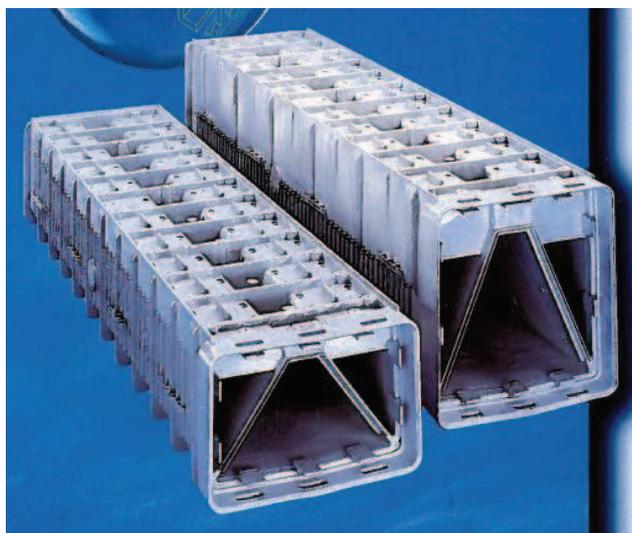
Cada mesa de operación incluye mangos operadores para: efluente filtrado, afluente al filtro, entrada de agua de lavado, salida de agua de lavado, lavado superficial, también incluye los controles para arrancar y parar la bomba de lavado superficial, todos estos funcionan en forma aceptable.

3.2.7 FONDO FALSO

El fondo falso de la Planta de Puengasí es del tipo Leopold cerámico, compuesto de bloques de arcilla vitrificada de 27,9 cm de ancho, 25,4 cm de alto y 66,70 cm de largo que se dividen en dos compartimentos: uno inferior que sirve de conducto distribuidor y otro superior que se comunica con el inferior por cuatro orificios 5/8" de diámetro. En la fotografía No. 3.3, se observa un moderno fondo falso, tipo Leopold que permite el lavado con aire y agua y, en la fotografía No. 3.4, se presenta el tipo de fondo falso Leopold antiguo, que se halla instalado en la PTAP.

En la cara superior de los bloques que están en contacto con la grava, existen 108 orificios por bloque de 5/32" de diámetro, que actúan a modo de criba para distribuir el agua de lavado o de filtrado, según corresponda. Todas las filas de bloques se orientan a un conducto central repartidor sobre el cual se ubican otro tipo de bloques denominados centrales de 27,9 cm de ancho; 25,4 cm de alto y 76,2 cm de largo.

FOTOGRAFÍA 3.3
FONDO FALSO LEOPOLD, MODERNO



Fuente: Leopold Company Inc. (1999)

FOTOGRAFÍA 3.4
FONDO FALSO LEOPOLD, ANTIGUO



Fuente: Filtro 6 PTAP

En el presente estudio, no se realizó la evaluación de los fondos falsos de los filtros, pues esto implica, desarmar todo o gran parte del lecho filtrante en el filtro a evaluar y dadas las condiciones de operación actuales de la PTAP, esto no fue factible ejecutar, pues el tiempo y trabajo que demanda una prueba de este tipo, implicaría la disminución del caudal de filtrado y por ende la restricción del tratamiento por un largo período de tiempo.

El fondo falso del filtro No 5, hace algunos años, se vio afectado por una mala operación durante el lavado, al desarmar el lecho filtrante se observó que algunos bloques Leopold, estaban totalmente rotos y otros se hallaban fisurados. Debido que el tipo de bloques Leopold instalados en la PTAP, ya no se fabrican, la reparación del fondo falso del filtro No 5, se realizó con bloques sobrantes que fueron reacondicionados y reparados, utilizando pega de alta resistencia.

Posteriormente, el 7 de enero del 2007, el filtro No 6 (lado derecho), sufrió la rotura del fondo falso y la alteración total de su capa soporte y lecho filtrante, de acuerdo a la información proporcionada, este incidente, se debió a la entrada súbita de aire atrapado en la tubería durante el lavado del filtro, en la fotografía No. 3.5, se observa las condiciones actuales de este filtro, fuera operación.

FOTOGRAFÍA 3.5

FILTRO 6, FUERA DE OPERACIÓN



Fuente: Filtro 6, PTAP

Es de suponer que debido a las bruscas aperturas de las válvulas de lavado, los bloques de los fondos falsos se hallen afectados, trizados o que las uniones de mortero entre estos se hallen desplazadas, aspectos que podrían ser evaluados ampliamente, solo cuando se proceda a desarmar los lechos filtrantes.

3.2.8 PLANOS Y DETALLES DE FILTROS

En el Anexo No. 5, planos No. 1 a No. 5, se presentan detalles en planta, cortes transversales y longitudinales de los filtros y galería de filtros; igualmente se detalla la disposición de válvulas y tuberías. Esta información, se la extrajo de planos de la PTAP; digitalizados por la EPMAPS en el año 2005.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN

4.1 PROCESOS DE LA FILTRACIÓN

La filtración es un proceso físico que se fundamenta en el paso del agua a través de un medio poroso, el cual retendrá las partículas en suspensión y otras impurezas incluyendo los flóculos que contiene el agua sedimentada, las partículas pueden incluir limo, arcilla, óxidos metálicos, y fibras orgánicas, así como una amplia gama de microorganismos como la Giardia y Cryptosporidium.

Los materiales normalmente empleados como lechos filtrantes son arena y antracita, por lo general, el proceso anterior que es la sedimentación no logra la remoción de las totalidad de las partículas y flóculos y el efluente de los sedimentadores puede tener valores de turbiedad entre 1 y 5 NTU, por lo que se requiere un proceso de “pulido” final que se logra con la filtración, así, se puede llegar tener valores de turbiedad menores a 0,5 NTU en el agua filtrada.

En general, se tiene la idea equivocada de que los medios filtrantes se asimilan a un tamiz o micro-cernidor que atrapa el material suspendido entre los granos del medio filtrante, así, se cree que las partículas en suspensión son removidas debido principalmente a una acción física de cernido. Sin embargo, debido que muchas partículas en suspensión pueden pasar fácilmente a través de los espacios inter-granulares del medio filtrante, el cernido o escurrimiento es el proceso menos importante en el proceso de filtración.

El mecanismo de cernido juega un papel general en el proceso de remoción de las partículas suspendidas, especialmente de las de mayor tamaño, la mayoría de las partículas removidas durante la filtración son considerablemente más pequeñas que los espacios de los poros o espacios intersticiales entre los granos

del medio filtrante. Al inicio de la carrera de filtración los espacios de los poros están limpios, pero conforme avanza el ciclo de filtrado las partículas transportadas se van adhiriendo a la superficie de los granos del medio filtrante, provocando que los canales de circulación se estrechen y que el efecto de intercepción provoque la retención de partículas más pequeñas.

La filtración depende de la combinación de complejos mecanismos físicos y químicos, así, se considera que esta es el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios, adherencia y transporte, los cuales dan como resultado la remoción de las partículas en suspensión del agua.

4.1.1 MECANISMO DE ADHERENCIA

La adherencia de las partículas suspendidas a la superficie de los granos del material filtrante como a las partículas previamente depositadas o retenidas, es el principal factor de éxito en la filtración a través de medios porosos.

El mecanismo de adherencia es un proceso en el cual su eficiencia depende de las características de las superficies de los granos de la matriz porosa y de las partículas suspendidas que se adhieren a estos, dos son los factores en la adherencia de una partícula:

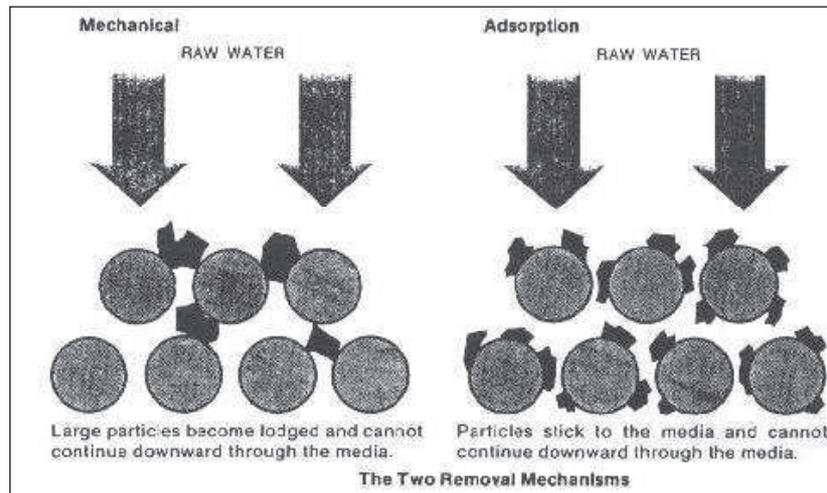
- a) La capacidad de la partícula para adherirse, cuando entra en contacto con los granos.
- b) El transporte de la partícula a una posición donde entre en contacto con la superficie del grano o que este lo suficientemente cerca para ser atraídas por éste.

El proceso de adherencia de las partículas es similar al proceso de floculación, una partícula pequeña que se halla cerca de una superficie sólida, está sujeta ya sea a la atracción o repulsión eléctrica, así la adherencia se atribuye a dos tipos de fenómenos: interacción entre las fuerzas de repulsión eléctricas y las fuerzas de atracción de Van der Waals, ver gráfico 4.1.

La adherencia, también está sujeta a las fuerzas hidráulicas resultantes de la circulación del agua que pasa a través de un medio poroso.

GRÁFICO 4.1

MECANISMOS DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS



Fuente: AWWA. (1999)

En general durante el ciclo de filtración, los granos del medio filtrante están cubiertos por una capa o interfase sólido-líquida, la carga de superficie producida sobre esta interfase es importante para asegurar una prolongada carrera del filtro antes de que sea necesario su lavado. Sí, se tiene en la floculación y sedimentación una óptima desestabilización de los coloides, es muy probable que las partículas remanentes serán adecuadamente desestabilizadas para su filtrado efectivo.

Las fuerzas de adherencia entre las partículas depositadas y los granos de arena pueden ser tan fuertes que estas no se removerán durante el retrolavado del medio filtrante, las impurezas retenidas pueden formar junto con los granos de arena, bolas de barro muy resistentes a la limpieza con retrolavado y que por su peso se sedimentan cuando se expande el lecho filtrante durante el lavado. Por tanto, se debe asegurar que las fuerzas de adherencia sean suficientemente fuertes para atrapar y retener las impurezas y al mismo tiempo lo suficientemente débiles para permitir su desprendimiento o remoción durante el retrolavado.

4.1.2 MECANISMO DE TRANSPORTE

Para que se produzca la adherencia, las partículas deben ser llevadas lo suficientemente cerca a la superficie del grano para ser atraídas y unirse a este. Las partículas suspendidas son transportadas por el flujo del agua a través de los intersticios del medio filtrante que, en condiciones normales, es de tipo laminar.

Tres son los principales mecanismos que permiten el transporte de las partículas suspendidas a través del medio filtrante: intercepción, sedimentación y difusión (ver gráfico 4.2).

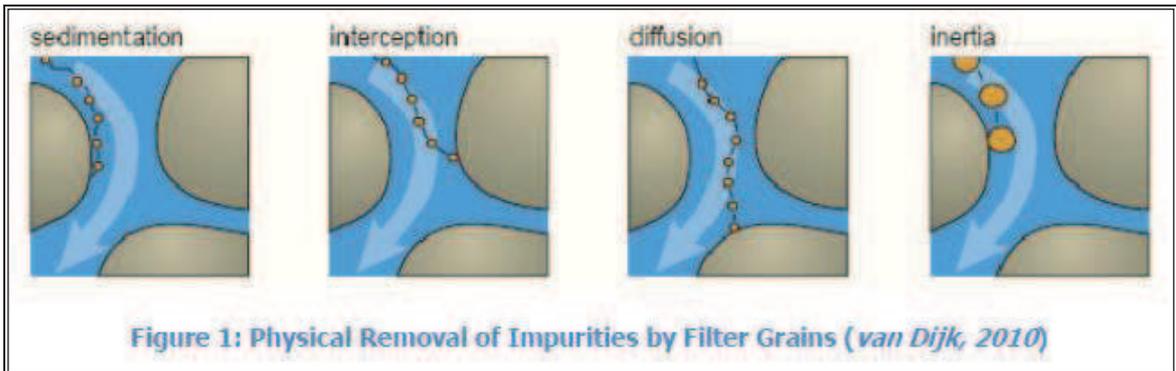
- a) La intercepción es el proceso por el cual una partícula que es transportada a lo largo de una línea de flujo, tiene la posibilidad de acercarse lo suficiente a la superficie de un grano de arena y fijarse en esta.
- b) La sedimentación es el proceso en el cual una partícula es desviada de la trayectoria de la línea de flujo por el efecto de la gravedad.
- c) La difusión es el proceso por el cual las partículas son desviadas erráticamente por las fuerzas de la actividad molecular (movimiento browniano), esto ocurre bajo condiciones de flujo laminar y se debe al aumento de la energía termodinámica y a la disminución de la viscosidad del agua. El movimiento de partículas mayores a 1 μm es afectado por la fuerza de arrastre y de inercia de ella, por tanto la intensidad del movimiento de difusión es inversamente proporcional al tamaño de las partículas suspendidas.

La eficiencia de los mecanismos de intercepción y sedimentación en la filtración es mayor al aumentar el tamaño de las partículas, pero la eficiencia de la difusión se incrementa al disminuir el tamaño de las partículas, así, aunque un filtro puede remover las partículas grandes de manera eficiente por intercepción y sedimentación, y las partículas muy pequeñas por difusión, habrá partículas con un tamaño intermedio con las que la eficiencia de remoción es relativamente baja.

En términos prácticos de la filtración, este tamaño es alrededor de 1 a 5 μm , debe considerarse que los ooquistes de *Cryptosporidium*, son de aproximadamente 5 μm de diámetro, por tanto su eliminación con la filtración es difícil.

GRÁFICO 4.2

MECANISMOS DE TRANSPORTE DE LAS PARTÍCULAS



Fuente: TU-Delft Open Course Ware

La desestabilización de los coloides que permita una efectiva remoción de las partículas en los procesos previos a la filtración, como la coagulación, floculación y sedimentación, es un aspecto de suma importancia en la eficiencia de la filtración rápida.

La filtración puede ocurrir con una acción de profundidad o con una acción superficial. En el caso de la filtración con acción de profundidad, la retención de impurezas se produce en todo el medio filtrante y la carrera de filtración es máxima; con la filtración de acción superficial, la retención de impurezas se produce sólo en la superficie (es decir, en las primeras capas del medio filtrante y la carrera de filtración es mínima, es importante equilibrar estas dos acciones a fin de que el medio filtrante trabaje adecuadamente, en lechos dobles se debe considerar que la arena tiene que cumplir únicamente la tarea de acabado final.

La principal diferencia entre los dos mecanismos de filtración se presenta en la uniformidad del medio filtrante, en la acción superficial, el medio filtrante presenta un coeficiente de uniformidad $\geq 1,7$, mientras que en la acción de profundidad el valor del coeficiente de uniformidad está en el rango de 1,2 a 1,4.

La filtración rápida del agua coagulada o floculada debe preferencialmente, ser realizada con acción de profundidad, ya que en caso contrario se generarán carreras de filtración cortas, con baja producción efectiva de agua filtrada.

4.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN RÁPIDA

La eficiencia de la filtración rápida está relacionada con los siguientes factores:

- Características de la suspensión
- Características del medio filtrante
- Características hidráulicas
- La presencia de algas u otros microorganismos adheridos al medio filtrante

4.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA SUSPENSIÓN

En virtud que las plantas de tratamiento convencionales, tienen como procesos previos a la filtración la coagulación, floculación y sedimentación las características de la suspensión están íntimamente relacionadas con estas etapas, es decir, una mala dosificación de coagulante provocará una mala formación de los flóculos y esto a su vez generará una deficiente sedimentación de los mismos, lo que ocasionará perturbaciones en el medio filtrante y la obtención de carreras cortas de filtración

En general, la eficiencia de remoción de partículas suspendidas en un medio filtrante está relacionada con las características de la suspensión, que se indican en el cuadro 4.1, que constituye un resumen, elaborado a partir de la descripción de los factores de la filtración que indica el CEPIS (1992_a, pp. 53-55), en este sentido, las características físico-químicas de la suspensión provenientes del pre-tratamiento, afectan notoriamente la eficiencia de un filtro.

Muchas veces según el tipo de suspensión, el filtro puede producir un efluente de mayor o menor turbiedad trabajando a la misma tasa de filtración, esto a pesar de que se haya seleccionado el medio filtrante más idóneo.

CUADRO 4.1**CARACTERÍSTICAS DE LA SUSPENSIÓN Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN**

	CARACTERÍSTICAS	COMENTARIO
1	Tipo de partículas suspendidas	Las pérdidas de carga acentuadas o no dependerán del tipo de partículas contenidas en los flóculos que ingresan al filtro.
2	Tamaño de las partículas suspendidas	El tamaño crítico de las partículas suspendidas para el cual se tiene menos oportunidad de contacto entre estas y los granos del medio filtrante es de 1 μm .
3	Densidad de partículas suspendidas	A mayor densidad de las partículas suspendidas mayor es la eficiencia de remoción de las partículas de tamaño superior al crítico.
4	Resistencia o dureza de las partículas suspendidas (flóculos)	Los flóculos débiles pueden romperse y penetrar más profundamente en el medio filtrante, los flóculos resistentes no se rompen fácilmente pero provocan pérdidas de carga mayores y carreras de filtración más cortas.
5	Temperatura del agua por filtrar	Al aumentar la temperatura se incrementa la energía termodinámica del agua, por otra parte la disminución de la viscosidad del agua promueve la sedimentación de las partículas mayores a 1 μm .
6	Concentración de partículas en el afluente	Después de un tiempo de filtración la eficiencia en la remoción, se incrementa con el aumento de las partículas retenidas en el medio filtrante, pues las partículas retenidas hacen las veces de colectoras de otras partículas suspendidas.
7	Potencial , zeta de la suspensión	Como los materiales filtrantes generalmente tienen potenciales zeta negativos, es recomendable que las partículas suspendidas tengan potencial zeta neutro o positivo para favorecer su remoción.
8	pH del afluente	El pH influye en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante.

Fuente: CEPIS. (1992_a). Manual III: Teoría

Elaborado por: Fernando Ojeda N

La eficiencia de un filtro depende de las características de volumen, densidad y tamaño del flóculo afluente al lecho filtrante, cuando el flóculo es débil cualquiera sea el medio filtrante usado, tenderá a romperse y salirse, al contrario, cuando el flóculo es duro o compacto este tiende a quedarse en la superficie del medio, incrementando rápidamente la pérdida de carga.

El tamaño de las partículas influye en el mecanismo que predomina en la remoción de las partículas suspendidas, se considera que tamaños del orden de 1 μm , corresponden a un tamaño crítico, pues tienen menores probabilidades de contacto entre la partícula suspendida y el grano del medio filtrante.

Diferentes estudios, realizados para determinar la relación entre el pH, potencial zeta y eficiencia del filtro han determinado, resultados difíciles de evaluar y contradictorios.

4.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FILTRANTE

4.2.2.1 Tipo de medio filtrante

La arena se emplea comúnmente como medio filtrante, debido al retrolavado se produce su estratificación, así los granos más pequeños se ubican en las capas superiores y los granos más grandes en las inferiores, esto provoca que el flóculo, conforme penetra en el lecho filtrante, encuentra poros más grandes que facilitan su paso.

Una mayor retención de partículas en la superficie, posibilitan la presencia en el interior del medio filtrante de presiones inferiores a la atmosférica, que provocan la compactación del lecho filtrante y la posibilidad de formación de bolsas de aire además de acortar las carreras de filtrado.

Teóricamente la solución para el problema de la estratificación del medio, sería emplear arena con un coeficiente de uniformidad cercano a la unidad, pero la preparación de la arena, no sería económicamente ventajosa por el alto costo que representaría, por lo que en la práctica, se especifican arenas con coeficientes de uniformidad menores a 1,5.

Otra solución, es obtener una disminución de la permeabilidad con la profundidad, al emplearse medios granulares de diferente densidad, como la antracita y arena, se obtiene, que por efecto del lavado ascendente, la antracita por tener menor densidad que la arena se deposite sobre ésta, que posee mayor densidad y granos más finos.

4.2.2.2 Características de los materiales filtrantes

Es importante la determinación de las características granulométricas de los materiales filtrantes que forman el medio filtrante, para diseñar o evaluar un sistema de filtración, así estos pueden ser especificados o analizados considerando al menos seis características principales, así:

4.2.2.2.1 Tamaño efectivo (d_e)

El término tamaño efectivo (d_{10}) fue definido por Allen Hazen en 1892 y corresponde al tamaño de los granos correspondiente al porcentaje del 10%, tomado en relación a los porcentajes en peso del material que pasa por los diferentes tamices de una serie granulométrica y se lo determina de la curva granulométrica de una muestra representativa del material filtrante analizado.

- Tamaño efectivo (d_{10}) = (d_e)

4.2.2.2.2 Coeficiente de uniformidad (CU)

La pendiente correspondiente a la mayor porción de una curva granulométrica puede expresarse en función del término coeficiente de uniformidad (CU), que representa la pendiente promedio de la curva granulométrica, obtenida en la zona comprendida entre los tamaños correspondientes al 10 y 60%.

Con relación al porcentaje en peso que pasa por los tamices de una serie granulométrica, el coeficiente de uniformidad es igual a la relación entre los tamaños de los granos correspondientes al 60% y 10% de una muestra representativa del material filtrante, (ver gráfico 4.2).

$$CU = (d_{60}) / (d_{10}) \quad (4.1)$$

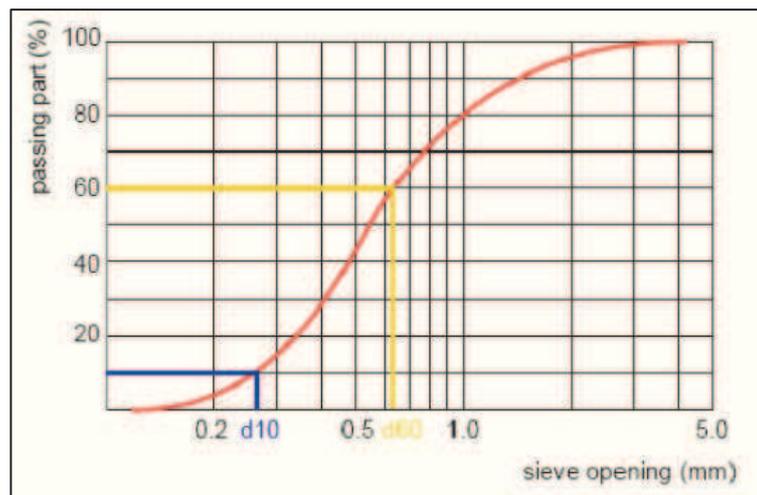
Donde:

d_{10} = Tamaño del tamiz que deja pasar el 10% del peso total del material

d_{60} = Tamaño del tamiz que deja pasar el 60% del peso total del material

Este coeficiente realmente debería llamarse de desuniformidad pues su valor es mayor para arenas menos uniformes. Su importancia radica en que la mayor o menor penetración de impurezas a lo largo del medio filtrante depende de su valor. Cuanto menor sea el coeficiente de uniformidad, más uniforme será el material granular y por tanto la penetración de impurezas será más profunda y la duración de la carrera del filtro será mayor, pero probablemente se requerirá mayor volumen de agua de lavado para remover las partículas que han penetrado muy profundamente en el medio filtrante. En un material granular con un coeficiente de uniformidad igual a uno, todos sus granos serían teóricamente uniformes.

GRÁFICO 4.3
CURVA GRANULOMÉTRICA



Fuente: TU-Delf Open Course Ware. (2004)

4.2.2.2.3 *Peso específico*

El peso específico depende del tipo de material granular empleado como medio filtrante y es igual al peso de los granos dividido para el volumen efectivo que estos ocupan. Su valor es importante por cuanto determina la velocidad o tasas de lavado requeridas para conseguir la adecuada fluidización del lecho filtrante y por consiguiente una adecuada expansión del mismo.

4.2.2.2.4 Forma

La forma y grado de redondez de los granos del medio filtrante son importantes ya que influyen en los requerimientos de la tasa de lavado del medio, la porosidad y la pérdida de carga en el lecho, la eficiencia de la filtración y mayor o menor facilidad del flujo por el medio filtrante.

Una medida de la forma del grano, es la definición del coeficiente de esfericidad (Ce), como la relación del área superficial de una esfera de igual volumen a la del grano con el área superficial del grano o partícula considerada. El Coeficiente de esfericidad es igual a uno para las partículas esféricas y menor a uno para las irregulares.

4.2.2.2.5 Tamaño mínimo

Tamaño por debajo del cual no deben hallarse granos en el medio filtrante. El contenido de material fino en un medio filtrante de arena, se asocia con su grado de suciedad y con un deficiente lavado. La norma ASTM C-33 para agregados finos, permite hasta el 10% del material fino que pase el tamiz # 100. Se recomienda que la arena empleada como medio filtrante, no tenga más del 4% de material fino que pase el tamiz # 100.

4.2.2.2.6 Tamaño máximo

Tamaño mayor que deben tener los granos en el medio filtrante. Cuanto más grande sea el tamaño de los granos mayor será el flujo de agua que pueda circular a través del medio filtrante y un mayor volumen de agua podrá ser filtrada, sin embargo si el tamaño del grano es muy grande la calidad del agua filtrada se deteriorará por cuanto la eficiencia del filtrado se reducirá.

A fin de obtener un grado adecuado de intermezcla, que no disminuya la porosidad en la zona donde se juntan las capas de arena y antracita, se recomienda, cumplir las siguientes relaciones:

- 1) El tamaño de los granos de antracita correspondiente al 90% en peso (referente al que pasa) y el tamaño de los granos de arena correspondiente al 10% en peso (referente al que pasa = tamaño efectivo) deben mantener una relación de 3.
- 2) El tamaño de los granos de antracita correspondiente al 90% en peso (referente al que pasa) y el tamaño de los granos de antracita correspondiente al 10% en peso (referente al que pasa = tamaño efectivo) deben mantener una relación de 2.

4.2.2.3 Especificaciones de los materiales filtrantes

Aunque la selección del tipo y características del lecho filtrante es lo más importante en cualquier sistema de filtración, su selección está generalmente basada en decisiones arbitrarias, estándares aproximados o diseños previos. La ejecución de estudios de plantas piloto usando diferentes alternativas de lechos filtrantes y tasas de filtración puede ayudar a la selección del medio filtrante más eficiente para un agua en particular.

4.2.2.3.1 Arena

La arena para filtros debe estar constituida por granos de cuarzo que tengan: dureza, consistencia, durabilidad y ser resistentes a la degradación durante el transporte, almacenamiento y uso. La arena debe estar libre de arcilla, limo, suciedades, polvo, y materia orgánica.

La solubilidad en ácido clorhídrico concentrado ($1,18 \text{ g/cm}^3$) para granos menores a 2,36 mm (tamiz No 8) no será mayor al 5 % y su peso específico debe estar comprendido entre 2,5 y $2,7 \text{ g/cm}^3$.

El peso específico reviste importancia, puesto que de este dependen los requerimientos del caudal de retrolavado para la limpieza del medio filtrante.

4.2.2.3.2 Antracita

La antracita para filtros debe tener una dureza mayor a 2,7 en la escala de dureza de MOHS. El peso específico será mayor a $1,4 \text{ g/cm}^3$ y la solubilidad en ácido clorhídrico concentrado ($1,18 \text{ g/cm}^3$) no debe ser mayor al 5 %.

La principal característica de la antracita debe ser la durabilidad para que resista la abrasión producida por el lavado del filtro sin desintegrarse. Visualmente debe estar libre de: esquistos, suciedad, arcilla, limo y otros restos extraños.

4.2.2.3.3 Grava

La grava para filtros debe consistir de cantos rodados, de forma redonda o con tendencia a formas ovaladas o esféricas, libre de arcillas, limo y otras impurezas de tipo orgánico.

La solubilidad en ácido clorhídrico concentrado ($1,18 \text{ g/cm}^3$) para gravas mayores a 2,36 mm (tamiz No 8), pero menores a 25,4 mm no será mayor al 17,5 % y para gravas cuyo tamaño sea 25,4 mm o más la solubilidad no será mayor al 25 %.

4.2.2.3.4 Espesor de las capas filtrantes

En filtros rápidos de doble lecho, antracita y arena, el espesor que tenga cada material influye directamente en la pérdida de carga, así, que cuando se incrementa la altura de antracita y se disminuye la de arena, la pérdida de carga en el filtro para la misma duración de carrera disminuye en forma proporcional, del mismo modo cuanto menor es el tamaño de los granos, menor será el espesor de la capa filtrante para obtener la misma eficiencia de remoción de turbiedad.

De igual forma, a medida que aumenta el tamaño de los granos y la altura del lecho filtrante, mayor será el volumen (porosidad) disponible para el almacenamiento de las partículas (flóculos) a ser retenidas, obteniéndose de este modo carreras de filtración más largas.

La antracita de tamaño mayor a 1,7 mm pueden afectar la calidad del agua filtrada desde el principio de la carrera, por ello debe considerarse a este valor como límite, por otra parte la velocidad mínima de lavado se incrementa con la altura del lecho, por ello no debe emplearse diámetros mayores a 1,4 mm para la arena y 2,36 mm en antracita, excepto que esta última tenga una densidad menor a 1,6.

Existe dificultad en determinar el espesor de las capas filtrantes, para las cuales el filtro funcione constantemente en condiciones ideales, esto debido a la variación de la calidad del afluente en el tiempo. De estudios realizados se ha determinado la relación que debería existir entre las alturas de arena y antracita en lechos de dos capas, así se establece que no resulta económico poner alturas de antracita mayores al 60 % de la altura total del lecho filtrante. Sin embargo algunos diseños utilizan capas de arena de sólo 15 cm de arena con 55 ó 60 cm de antracita, en las que la antracita representa el 80% del espesor total del medio filtrante, lo cual puede provocar una variabilidad mayor en la calidad del efluente, ya que en caso de falla en la capa soporte (grava) se presentará la pérdida de arena por el fondo falso, generando un deterioro en la calidad del efluente mayor al que se produciría si se hubiese empleado capas de arena más profundas.

4.2.2.5 Capa soporte de grava

La capa inferior o soporte de grava está compuesta por cantos rodados de diferentes tamaños, colocados en varias subcapas, existiendo relación entre el tamaño de la grava y el espesor de la subcapa de grava, disminuyendo su tamaño del fondo hacia arriba, esto para evitar el desarreglo de las subcapas superiores. La capa de grava se coloca sobre el sistema de drenaje, cuando este lo requiere y tiene como propósito:

- Servir de soporte al lecho de arena y antracita, evitando su fuga a través de los drenes o fondo falso.
- Distribuir uniformemente el agua de lavado
- Distribuir el aire de limpieza, si se emplea una fase de lavado con aire
- Recolectar el agua filtrada en los filtros de flujo descendente

La selección de la capa soporte de grava depende del tipo de sistema de drenaje inferior o fondo falso del filtro, el cual es función del método adoptado para el lavado. En general los sistemas de drenaje inferior tienen orificios de tamaño mayor a los granos del medio filtrante, por tanto es necesario colocar capas de grava graduada que impidan que la arena se fugue hacia el drenaje o fondo falso.

Algunas relaciones importantes a cumplirse en la capa soporte, son:

- a) El tamaño mínimo de la grava de la subcapa inferior debe ser 2 a 3 veces el diámetro del orificio del sistema de drenaje inferior, sobre el cual va la capa soporte de grava.
- b) El tamaño mayor de la subcapa superior debe ser de 4 a 4,5 veces el tamaño efectivo del medio filtrante que se asentará sobre la capa soporte.
- c) Entre las subcapas de la capa soporte, el tamaño de la grava de mayor tamaño debe ser hasta 4 veces el tamaño de la grava de menor tamaño de la capa adyacente.
- d) Para la capa soporte, el tamaño de la grava de cada subcapa debe ser lo más uniforme posible, así: $d_{\max} / d_{\min} = 2$

La selección de la granulometría de la arena y antracita está sujeta a que ambos materiales se expandan en igual proporción con la misma tasa de lavado a fin de que el grado de intermezcla sea el menor posible.

Para lechos de doble capa, arena y antracita las características generalmente recomendadas para los materiales filtrantes, se presentan en el cuadro 4.2.

A fin de contar con otras fuentes de referencia, como es el caso del Brasil, en el cuadro 4.3, se presenta la composición y parámetros operacionales, recomendados para filtros de doble capa.

CUADRO 4.2

CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA LECHOS DOBLES

CARACTERÍSTICAS	ANTRACITA	ARENA	GRAVA (1) (cm)		
			Subcapa	Espesor	Tamaño
Espesor de la capa (mm)	0,45 – 0,60	0,15 – 0,30	1	5	1,6-3,2
Tamaño efectivo (mm)	0,8 – 1,1	0,45 – 0,6	2	5	3,2-6,4
Coefficiente de uniformidad	≤ 1,5	≤ 1,5	3	5	6,4-12,7
Tamaño del grano más pequeño	0,7	0,42	4	15	12,7-19
Tamaño del grano más grande	2,0	1,41			
Densidad (g/cm ³)	> 1,4	2,5 – 2,7			
Solubilidad al ácido clorhídrico	≤ 5	≤ 5			
Grado de intermezcla = (d ₉₀ antracita / d ₁₀ arena) = 3					
Grado de intermezcla = (d ₉₀ antracita / d ₁₀ antracita) = 2					

(1) Para fondo falso con bloques de arcilla vitrificada tipo Leopold comunes.

Fuente: CEPIS. (1992_c). Criterios de Diseño, Manual V, Tomo III

CUADRO 4.3

COMPOSICIÓN Y PARÁMETROS OPERACIONALES PARA FILTROS DE LECHO DOBLE

PARÁMETROS	Areia	Carvão antracito
d ₁₀ , mm:	0,40 – 0,60	0,90 – 1,10 ou 0,80 – 1,0
Coef. De Uniformid.:	1,40 – 1,60	≤ 1,40
Espessura, m:	0,25 – 0,35 (30 á 40% da camada)	0,60 – 0,70 (50 á 60% da camada)
Tamanho dos grãos, mm:	0,40 – 1,40	0,71 – 2,00
Esfericidade:	0,80	0,65
Porosidade:	0,35 – 0,45	0,45 – 0,50
Expansão do leito na lavagem, %:	Entre 20 á 40	
Velocidade de lavagem, m/min:	Entre 0,60 á 0,80	
Tempo de lavagem, minutos:	Entre 10 á 15	
Carga hidráulica disponível, m	Geralmente entre 2,5 á 3,5	
Camada suporte		
Tamanho dos grãos, mm:	25,4 – 19,0 15,9 – 9,6 6,4 – 3,2 2,4 – 1,4	
Espessura, m:	0,25 á 0,35	
Cada camada componente do meio suporte deve ser a mais uniforme possível. d _{max} /d _{min} = 2; O diâmetro do menor grão da camada inferior do meio suporte deve ser cerca de 2 a 3 vezes o diâmetro do orifício do sistema de drenagem; O diâmetro do menor grão da camada superior do meio suporte deve ser cerca de 4,0 a 4,5 vezes o valor do diâmetro efetivo do material filtrante.		

Fuente: Carbonífera CRICIUMA. (2012). Tópicos Importantes sobre filtración

4.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

A fin de que la filtración sea eficiente, se deben considerar las siguientes variables hidráulicas:

- a) Tasa de filtración
- b) Carga hidráulica disponible para el filtrado
- c) Método de control de operación de los filtros

4.3.1 TASA DE FILTRACIÓN

La adopción del valor de la tasa de filtración con la que operará un filtro, tiene que considerar: la granulometría del medio filtrante, la calidad del agua que ingresará al filtrado (sedimentada) y el tipo de pre-tratamiento aplicado. El uso de tasas de filtración más elevadas disminuye la carrera del filtro en forma inversamente proporcional a la tasa.

George Fuller, (1898), fijo la llamada tasa de filtración normal de $117,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, así hasta la década de los años 70 los diseños de filtros se realizaron con la tasa normal, esto es valores entre 120 y $150 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. Estudios realizados por muchos investigadores han demostrado que la filtración con tasas bajas, $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ o menos, no asegura la obtención de efluentes de aceptable calidad y tampoco un mayor volumen de agua filtrada a obtenerse por carrera de filtración, mientras no se tenga un adecuado pre-tratamiento del afluente, sí ésta condición se cumple se puede operar con tasas más altas.

Un aspecto muy importante a considerar es el volumen total de agua filtrada que se puede obtener durante la duración de la carrera del filtro. Se puede obtener el mismo volumen de agua filtrada con tasas de filtración bajas y carreras largas o con altas tasas de filtración y carreras cortas. En términos generales, para tasas mayores a $240 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ la producción neta se incrementa poco al llevar las carreras de filtración más allá de 40 horas, pues el aumento de la producción no pasa del 0,4% - 0,7%.

Para plantas de tratamiento de agua que traten aguas superficiales de baja calidad o que tengan controles de operación no tan prolijos y personal no calificado, el seleccionar tasas de filtración menores a $235 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, es un criterio de selección prudente. En el Brasil la normativa permite que los filtros rápidos de doble lecho, tengan máximo tasas de filtración de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. Otras referencias como el CEPIS, Manual V, Tomo 3, página 22 (ref. 10), recomiendan que para “agua decantada en medio filtrante doble, con espesor total inferior a 0.8 m” la tasa de filtración sea de 180 a $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

4.3.2 CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE

Lo ideal en una planta de tratamiento es que el fin de la carrera de filtración, se dé al mismo tiempo que en el filtro se llegue a registrar la máxima pérdida de carga o en otras palabras que se llegue a consumir la carga hidráulica máxima disponible.

La carga hidráulica a fijarse en un filtro influye notoriamente en la duración de la carrera de filtración y cuanto menor sea la capa de agua sobre el lecho filtrante, más fácilmente se producirán presiones negativas y obstrucciones de aire. La carga o altura total de agua proporcionada al sistema del filtro para que éste opere a gravedad, corresponde a la distancia entre el nivel del agua en el filtro, en operación normal, hasta el punto donde se ubica la válvula o control de la salida del efluente, aguas abajo. Si el punto de control o descarga del efluente, está situado por arriba del nivel de la superficie del medio filtrante, no se presentaran presiones negativas (menores a la presión atmosférica) dentro del medio filtrante o sistema de drenaje inferior, debido que el nivel estático estará por encima del medio filtrante; además se evitará un posible desboque (secado) del filtro, cuando el nivel del agua se ubique por debajo del nivel superior de la superficie del lecho filtrante.

La carga hidráulica con la que un filtro debe operar depende de otros factores, como el espesor y granulometría del lecho filtrante, también debe considerarse los aspectos económicos por los incrementos de altura en las cajas de los filtros a fin de lograr mayores cargas hidráulicas.

Por otra parte, el tener mayores cargas hidráulicas disponibles permite que las carreras de filtración se alarguen pero con el inconveniente de la compactación del medio filtrante lo que dificulta, durante el lavado, la remoción del material retenido en el filtro. En los diseños de filtros generalmente, se adoptan alturas de agua sobre el lecho filtrante de 1,40 a 1,80 m, llegando incluso a 3 m.

4.3.2.1 Presiones negativas

La presión negativa, también llamada altura negativa, se presenta cuando la presión en el medio filtrante durante un ciclo de filtrado, se localiza por debajo de la presión atmosférica (altura negativa). Esto puede ocurrir en los filtros a gravedad cuando la pérdida de carga total llega a sobrepasar la altura estática de carga hidráulica en un punto.

La presencia de presiones negativas no es deseable, ya que el aire disuelto en el agua que ingresa al filtro, puede dispersarse en la zona de presión negativa, produciendo burbujas que se acumulan durante el ciclo de filtrado y taponan los poros del medio filtrante provocando un rápido incremento de la pérdida de carga y afectando a la calidad del agua filtrada, dado que la velocidad de flujo es mayor en las bolsas de aire. Para eliminar la presión negativa se puede sacar el filtro de operación, antes que la pérdida de carga total alcance al nivel de inmersión del medio filtrante, otra alternativa es ubicar el punto de salida del efluente por arriba del nivel de la superficie del medio filtrante.

4.3.3 SISTEMA DE OPERACIÓN O CONTROL DE LOS FILTROS

El Sistema de control de la filtración, permite regular el caudal de filtrado, manteniendo una adecuada carga hidráulica sobre el lecho filtrante. El caudal a través del filtro debe ser lo más estable posible, por tanto, este debe ser controlado para evitar súbitos incrementos de caudal que pueden alterar el equilibrio de las partículas retenidas en el lecho filtrante, provocando su desprendimiento y el incremento de la turbiedad del efluente.

El sistema de operación o control de los filtros rápidos, cualquiera que sea su tasa de filtración o medio filtrante depende, esencialmente de la forma en que la carga hidráulica disponible es aplicada o regulada. Por otra parte, la utilización de la carga hidráulica disponible está ligada con la pérdida de carga en el medio filtrante y el tipo de dispositivo de control de la tasa de filtración del efluente.

En otras palabras la tasa de filtración está relacionada con la carga en el medio filtrante + la pérdida de carga en tuberías y accesorios + la pérdida de carga en el dispositivo de control de flujo, etc.

La carga hidráulica disponible en un determinado punto dentro del lecho filtrante, representa la presión residual que permite la circulación del agua por el área transversal del filtro. Al inicio de la carrera de filtración, el filtro se encuentra limpio, la fuerza impulsora requerida es mínima pues únicamente se debe vencer la resistencia del lecho filtrante limpio y del sistema de drenaje, tuberías y accesorios. Conforme se desarrolla la filtración, los sólidos suspendidos retenidos se acumulan dentro del lecho filtrante y la fuerza impulsora debe vencer la resistencia ofrecida por el lecho taponado, drenaje, tuberías y accesorios. Por tanto si se desea mantener una tasa constante de filtración la fuerza impulsora debe aumentar en forma proporcional al aumento en la resistencia del filtro, caso contrario el caudal a través del filtro declina o disminuye y la filtración será de tasa declinante.

Los principales sistemas o métodos de control empleados para controlar la tasa de filtración en los filtros rápidos son:

4.3.3.1 Sistema de filtración de tasa constante

En este sistema de control el caudal que ingresa a la planta, se reparte por igual entre todos los filtros en operación y se mantiene constante el nivel del agua en el canal repartidor de entrada a los filtros, dentro de un rango preseleccionado. El nivel del agua en cada filtro varía independientemente del nivel de los demás, el caudal del efluente se mantiene constante durante la carrera de filtración por

tanto, para mantener esta condición, al incrementarse la resistencia del filtro, se debe progresivamente incrementar la carga hidráulica disponible.

El nivel del agua varía desde un valor mínimo, cuando el filtro se halla limpio hasta un máximo cuando el filtro se colmata y debe ser lavado. Dependiendo del grado de colmatación o carrera de filtración de cada filtro, el nivel del agua será diferente en cada uno de ellos. A fin de evitar que al inicio del ciclo de filtrado, cuando el filtro se halla limpio, el nivel del agua se ubique bajo el nivel del lecho filtrante, se debe instalar una válvula o dispositivo de control que permita mantener el nivel mínimo. Se monitorea la pérdida de carga en cada filtro para determinar cuándo sacarlo de operación y dar paso a su retrolavado.

La principal desventaja de este sistema, respecto a otros de filtración constante es el incremento que debe darse a la altura del filtro para permitir una descarga libre al vertedero de entrada.

4.3.3.2 Sistema de filtración de tasa declinante

Este sistema de control es de tipo no mecánico, por tanto más simple que los sistemas con control de caudal o tasa constante. La entrada del agua se ubica por debajo del nivel normal de agua en cada filtro y descarga al depósito por encima del nivel medio del filtro.

Como la distribución del agua a los diferentes filtros de la misma batería, se realiza por una tubería o canal de dimensiones relativamente grandes, la pérdida de carga en el mismo, se considera despreciable y el nivel del agua es igual en todos los filtros. Todos los filtros están conectados con la tubería o canal de agua sedimentada y filtrada y todos ellos tienen el mismo nivel de agua en su entrada y salida, puesto que todos son operados bajo la misma carga hidráulica, sin embargo la tasa de filtración será diferente en cada uno, puesto que el filtro más limpio opera con una tasa mayor de filtración y el filtro más sucio o colmatado opera con una tasa menor.

A medida que los medios filtrantes se van colmatando, el nivel del agua va subiendo en todos los filtros conectados, a fin de dar la altura requerida para que el agua pase por el medio filtrante. Cuando el nivel del agua llega a un valor máximo prefijado, se saca de operación al filtro con mayor tiempo de carrera de filtración y se procede a su lavado. Cada vez que un filtro limpio entra en operación, este asume la más alta tasa de lavado sobre el resto de los otros filtros de la batería. No se requiere instrumentación para medir el caudal o pérdida de carga en cada filtro.

Una placa, orificio o válvula de posición fija debe ser instalada a la salida de cada filtro a fin de limitar el caudal de filtrado al inicio de la carrera de filtración de un filtro limpio.

4.3.3.3 Sistema de tasa de filtración y nivel constante

Los filtros de la PTAP, funcionan con el sistema de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante, es decir filtración de nivel constante y tasa constante, en el gráfico 4.4, se indica un esquema de este sistema de control de filtración.

En este sistema de filtración o de operación el nivel del agua en todos los filtros y en el canal de distribución de agua clarificada a los filtros se mantiene en un nivel constante. Al comienzo de la carrera del filtro está se encuentra limpio y ofrece poca resistencia al flujo. Si la carga hidráulica disponible se aplica totalmente al filtro, la velocidad de filtración sería muy elevada, entonces para mantener constante la tasa de filtración, se requiere que parte de la carga hidráulica disponible sea consumida por un dispositivo (válvula) controlador de gasto a la salida del filtro.

Al inicio de la carrera de filtración la válvula de control está casi cerrada para ofrecer la pérdida de carga adicional para mantener el nivel o caudal de agua deseado; conforme transcurre la carrera del filtro la pérdida de carga en el lecho filtrante aumenta, debido a la retención de las partículas y la válvula de control se

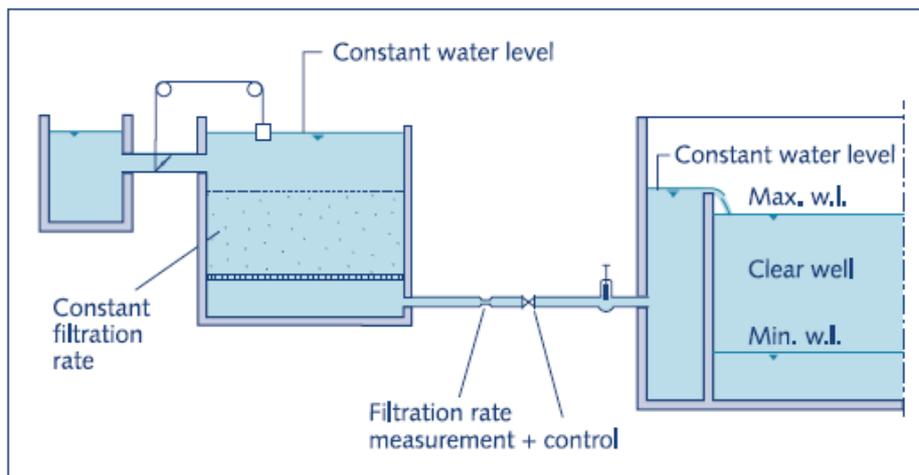
abre lentamente, disminuyendo la pérdida de carga introducida por el dispositivo.

Cuando la válvula de control a la salida del filtro se abre completamente, se debe terminar la carrera de filtración y proceder al lavado del filtro puesto que de ahí en adelante cualquier incremento en la pérdida de carga el lecho filtrante no podrá ser balanceada o compensada por la válvula o dispositivo controlador.

Sí, el caudal total de tratamiento permanece constante, el nivel de agua prefijado en los filtros permanecerá aproximadamente constante durante la carrera de filtración por efecto de la acción del controlador de caudal efluente, se presentarán incrementos de nivel cuando un filtro de la batería salga de operación para su lavado. El aumento de nivel será proporcional al número de filtros que componen la batería y al tiempo que el filtro permanece fuera de operación.

GRÁFICO 4.4

FILTRACIÓN DE NIVEL CONSTANTE Y TASA CONSTANTE



Fuente: Di Bernardo, L. (2002). Rapid Filtration

Si la suma de los caudales de filtración, fijados en cada uno de los filtros no es igual al caudal total del afluente, el nivel del agua en el interior de algunos filtros subirá o bajará gradualmente. En estos casos se ajusta el controlador variando la posición de la pesa para evitar el rebose o vaciamiento de los filtros, si el ajuste es efectuado bruscamente se puede alterar la calidad del efluente de los filtros.

El dispositivo de control instalado en la tubería del efluente funciona bajo el principio de causa y efecto, es decir ninguna corrección se efectúa si no existe una variación del caudal o pérdida de carga.

El agua cruda que entra al proceso en la Planta, se controla con un flotador que funciona en relación al nivel de agua en los filtros. El movimiento del flotador es transmitido a una válvula. La transmisión se efectúa por medio de un brazo y cable flexible los cuales disponen de graduaciones que permiten un control uniforme del caudal y permitir que la variación del nivel de agua en los filtros se mantenga dentro de una faja de 15 cm de altura y prevenir fluctuaciones del sistema de control que provoquen cambios continuos en el caudal de los clarificadores y en nivel de los filtros.

A la fecha, el sistema de control del caudal que ingresa a la PTAP, no funciona y los operadores a fin de mantener el nivel relativamente constante en los filtros, recurren a sacar o poner en operación unidades de filtración o a modificar el caudal de filtrado variando la posición de las pesas en la válvula controladora del efluente de cada filtro.

Como desventajas principales de este sistema de control, se pueden mencionar:

- Altos costos de equipos
- Elevados costos de operación y mantenimiento
- El funcionamiento defectuoso de los controladores provoca cambios bruscos en la tasa de filtración, lo cual produce el deterioro de la calidad del agua filtrada.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

5.1 IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN

La evaluación de los filtros de una planta de tratamiento de agua es una actividad importante que permite determinar su eficiencia y estado, además permite detectar deficiencias de diseño y operación; así, por ejemplo las malas prácticas operativas en el lavado de las unidades ocasionan que el medio filtrante quede mal lavado y que la calidad del efluente se deteriore y, a la larga el deterioro del mismo.

En plantas de tratamiento en las que se planea realizar modificaciones o la optimización del sistema de filtros, la evaluación permite establecer las condiciones operativas y parámetros hidráulicos con los que está operando la planta, a fin de determinar las posibilidades de mejorarlas que incluso permitan el incremento de su capacidad de tratamiento, filtrado, calidad del efluente y sus costos de operación.

Un filtro adecuadamente diseñado, en buenas condiciones físicas y operacionales y, que es empleado conjuntamente con una adecuada coagulación, floculación y sedimentación, asegurará el tratamiento adecuado del agua cruda.

Los problemas de rendimiento de un filtro, únicamente pueden ser observables cuando: se producen cambios en las cargas hidráulicas, existe inapropiada dosificación de químicos en la coagulación o éste opera a excesivas carreras de filtración. Así, no se debe asumir que todos los valores altos de turbiedad en el efluente se deben únicamente a sobrecargas de tipo hidráulico o a problemas en los procesos previos o a extremas turbiedades altas en el agua cruda, en algunos casos los problemas de rendimiento se deben a otras causas que solo son evidentes durante la presencia de estos eventos hidráulicos.

Frecuentemente la alteración o disrupción del medio filtrante y de la capa soporte de grava, pueden ser causa de un mal funcionamiento de los filtros.

En este capítulo, se describen los procedimientos y ensayos de evaluación que permiten determinar los parámetros operativos de que permitirán determinar el rendimiento y condiciones de los filtros, a saber: velocidad y caudal de filtración, velocidad y tiempo de duración de lavado, granulometría y espesor del medio filtrante, estado del lecho de grava, expansión de lecho filtrante, fluctuaciones de pérdida de carga. Para cada variable evaluada, se indicará el procedimiento a seguir en campo, los criterios referenciales para la evaluación, los resultados y su análisis

Para los procedimientos de evaluación se tomó, entre otras publicaciones, como fuente bibliográfica principal el Manual IV del CEPIS, (1992_b) y la publicación del Departamento de Salud y Control Ambiental del estado de Carolina del Sur, EE.UU. (2003).

5.2 PROCEDIMIENTO DE INFORMACIÓN GENERAL

El procedimiento de descripción general de los filtros debe incluir, entre otra información: el área transversal del filtro, configuración, localización de tanque de lavado y lavado superficial (si aplica), características del medio filtrante y capa soporte (tipo, profundidad, granulometría, espesores de capas), condiciones para poner en operación el filtro, tipo de fondo falso, etc.

En el cuadro 5.1, se presenta la información general de los filtros de la PTAP, que ha sido elaborada en base a la información que consta en el Manual de Operación de la PTAP. El formato elaborado constituye un registro de las características relevantes del sistema de filtración y puede ser aplicado y utilizado, como modelo, para levantar la información de otros sistemas de filtración en plantas de tratamiento para agua potable.

CUADRO 5.1: INFORMACIÓN GENERAL DE FILTROS DE LA PTAP

DATOS GENERALES	
Número de unidades	8 de doble lecho filtrante
Tipo de filtro	De tasa y nivel constante
Dimensiones totales del cajón del filtro	9,7 m x 11,2 m x 3,3 m
Dimensiones de cada lecho de filtración	4,85 m x 9,70 m
Área total de filtración de 8 unidades	752,8 m ²
Área de filtración por unidad doble	94,1 m ²
Área de filtración por lecho	47,05 m ²
Cota del piso del filtro	2982,9 m
Cota del piso de mesas de operación	2986,2 m
Cota del piso de galería de filtros	2981,7 m
Cota del nivel de operación normal	2985,60 m
Número de mesas de operación	8
Fondo falso	Bloques tipo Leopold
Tasa de filtración (l/s/m ²)	1,36 a 4,067
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	117,50 a 351,39
Caudal de filtración por unidad (l/s)	65 a 190
Caudal de filtración total (l/s)	1040 a 3040
Cota al eje de tubería de 16" (salida del filtro)	2982,45 m
Carga disponible de agua desde el nivel normal de operación del filtro al eje de la tubería del efluente de 16"	3,15 m
Máxima pérdida de carga, recomendada por constructor (m)	2,44 m.
SISTEMA DE LAVADO	
Sistema de lavado	Superficial y retrolavado
Caudal de lavado (l/s)	600 l/s
Cota de fondo de tanque de lavado	3.022 m
Número de canaletas por filtro	4
Cota de elevación de canaletas	2.985,28 m
Capacidad de tanque de lavado (m ³)	1.495

CUADRO 5.1: CONTINUACIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FILTRANTE	
Tipo	Triple capa: Arena, antracita y granate
Espesor total de lecho filtrante (cm)	72,4
Espesor de capa soporte de grava (cm)	25,5
ARENA	
Espesor	22,90 cm
Tamaño efectivo = (d_e)	0.42mm a 0.55 mm
Coefficiente de uniformidad	< 1.70
Peso específico	2,65 g/cm ³
ANTRACITA	
Espesor	49,50 cm
Tamaño efectivo	1mm. a 1.10 mm
Coefficiente de uniformidad	< 1,70
Dureza (Mho)	3 a 3,75 (mínimo)
Peso específico	1,55 g/cm ³ (mínimo)
GRANATE (arena de alta densidad)	
Espesor (cm)	3.80
Tamaño efectivo	0.21 – 0.32 mm
Coefficiente de uniformidad	< 1,70
Peso específico	3.8 – 4.2 g/cm ³
CAPA SOPORTE DE GRAVA	
Altura primera capa (#10 mesh a 1/8")	10,0 cm
Altura segunda capa (1/8" a 1/4")	5,0 cm
Altura tercera capa (1/4" a 1/2")	5,0 cm
Altura cuarta capa (1/2" a 3/4")	5,0 cm
Altura total de la capa soporte	25,0 cm
Peso específico	≥ 2,5

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.3 EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

5.3.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

a. Objetivo

- Obtener los valores reales de velocidad o tasa de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$) y el caudal de filtración con los cuales está operando el filtro.
- Determinar la precisión del sistema de control y medición de caudal de filtración.

b. Equipo requerido

- Cronómetro
- Una regla o varilla graduada en centímetros

c. Datos necesarios

- Área del lecho filtrante

d. Procedimiento

1. Lavar el filtro, durante el tiempo y con el caudal normalmente empleado
2. Verificar y anotar la tasa de filtración, que se ha fijado con las pesas en la válvula reguladora del efluente.
3. Al finalizar el lavado, dejar que el nivel de agua se estabilice en el borde superior de la canaleta de lavado.
4. Mantener la válvula o compuerta del afluente, cerrada
5. Colocar y fijar una regla o varilla graduada perpendicular al lecho filtrante, cuyo extremo inferior coincida con la superficie del mismo.
6. Abrir la válvula del efluente, medir y anotar el tiempo (t) empleado para que el nivel del agua en el filtro baje 10 cm.
7. Repetir y registrar los tiempos (t) para que el nivel del agua baje a 20, 30, 40 cm, etc. hasta que el nivel del agua se aproxime o coincida con el lecho filtrante y luego promediar los tiempos obtenidos.
8. La velocidad o tasa de filtración, se obtiene con la expresión:

$$V_F = (h / t) \times 86.400 \text{ (m}^3/\text{m}^2/\text{d)} \quad (5.1)$$

9. El caudal de filtración será:

$$Q_F = 1000 \times A_f \times (h / t) \quad (\text{l/s}) \quad (5.2)$$

Donde:

h = Altura (determinada) que desciende el nivel del agua en el filtro, en un tiempo de filtración a medirse (m)

t = Tiempo de filtrado (s)

V_F = Velocidad o Tasa de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$)

A_f = Área del lecho filtrante (m^2)

Q_F = Caudal de filtración (l/s)

NOTA: Durante el proceso de medición se debe cuidar que el nivel del agua en el filtro, siempre se encuentre, por debajo del borde inferior de las canaletas de lavado y por encima de la superficie del medio filtrante, esto para evitar tener errores de cálculo, al determinar el volumen y caudal de agua filtrada, por el volumen que ocupan las canaletas de lavado.

En caso de existir un totalizador o medidor de caudal o volumen en la tubería de salida del efluente, se deben registrar sus lecturas antes y después de concluir la prueba.

5.3.2 RESULTADOS DE TASA O VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

En el cuadro No. 1, Anexo No. 2, se indican los resultados de los ensayos de velocidad de filtración, obtenidos en la PTAP.

5.3.3 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

En el numeral 4.3.1, se desarrolló la parte teórica de la tasa o velocidad de filtración y se indicó los rangos recomendados de la misma y que servirán de referencia para la evaluación de los resultados. Así, se indicó que para plantas de tratamiento de agua que tengan que tratar aguas superficiales de baja calidad o que tengan controles de operación no tan prolijos o cuidadosos y personal no

calificado, el seleccionar tasas de filtración menores a $235 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, es un criterio de selección prudente.

En Brasil, la normativa permite para filtros rápidos de doble lecho, tasas máximas de filtración de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. Otras referencias como el CEPIS (1992_c), recomiendan para “agua decantada en medio filtrante doble, con espesor total inferior a 0.8 m” que la tasa de filtración sea de 180 a $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

El manual de operación de la PTAP, indica que el material filtrante, diseñado originalmente, permite un rango de tasa de filtración de $1,36 \text{ l/s/m}^2$ a $4,07 \text{ l/s/m}^2$ que equivale un caudal de filtrado por filtro de 64 l/s a 191,5 l/s y de 3056 l/s, como capacidad máxima de filtración de la PTAP, operando sus 8 unidades dobles de filtros.

5.3.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Para la ejecución de las pruebas de velocidad de filtración de la PTAP, los caudales del efluente de los filtros se fijaron en 150 l/s, con el sistema de pesas, valor que será comparado con los caudales de filtración que se obtuvieron en las pruebas de cada uno de ellos. Conviene mencionar que normalmente la operación de los filtros de la PTAP, se realiza fijando las pesas en 150 l/s.

Utilizando los datos obtenidos en la prueba de velocidad de filtración, se puede verificar si los medidores o instrumentos de medición de caudal del efluente del filtro, están calibrados, esto se logra comparando los valores de caudal obtenidos en la prueba con los caudales fijados en las pesas o registrados en el medidor de caudal a la salida del filtro, esto último aplicable, en las plantas que dispongan del mismo. Se considera, como aceptable que se presente una diferencia de hasta +/- 5 %, entre el caudal fijado en las pesas (150 l/s) y el caudal obtenido en la prueba de filtración.

En el cuadro No. 1, Anexo No. 2, se registran los valores de caudal fijados en el sistema de pesas y los caudales reales obtenidos en las pruebas de velocidad de

filtración de cada uno de los filtros de la PTAP. Los resultados, permiten concluir que todos los controladores de caudal de los filtros, se hallan descalibrados, ya que los caudales obtenidos en las pruebas de filtración en relación al caudal de 150 l/s, fijado en las pesas, difieren en valores que sobrepasan el $\pm 5\%$, excepto el filtro No 4 en el que se obtuvo el 4,6% y 6% de diferencia. En el filtro No 3, se tiene una diferencia apreciable de -36,5%, en el filtro No 2 de +19,4% y en los filtros No 5, 6, y 8 se presentan diferencias entre -15% y -24%. A pesar del mantenimiento y calibraciones que se ejecutan en los mecanismos de las pesas, estas al corto tiempo se vuelven a descalibrar.

La velocidad de filtración promedio determinada en las pruebas es de 0,31 cm/s, que equivale a $254,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ y a un caudal de filtración de 138,4 l/s/filtro conviene mencionar que estos valores se obtienen considerando que la PTAP está operando actualmente con solo 15 filtros, es decir 7,5 unidades dobles. La tasa de filtración promedio de $254,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, determinada en las pruebas y con las cuales está operando la PTAP, se halla dentro del rango medio recomendado de 180 a $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, valor que en la actualidad tiene un carácter conservador, aplicado en el diseño de plantas de tratamiento con niveles inseguros de operación y mantenimiento.

5.4 CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS

5.4.1 CRITERIOS GENERALES

Después de un cierto período de operación los poros del medio filtrante se saturan de partículas suspendidas, al disminuir la porosidad se presenta una mayor resistencia al paso del agua por el medio, llegando a alcanzar en determinado momento la máxima pérdida de carga, lo que se traduce en una mala calidad del efluente y el filtro es sacado de operación para su lavado.

El retrolavado es el proceso por el cual se invierte el flujo del agua en el medio filtrante, dirigiendo un flujo de agua limpia hacia arriba a través del lecho filtrante durante un período de pocos minutos, con esto se remueve los sólidos atrapados

y evita la acumulación de sedimentos en el mismo, que a la larga pueden formar las denominadas “bolas de barro”.

La velocidad del flujo de agua, hacia arriba, debe permitir una expansión limitada del medio granular, permitiendo que los depósitos acumulados se desprendan de los granos de arena y sean arrastrados con el agua de lavado, pero sin llevarse hacia las canaletas de lavado los granos de arena o antracita

Aunque la evaluación de los criterios para el lavado de los filtros, no consiste en una prueba real que se realice en el filtro, la recopilación de los criterios de: cuando, porque, como, cuanto y otros aspectos que los operadores consideran para proceder al lavado del filtro, es importante para la optimización del proceso de lavado. Inadecuados procedimientos de lavado serán perjudiciales para la calidad del agua filtrada, inclusive en filtros que estén adecuadamente diseñados y equipados.

Al analizar el procedimiento o protocolo que los operadores siguen en el proceso de lavado de un filtro, se debe, recopilar la siguiente información:

- ¿Cuáles son los criterios para determinar cuándo un filtro debe ser sacado de operación para su lavado?
- ¿Cuál es el valor máximo de turbiedad admitido en el efluente del filtro?
- ¿Cuál es la carrera máxima de filtración admitida para el filtro antes de su lavado?
- ¿Cuál es la máxima pérdida de carga admitida?
- Procedimiento para la ejecución del lavado
- Secuencia y tiempos de lavado: aire, superficial y agua
- Aspectos de inspección visual del filtro a observar durante el lavado del filtro.

Esta información, deberá ser adoptada como la línea base del proceso de evaluación de los filtros y deberá, posteriormente ser contrastada con los

resultados que se obtengan en las pruebas de evaluación y formular aspectos de optimización en los procedimientos y criterios del lavado de los filtros.

5.4.2 CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS EN LA PTAP

Es importante recabar información de las instrucciones, criterios o disposiciones que por parte del supervisor o responsable de la planta de tratamiento, se emiten al personal de operación y mantenimiento, respecto a la forma de ejecutar y controlar los filtros, así: pasos para ponerlos y sacarlos de operación, criterios para sacarlos de operación, procedimientos para el lavado, la forma y etapas de lavado, etc.

Los criterios para cuando debe salir un filtro de operación para su lavado y tiempos de lavado, que se aplican en la Planta de Puengasí, se indican en el cuadro 5.2, siguiente y en el Anexo No. 7, se presenta el instructivo ISO 9001, denominado: *“Instrucciones de Trabajo Para la Filtración del Agua”* que detalla todos los pasos que se aplican para el procedimiento de lavado de los filtros de la PTAP.

CUADRO 5.2

CRITERIOS PARA EL LAVADO DE FILTROS DE LA PTAP

Criterio		Parámetro
Criterios previos para el lavado	Turbiedad efluente (NTU)	2
	Carrera de filtración (horas)	70
	Pérdida de carga (m)	1,70
Flujo de lavado	Tiempo de Incremento (min)	1
	Caudal (l/s)	480 a 500
Tiempo de lavado	Superficial giratorio (min)	5
	Retrolavado (min)	10
	Tiempo total (min)	15
Volum. lavado/ Volum. filtrado	Promedio anual (%)	0,86

Fuente: Instructivo 9001, “Instrucciones de Trabajo Para la Filtración del Agua”, PTAP
Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.5 EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAVADO

5.5.1 ASPECTOS GENERALES

La velocidad o tasa de lavado, puede ser determinada, conociendo el área del filtro y el caudal de lavado, registrado en un medidor de flujo, así:

$$V_L = Q_L / A_F \quad (5.3)$$

Donde:

V_L = Velocidad de lavado o tasa de lavado (m/d) ó ($m^3/m^2/d$)

Q_L = Caudal de lavado (m^3/d)

A_F = Área transversal del filtro (m^2)

Si no se dispone de un medidor para el caudal de lavado o las mediciones de este no son confiables, la tasa de lavado puede determinarse mediante la ejecución de una prueba puntual de incremento de nivel en el filtro.

Los resultados obtenidos en esta prueba, también permiten determinar si el medidor de caudal o totalizador de agua de lavado se halla calibrado.

5.5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA VELOCIDAD DE LAVADO

a) Objetivo

- Obtener el caudal y la velocidad con la que se está realizando el lavado
- Determinar el grado de exactitud del controlador o medidor de lavado

b) Datos necesarios

- Área del lecho filtrante

c) Procedimiento

1. Cerrar la válvula o compuerta de ingreso del afluente al filtro
2. Dejar que el nivel del agua en la caja del filtro descienda hasta la superficie del lecho filtrante, entonces cerrar la válvula del efluente.
3. Colocar y fijar una regleta o varilla graduada a una de las paredes del filtro, cuyo extremo inferior coincida con la superficie superior del lecho filtrante.

4. Abrir la válvula de desagüe y de ingreso de agua de lavado
5. Fijar el caudal de lavado o la apertura de la válvula de lavado en el valor o número de vueltas que se emplean en el proceso normal de lavado.
6. Medir el tiempo que tarda el nivel del agua en subir una altura determinada en la caja del filtro, así 10, 20 ó 30 cm.
7. Repetir la medición del tiempo de subida del nivel, para iguales intervalos de altura, hasta que el nivel del agua se aproxime o coincida con el borde inferior de la canaleta de lavado y luego promediar los tiempos obtenidos.
8. Anotar el caudal puntual de lavado, que se registra en el medidor respectivo
9. Al inicio y fin del lavado, se anotara la lectura registrada en el totalizador de agua de lavado, para por diferencia calcular el volumen utilizado en el lavado.
10. La velocidad y el caudal de lavado, se determinan con:

$$V_L = H / t \quad (5.4)$$

$$Q_L = 1000(A \times H) / (60 \times t) \quad (5.5)$$

Donde:

H = altura que sube el nivel del agua en la caja del filtro, en un tiempo determinado (m)

t = Tiempo en el que el nivel de agua sube en la caja del filtro una altura H (minutos).

A = Área del filtro (m²)

V_L = Velocidad de lavado (m/min)

Q_L = Caudal de lavado (l/s)

11. Determinar el % de precisión del medidor de caudal

$$\text{Precisión de medidor de flujo (\%)} = Q_{LM} / Q_{LC} \quad (5.6)$$

Donde:

Q_{LM} = Caudal de lavado registrado en medidor

Q_{LC} = Caudal de lavado calculado en la prueba de expansión o incremento

NOTA: En las mediciones, cuidar que el nivel del agua este por debajo del borde inferior de la canaleta de lavado, para no alterar el volumen de lavado de agua.

5.5.3 RESULTADOS DE VELOCIDAD DE LAVADO

En los cuadros No. 2 a 9 del Anexo No. 2, se indican los resultados obtenidos en este ensayo y en el cuadro 5.3, se presenta el resumen de los mismos.

CUADRO 5.3

PRUEBAS DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO

FILTRO	Velocidad promedio de lavado (cm/s)	Caudal de lavado medidor (l/s)	Caudal de lavado prueba (l/s)	% error del medidor	Volumen lavado/Área Filtro (m ³ /m ²)	Tasa de lavado (l/s/m ²)
1 IZQ	1,18	576,7	557,1	-3,4	7,4	11,8
1 DER	1,18	575,0	555,2	-3,5	7,3	11,8
2 IZQ	1,27	498,3	599,7	20,3	6,4	12,7
2 DER	0,85	508,9	605,2	18,9	6,1	12,9
3 IZQ	1,23	543,3	576,8	6,2	6,9	12,3
3 DER	0,85	378,2	400,5	5,9	6,3	8,5
4 IZQ	1,25	523,3	587,0	12,2	6,7	12,5
4 DER	1,27	533,3	596,6	11,9	6,8	12,7
5 IZQ	1,25	551,7	588,1	6,6	7,0	12,5
5 DER	1,27	553,3	596,6	7,8	7,1	12,7
6 IZQ	1,20	538,3	564,6	4,9	6,9	12,0
6 DER						
7 IZQ	1,22	538,3	575,0	6,8	6,9	12,2
7 DER	1,23	540,0	576,4	6,7	6,9	12,3
8 IZQ	1,25	500,0	588,1	17,6	8,3	12,5
8 DER	1,23	506,4	577,4	14,0	8,4	12,3
PROMEDIO	1,18	524,3	569,6	8,9	7,0	12,1

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.5.4 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

A fin de tener valores referenciales de la velocidad de lavado que nos permitan analizar y evaluar los resultados obtenidos en las pruebas de lavado, a continuación, se mencionan los valores de velocidad de lavado ascensional recomendados por diferentes autores, para filtros dobles, así:

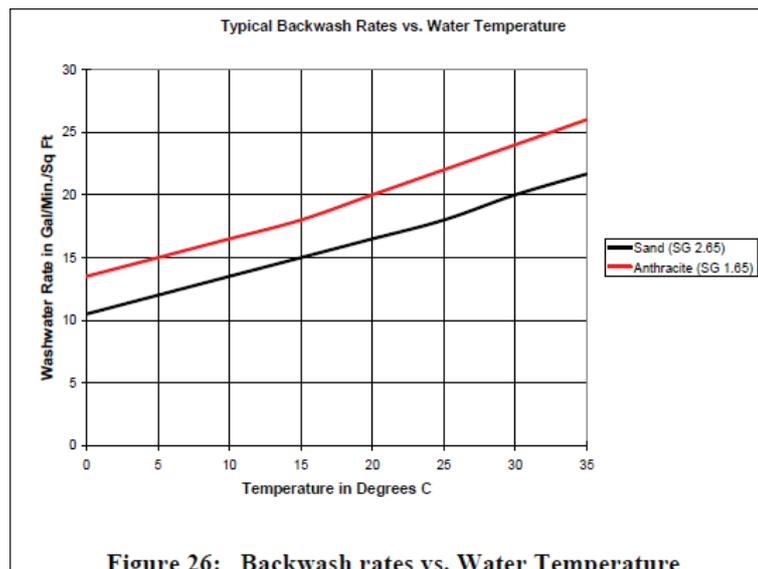
- a) Di Bernardo, L. (2002) = 80 a 100 cm/min = 1.33 a 1.67 cm/seg
- b) CEPIS. (1992_c) = 70 a 100 cm/min = 1.17 a 1.67 cm/seg
- c) AWWA. (1998) = 61.66 a 93.33 cm/min = 1.03 a 1.56 cm/seg

Con estas velocidades, el lecho filtrante debe tener una expansión, entre 20 % y 50 %.

En el gráfico 5.1, se representa la relación de la tasa de lavado en función de la temperatura del agua utilizada en el lavado de medios de antracita y arena.

GRÁFICO 5.1

TASAS DE LAVADO Vs. TEMPERATURA DE AGUA



Fuente: Hach Company. (2011). Granular media filtración for wáter treatment applications

Por otra parte, a fin de considerar que un medidor de caudal de lavado se encuentra calibrado, se considera admisible un error de (+/- 5%), entre el caudal registrado en el medidor y el caudal obtenido en la prueba de lavado, si él % encontrado se halla, fuera de este rango el medidor de lavado, deberá ser calibrado.

5.5.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La velocidad promedio de lavado obtenida en las pruebas es de 1,18 cm/s o 70,8 m/min, equivalente a 12,1 l/s/m², (ver cuadro 5.3), valor que se ubica cerca del límite inferior de los rangos recomendado por el CEPIS (1992_c) y la AWWA. (1998), ver numeral 5.5.4, pero, es menor al rango recomendado por Di Bernardo, L. (2002). En el filtro No 2, se obtuvo un valor de 0,85 cm/s 0,51 cm/min, que está muy por debajo de los diferentes rangos recomendados para lechos dobles.

Los medidores de caudal de lavado de todos los filtros excepto el del filtro No 1, se hallan descalibrados en un porcentaje que sobrepasa el valor de desviación admitido del +/- 5 %. El caudal medio real de lavado, determinado en las pruebas es de 570 l/s y el promedio registrado por el medidor fue de 524,3 l/s, para un porcentaje promedio de error del medidor de caudal del +8,9 %, ver cuadro 5.3.

Las pruebas permiten determinar que el volumen promedio gastado en agua de lavado es de 329,4 m³/lavado, para un tiempo de lavado superficial de 10 minutos que es el que normalmente aplican los operadores.

Como se indicará más adelante en el subcapítulo 5.6.5 al analizar los resultados de la expansión del lecho filtrante, las bajas velocidades de lavado encontradas, se relacionan directamente con los bajos porcentajes de expansión del lecho filtrante, determinadas en las respectivas pruebas de expansión.

5.6 EVALUACIÓN DE EXPANSIÓN DEL LECHO

5.6.1 ASPECTOS GENERALES

Es importante lograr expandir el lecho filtrante durante el lavado para maximizar la remoción de las partículas adheridas a los granos del medio, sin embargo debe cuidarse que no se produzcan pérdidas del medio filtrante por una sobre expansión del mismo durante la aplicación del retrolavado superficial. La velocidad de lavado y el diámetro de los granos de arena y antracita influirán

directamente en el grado de expansión del lecho filtrante.

La expansión del medio puede ser determinada midiendo la distancia desde el punto donde se ubica la superficie del medio antes del lavado, hasta el punto donde este llega o se expande al efectuarse el lavado. El porcentaje de expansión será igual a:

$$\% \text{ de expansión} = (\Delta h / H) \times 100 \quad (5.7)$$

Donde:

Δh = Altura que se expande el medio granular durante el lavado

H = Altura o espesor total del medio filtrante expandible (sin incluir la altura de la capa soporte de grava)

5.6.2 DETERMINACIÓN DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE

a) Objetivo

Determinar el porcentaje de expansión (fluidificación) del lecho filtrante, durante la operación de lavado del filtro y determinar si éste es adecuado para el tipo de medio utilizado.

b) Equipo y material necesario

- Un tubo metálico, al cual se le han fijado cajitas o vasitos plásticos de 5 cm de diámetro, separadas 5 cm. sus bordes superiores e inferiores.
- Un flexómetro
- Maskin tape

c) Datos necesarios

- Espesor total del lecho filtrante (arena y antracita)

d) Procedimiento

1. Ubicar dos o tres puntos alrededor de la caja del filtro, uno en la mitad del lado opuesto a la entrada de la tubería de lavado y dos puntos en la mitad de los lados adyacentes a este.
2. Cerrar la válvula o compuerta del afluente al filtro
3. Abrir la válvula de drenaje del filtro y bajar el nivel del agua en la caja del filtro,

hasta unos 10 cm del lecho filtrante.

4. Cerrar la válvula de drenaje
5. Bajar, verticalmente el tubo o varilla en el filtro hasta que su extremo inferior, tope levemente la superficie del lecho filtrante.
6. Fijar un nivel o punto fijo de referencia, por ejemplo el borde superior del filtro.
7. Colocar cinta adhesiva alrededor del tubo o varilla, a la altura que esta tope con el punto o nivel fijo de referencia, establecido en el numeral 6.
8. Iniciar el lavado del filtro en forma normal
9. Mantener fija la varilla o tubo, manteniendo de referencia la cinta adhesiva
10. Luego de unos 90 segundos, extraer, verticalmente y lentamente el tubo
11. Determinar la cajita más alta que contenga arena o antracita.
12. Medir la distancia entre el borde superior de la cajita que contenga arena y el extremo inferior de la varilla, se obtiene la altura de expansión (Δh)
13. Limpiar la arena o antracita de todas las cajitas de la varilla
14. Trasladar la varilla a otro punto de los fijados en (1), introducirla, verticalmente y lentamente y repetir los pasos (9) al (13)
15. El porcentaje de expansión del lecho filtrante, se obtiene con la ecuación (8)

5.6.3 RESULTADOS DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE

En los cuadros No. 10 y 11 del Anexo No.2, se indican los resultados de las pruebas de expansión del lecho filtrante y en el cuadro 5.4, el resumen de ellas.

CUADRO 5.4

PRUEBAS DE EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE

FILTRO	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Altura Antracita (cm)	53,0	50,0	33,0	54,0	42,0	40,0	44,0	43,0	44,9
Altura Arena (cm)	6,0	15,0	40,0	6,0	14,0	15,0	15,0	12,0	15,4
Arena + Antracita (cm)	59,0	65,0	73,0	60,0	56,0	55,0	59,0	55,0	60,3
Altura Grava (cm)	30,0	28,0	11,0	30,0	30,0	30,0	28,0	30,0	27,1
Total (cm)	89,0	93,0	84,0	90,0	86,0	85,0	87,0	85,0	87,4
% Expansión Promedio	16,9	14,3	13,7	16,7	17,9	18,2	15,7	18,2	16,4

Fuente: Datos obtenidos en pruebas de expansión

5.6.4 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

La AWWA (1999), recomienda que la expansión del lecho filtrante, al aplicarse la máxima tasa de lavado, este entre el 15% y 30% y según la EPA (1995), la óptima expansión del medio se produce entre el 20 y 25%. Si la expansión del lecho es demasiado baja, los medios granulares del filtro no se limpiarán adecuadamente y si es muy alta (mayor al 30%) existe el riesgo de que las partículas de arena o antracita salgan por las canaletas de lavado, además que existiría un desperdicio de agua de lavado.

5.6.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE EXPANSIÓN

La ubicación y referencia de los puntos de muestreo, dentro del filtro, en los que se determinó la expansión del lecho filtrante de la PTAP, se indican en el gráfico 5.2.

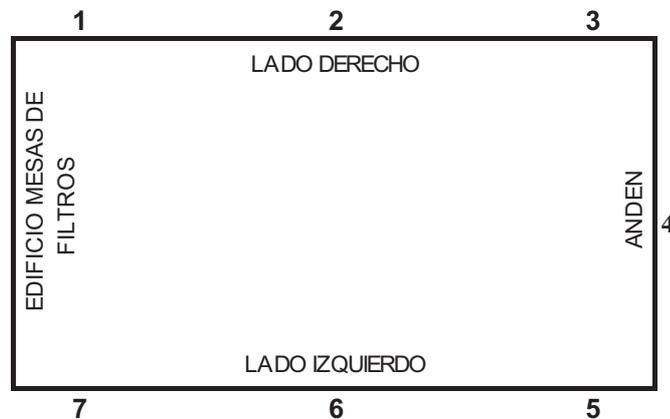
Los porcentajes de expansión obtenidos en los lechos filtrantes son bajos y se ubican en el rango de 13,7 % a 18,2 %, y en promedio de 16,4 %, valores inferiores al rango óptimo de expansión del 20% al 25%.

En los filtros 2 y 7, en los puntos No 4 y 3 respectivamente, se presentaron expansiones puntuales bajas de 7,7 % y 8,5 %, lo que denota la presencia de zonas con bajo predominio en el flujo de lavado en el área transversal del lecho filtrante, especialmente en la zona ubicada en el lado opuesto a la entrada de la tubería de lavado.

La diferencia en los valores de expansión en un mismo filtro también pueden explicar y corroborar la presunción de que los fondos falsos se hallan en mal estado, es posible que existan juntas de mortero afectadas o ladrillos Leopold rotos por los cuales el agua de lavado encuentra vías de flujo preferenciales y se esté fugando la arena al tanque de lavado; así como también, puede haber ladrillos Leopold cuyos orificios estén taponados u obstruidos sus conductos interiores.

GRÁFICO 5.2

PUNTOS DE MUESTREO PARA MEDIR EXPANSIÓN DE LECHO FILTRANTE



Elaborado por: Fernando Ojeda N

Durante los sondeos realizados en los filtros, no se observó la presencia de formación de bolas de barro en los lechos filtrantes, pero durante el proceso de toma de muestras para los análisis granulométricos, se observó que la arena y antracita tienen un sedimento fino en forma de lodo no compactado; además en la superficie del lecho de antracita, luego del lavado, es evidente el depósito de sedimentos en ciertas áreas del filtro, especialmente en la zona adyacente a la entrada de la tubería de lavado, estos aspectos evidencian que la velocidad de lavado es baja.

De la información recopilada en la PTAP, se conoce que la válvula para el control del caudal de lavado ha sido regulada para un caudal menor a 600 l/s (en las pruebas de lavado se observó caudales máximos de 515 l/s) a fin de reducir los esfuerzos hidráulicos (presión) sobre los fondos falsos (ladrillos Leopold), aspecto que es congruente con el estado de deterioro de los mismos y la fatiga de los materiales por los esfuerzos consecutivos a los que están y han estado sujetos durante la operación y lavado. Pero, que por otro lado, de los resultados de expansión de los lechos filtrantes, encontrados en la evaluación, tiene su lado negativo en la disminución de la eficiencia del lavado y en la paulatina acumulación de sedimentos finos que a la larga ocasionarán la formación de bolas de barro en el medio filtrante.

5.7 EVALUACIÓN DE TIEMPO DE DURACIÓN DE LAVADO

5.7.1 ASPECTOS GENERALES

El tiempo de duración del lavado, está relacionado directamente con el volumen total empleado para lavar el filtro, al extenderse la duración del retrolavado se removerá una cantidad mayor de suciedad del medio filtrante, sin embargo, es posible que se obtenga un medio filtrante demasiado limpio a costa de utilizar un alto volumen de agua de lavado y tiempos de lavado demasiado largos, lo que representa un mayor costo por la utilización de mayores volúmenes de agua.

El tiempo de duración del retrolavado del filtro, debe estar basado en pruebas que determinen el “tiempo óptimo de lavado”, y consiste en medir a intervalos de tiempo la turbiedad del agua de lavado que sale por las canaletas de recolección.

Al graficar los valores de turbiedad del agua de lavado en función del tiempo desde el inicio del mismo, se obtiene una curva que se caracteriza por valores elevados de turbiedad que incluso pueden ser mayores a 1000 NTU y conforme avanza el ciclo de lavado la turbiedad disminuye hasta llegar a un punto de inflexión que en el caso de la PTAP es de 10 a 8 NTU, a partir de este valor la turbiedad decrece a un valor de 5 NTU, para luego tomar una tendencia asintótica conforme transcurre el tiempo de lavado.

5.7.2 PROCEDIMIENTO DE TIEMPO ÓPTIMO DE LAVADO

a) Objetivo

Determinar la curva de turbiedad del agua de lavado con respecto al tiempo de lavado y determinar de ella el tiempo óptimo para efectuar la operación de lavado.

b) Procedimiento

1. Medir la turbiedad del agua proveniente del tanque de lavado, teóricamente la turbiedad final del agua de lavado del filtro, debe ser igual a la turbiedad del agua con la que se lave el filtro.

2. Preparar 16 frascos o vasos plásticos de 150 ml de volumen y numerarlos del 1 al 16 (correspondientes al rango de 0 a 14 minutos).
3. Si el filtro tiene una sola canaleta para evacuar el agua de lavado, se fijará como punto de muestreo, el extremo por el cual sale toda el agua del lavado. Si el filtro dispone de dos o más canaletas, se fijaran dos extremos de canaletas como puntos de extracción de las muestras, a fin de evaluar la distribución del flujo de lavado en el lecho filtrante.
4. Iniciar el lavado en las condiciones que normalmente se lo realiza, cuando el agua de lavado desborde por la canaleta, se iniciara el conteo del tiempo de lavado. Se toma muestras cada 30 segundos hasta los 2 minutos, luego cada minuto, hasta completar el minuto 14.
5. Medir, con el turbidímetro la turbiedad de cada muestra
6. Dibujar en papel semi-logarítmico la curva turbiedad versus tiempo
7. Determinar en la curva el punto de inflexión inferior en donde la curva obtenida, se hace asintótica con relación al eje horizontal. El tiempo óptimo de lavado será el correspondiente a este punto de inflexión.

CUADRO 5.5

PRUEBAS DE TIEMPO DE LAVADO EN FILTROS

TURBIEDAD DE AGUA DE LAVADO (NTU)															
Filtro	1		2		3		4		5		6	7		8	
Tiempo (min)	IZQ	DER	IZQ	IZQ	DER	IZQ	DER								
0	805	840	815	924	725	852	821	822	712	754	709	578	571	570	680
1	495	528	503	606	587	571	425	453	644	656	453	458	440	370	462
2	212	256	224	254	231	230	240	240	203	245	254	220	253	195	235
3	93	122	83	117	110	114	110	127	82	100	112	103	110	174	126
4	31,5	35,6	29,4	33,8	45	53	47	59	65	70	54	33,6	33,2	114	96
5	8,8	14,1	12,1	15,9	9,3	12	15,4	15,9	10,3	16,4	12,3	14,9	16,5	10,6	14,4
6	4,86	8,9	7,4	10,1	8,74	9,34	7	9,2	8,2	8,6	7,4	7,1	7,3	5,6	8,1
7	4,1	6,6	5,6	8,5	4,16	6,9	5	4,2	7,8	6,2	5,1	5,6	4,8	5,3	5,8
8	3,91	5,2	5,3	6,1	3,39	4,15	3,9	3,8	4,8	5,1	3,5	3,2	4,6	4,3	5,3
9	2,83	3,4	5,1	5,4	2,1	2,6	3,5	3,3	3,4	3,8	2,8	2,4	4,6	2,9	3,3
10	2,46	2,7	4,8	4,3	1,45	1,9	3	2,9	2,5	2,8	2,1	3	3,8	2,6	2,8
11	2,12	2,41	4,5	3,9	1,3	1,7	2,8	2,6	2,24	2,56	1,8	2,75	3,5	2,51	2,4

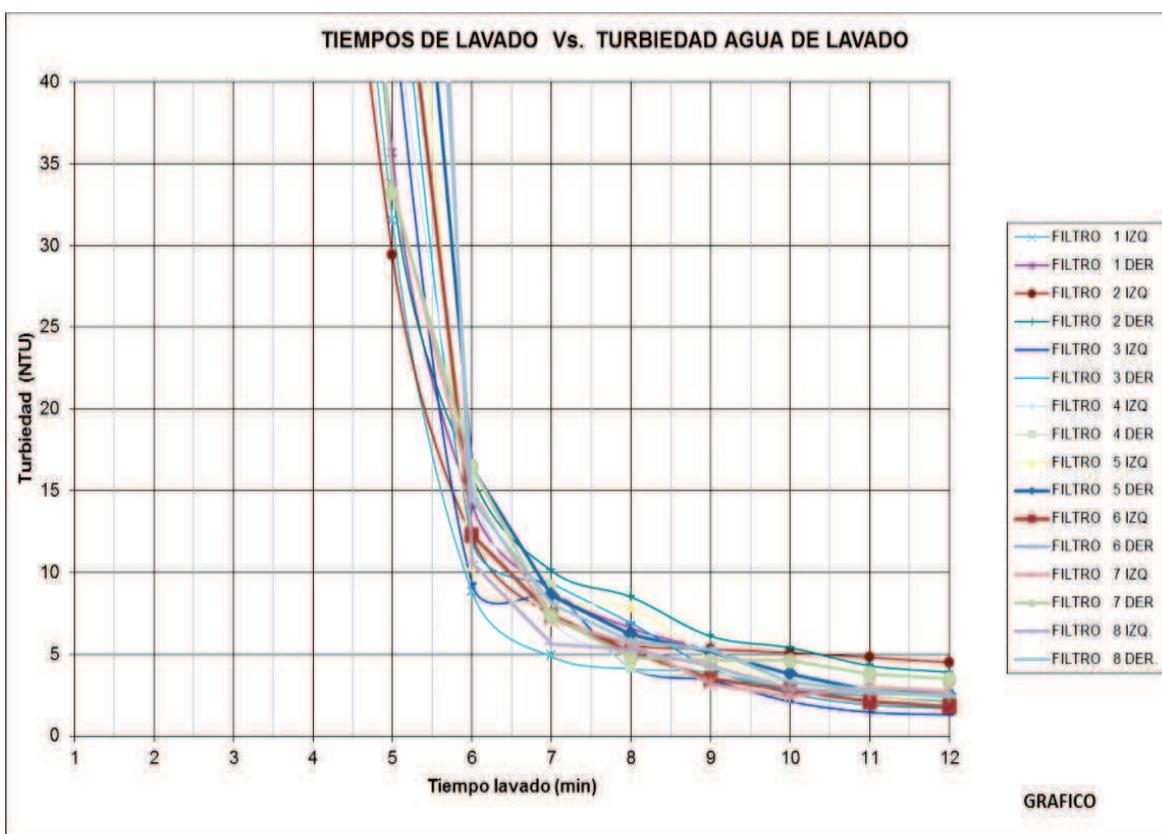
Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.7.3 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LAVADO

En el cuadro 5.5, se presenta los resultados de las pruebas de lavado, y en el gráfico 5.3, se visualiza la parte inferior de las curvas de tiempo Vs. Turbiedad de agua de lavado para turbiedades menores a 40 NTU, para los fines del presente estudio y determinación del tiempo óptimo de lavado el tramo inferior de las curvas, constituyen tema de interés.

GRÁFICO 5.3

TIEMPO DE LAVADO Vs. TURBIEDAD DE LAVADO



Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.7.4 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

La curva de tiempo y turbiedad, permite evaluar si el tiempo de duración del lavado es muy corto, muy largo y si la turbiedad del agua de lavado llega al rango recomendado de 10 a 15 NTU. Como ya se indicó, si el tiempo de duración es demasiado largo, habrá un consumo excesivo de agua y el filtro tendrá problemas

en su “maduración” cuando entre en operación; por otro lado si el tiempo de lavado es muy corto el filtro no será adecuadamente limpiado o lavado, lo que a la largo provocará el deterioro del medio filtrante por la formación de “bolas de barro”.

Hay que recordar que los dos aspectos más importantes que determinan la eficiencia del retrolavado son la intensidad y duración del mismo. Previo la determinación del tiempo óptimo de lavado, hay que determinar y evaluar la expansión del medio filtrante y la velocidad o tasa de lavado, mediante los procedimientos antes descritos.

5.7.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados y curvas de lavado obtenidas, permiten establecer que el tiempo óptimo del retrolavado está en el intervalo de 8 a 9 minutos, sin considerar el tiempo de 5 minutos para el lavado superficial.

Dado los 36 años de operación de los filtros y considerando que los resultados de velocidad de lavado y expansión del lecho filtrante obtenidos son bajos y que solo se han realizado reposiciones de la capa de antracita, se recomienda que en las actuales condiciones el lavado tenga al menos una duración de 10 a 12 minutos contabilizados o medidos desde el momento en que el agua de lavado desborde por las canaletas de lavado. Considerando el lavado superficial, el tiempo de un ciclo de lavado completo recomendado sería de 15 a 17 minutos.

Nota: A los tiempos de lavado cronometrados en las pruebas, se les ha sumado un minuto más para obtener el tiempo total real del lavado de las pruebas. Un minuto es el tiempo aproximado que toma el nivel del agua en ascender desde el nivel de la antracita hasta el desborde por las canaletas de lavado.

En vista que las turbiedades del agua de lavado a los 9 y 10 minutos tienen turbiedades que en algunos casos sobrepasan las 5 NTU, es recomendable que el agua del filtrado inicial, sea desechada o evacuada por el drenaje durante los cinco primeros minutos, esto para preservar la calidad del efluente.

5.8 EVALUACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE

5.8.1 ASPECTOS GENERALES

El medio filtrante comienza a cambiar desde el momento en que éste es colocado en el filtro y luego durante la etapa de operación, los continuos lavados, tienden a desgastar los granos de arena o antracita.

Los lechos filtrantes desgastados pueden provocar altas pérdidas de carga, lavados más continuos, y demandar altas tasas de lavado para tener una limpieza más profunda. Finalmente la arena y la antracita pueden llegar a entremezclarse.

La evaluación de la condición del medio filtrante es un aspecto importante en la identificación de los factores que limitan el rendimiento del proceso de filtración. La presencia de “bolas de barro”, grietas, hundimientos o cráteres en la superficie y lecho desnivelado, pueden generalmente ser ocasionados por una excesiva dosificación de coagulante, polímero y retrolavado inadecuado.

5.8.2 PROCEDIMIENTO DE GRANULOMETRÍA Y ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE.

a) Objetivo

- Determinar la granulometría y curvas granulométricas de las capas de arena y antracita.
- Obtener el tamaño efectivo (d_{10}) y coeficiente de uniformidad de la arena y antracita.
- Determinar los espesores de las capas de arena y antracita
- Determinar visualmente las condiciones de ubicación y estado del medio filtrante (esto desarrollar en el procedimiento).

b) Equipo requerido

- Una pala
- Un flexómetro o varilla graduada en centímetros
- Una varilla metálica de ½ pulgada de diámetro

- Fundas plásticas para las muestras de arena y antracita (300 a 400 gr)
- Un juego de tamices o cedazos
- Balanza

c) Datos necesarios

- Características granulométricas del diseño original del filtro

d) Procedimiento de muestreo

1. Abrir la válvula de drenaje y evacuar totalmente el agua contenida en la caja del filtro.
2. En la zona central del filtro, trazar sobre la superficie de la antracita o arena un cuadrado, cuyos lados sean aproximadamente el doble de la altura de la antracita. En el caso de la PTAP, se consideró un cuadrado de un metro por lado aproximadamente.
3. Colocar alrededor del cuadrado, pedazos de tabla de monte o tabla triplex, cuyo tamaño permita la circulación de una persona, de modo que no se altere al lecho filtrante.
4. Del cuadrado central, con una pala extraer poco a poco la antracita hasta una profundidad de 20 cm. A esa profundidad se compacta y nivela con las manos las paredes laterales del hoyo y su fondo, con el fin de prevenir el deslizamiento del material.
5. Trazar un cuadrado o circunferencia circunscrita de menor tamaño, aproximadamente 15 cm menos por cada lado y repetir el procedimiento de extracción y compactación de paredes laterales, hasta llegar a la zona de intermezcla entre la antracita la arena.
6. Medir la altura de la capa de antracita
7. Tomar en la mitad de la altura de la capa de antracita, una muestra de aproximadamente 300 a 500 gramos y colocarla en una funda plástica.
8. Repetir el procedimiento de extracción y compactación de paredes laterales, esta vez, para la capa de arena, hasta llegar a la grava.
9. Medir la altura de la capa de arena
10. Tomar en la mitad de la altura de la capa de arena, una muestra de aproximadamente 300 a 500 gramos, la cual se coloca en una funda plástica, para su posterior traslado al laboratorio.
11. Restituir al agujero el material extraído en orden inverso al de extracción

12. Secar las muestras de arena y antracita
13. Seleccionar al menos seis cribas de la serie U.S. Standart, que permitan clasificar la muestra en varios tamaños, la criba más gruesa no debe retener más del 20 % de la muestra.
14. Armar los tamices, el más fino en el fondo y el más grueso arriba
15. Pesar la muestra desecada de arena o antracita y anotar dicho valor
16. Vaciar la muestra de arena o antracita en la criba superior
17. Agitar el conjunto de cribas en forma manual o mecánica
18. Colocar en papeles la arena o antracita retenida en cada criba
19. Pesar las muestras parciales retenidas en cada criba y en el recipiente de fondo, anotar el peso y el respectivo número de malla
20. Calcular los % acumulados retenidos en cada criba
21. Calcular los porcentajes acumulados de peso que pasan por cada malla
22. El porcentaje de peso acumulado que pasa por cada criba se plotea en el eje de ordenadas (escala logarítmica) y la abertura de la malla en mm en el eje de abscisas (escala de probabilidades).
23. De la curva granulométrica se obtiene:
 - Tamaño efectivo = d_{10}
 - Diámetro 60 = d_{60}
24. Se determina:
 - Coeficiente de uniformidad = d_{60} / d_{10}
 - Grado de intermezcla = d_{90} antracita / d_{10} arena
 - Tamaño máximo del grano
 - Tamaño mínimo del grano

5.8.3 RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA Y ESPESOR DE MEDIO FILTRANTE

Como antecedente para el análisis de los resultados granulométricos realizados en el presente estudio al año 2012, se debe indicar que se contó con los datos de análisis granulométricos de la arena y antracita originales de los filtros de la PTAP (año 1977) y otros realizados en el año 2000. Así en el Anexo No. 2, cuadros No. 12 a 17 y gráficos No. 1 a 6, se presentan los datos y curvas granulométricas de

la antracita y en los cuadros No. 18 a 21 y gráficos No. 7 a 10, los de la arena, de los años antes indicados.

En los ensayos granulométricos de la arena de los filtros de la PTAP, se utilizó los tamices #: 14, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60.

5.8.3.1 Resultados granulométricos de la antracita

En el Anexo No. 2, cuadros No. 12 a 17 y gráficos No. 1 a 6, se presentan los resultados de los análisis granulométricos de la antracita, realizados en el presente estudio, año 2012 y en el cuadro 5.6, indicado a continuación, se resume las características granulométricas de la antracita.

CUADRO 5.6

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE ANTRACITA

CARACTERÍSTICAS	INICIAL (1976)	FILTRO (2012)						
		F1	F3	F4	F6	F7	F8	PROM.
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,97	0,59	0,55	0,48	0,58	0,60	0,50	0,55
diámetro 60 (mm)	1,55	1,60	1,68	1,60	1,60	1,68	1,60	1,63
Coefficiente de uniformidad	1,60	2,71	3,05	3,33	2,76	2,80	3,20	2,98
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,5	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Tamaño grano más grande (mm)	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38
d90 antracita (mm)	2,10	2,10	2,20	2,00	2,00	1,90	2,00	2,03
Grado de intermezcla	2,16	3,56	4,00	4,17	3,45	3,17	4,00	3,70
diámetro medio (mm)	1,44	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40

Elaborado por: Fernando Ojeda N

En los ensayos granulométricos de la antracita, se emplearon los tamices #: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40 y 50.

5.8.3.2 Resultados granulométricos de la arena

En el Anexo No. 2, cuadros N0. 18 a 21 y gráficos No. 7 a 10, se reportan los resultados granulométricos, correspondientes a la arena, realizados en el presente estudio (año 2012) y en el cuadro 5.7, siguiente, se indica el resumen de las características granulométricas de la arena.

CUADRO 5.7**CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ARENA**

CARACTERÍSTICAS	INICIAL (1976)	FILTRO (2012)				
		F1	F3	F4	F6	PROMEDIO
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,45	0,42	0,59	0,50	0,53	0,51
Diámetro 60 (mm)	0,66	0,74	0,79	0,63	0,78	0,74
Coefficiente de uniformidad	1,47	1,76	1,34	1,26	1,47	1,46
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Tamaño grano más grande (mm)	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
diámetro medio (mm)	1,98	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.8.3.3 Resultados de espesores de medio filtrante

De acuerdo a lo detallado en el procedimiento para determinar la granulometría y espesor del medio filtrante, ver subcapítulo 5.8.2, al realizar las excavaciones en los medios filtrantes, además de tomar las muestras de arena y antracita para los ensayos granulométricos, se determinó las alturas de las capas de arena y antracita y además se observó las condiciones de las mismas. En el cuadro 5.8, se tiene el resumen de las pruebas realizadas.

CUADRO 5.8**ESPESOR DE ANTRACITA Y ARENA**

LECHO FILTRANTE	INICIAL (1976)	FILTRO No. (2012)								PROMEDIO
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Antracita (cm)	49,5	53	50	33	54	42	40	44	43	44,9
Arena (cm)	22,9	6	15	40	6	14	15	15	12	15,4
Altura total (cm)	72,4	59	65	73	60	56	55	59	55	60,3

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.8.4 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

Para los criterios referenciales de evaluación del medio filtrante, nos remitimos al subcapítulo 4.2.2, que detalla las características y especificaciones de los materiales filtrantes y capa soporte y a los cuadros 4.2 y 4.3 que dan las características y parámetros operacionales de filtros dobles, como los de la PTAP.

5.8.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE ANTRACITA

De los resultados obtenidos en el estudio, cuadro 5.6, se observa que el tamaño efectivo promedio de la antracita, se ubica alrededor de 0,55 mm, siendo menor a su rango original de 1 a 1.10 mm. Esta variación en el material, debido a los efectos de abrasión, durante el proceso de lavado superficial y retrolavado del filtro ha provocado el incremento del coeficiente de uniformidad original de 1,60 a 2,98, en promedio para el año 2012.

De acuerdo a las recomendaciones técnicas, la capa de antracita no debe contener granos más pequeños a 0,7 mm, los resultados de los análisis granulométricos evidencian que entre el 13 % y 23 % del peso acumulado de la antracita pasa el tamiz No 25 (0,707 mm), lo que explica la notoria disminución del tamaño efectivo del material, el incremento del coeficiente de uniformidad de su valor original de 1,60 a un valor promedio de 2,98; el aumento del valor del grado de intermezcla de originalmente 2,16 a 3,70 al 2012 y la presencia de una fracción alta de granos finos.

En las curvas granulométricas de la antracita, obtenidas en el estudio (Anexo 2, gráficos No. 1 a 9), se observa que para porcentajes acumulados de peso, mayores al 25 %, estas presentan una pendiente uniforme, casi similar a la curva granulométrica original; pero para porcentajes menores a 25% las curvas se desprenden de la tendencia original y evidencian la presencia de una fracción de finos que distorsiona el tamaño efectivo de la antracita hacia valores incluso de 0,48 mm.

Adicionalmente, en cada filtro los espesores de la capa de antracita son muy variables y fluctúan entre 33 cm y 50 cm, diferencias que se explican por las constantes reposiciones que se han realizado de este material en el transcurso de los años y en algunos casos como el filtro No. 3, en los trabajos de desempacado y empacado del lecho filtrante (ver cuadro 5.8) en los que no se ha cuidado mantener los espesores del diseño original.

5.8.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE ARENA

Del resumen de los resultados granulométricos de la arena de la PTAP, que se indican en el cuadro 5.7, podemos concluir:

La arena de los filtros de la PTAP, se puede definir como una arena medianamente gruesa bastante uniforme, que ha sufrido una moderada variación con relación a sus características granulométricas originales, así su tamaño efectivo de originalmente 0,45 mm, con el transcurso de la operación, se ha incrementado a 0,51 mm, en promedio.

El coeficiente de uniformidad promedio obtenido en el estudio ($CU=1,46$) es casi similar al de la arena original que tenía un $CU= 1,47$, aspecto que puede ser observado en las curvas granulométricas, Anexo 2, gráficos No. 7 a 10, las cuales presentan pendientes similares.

El promedio de los tamaños del diámetro 90 de la antracita, que corresponde a 2 mm. y el tamaño efectivo de la arena de 0,51 mm; no cumplen con la relación: $d_{90}(\text{antracita}) = 3 d_{10}(\text{arena})$, lo que indica que existe un grado intermezcla no favorable, entre la arena y antracita, aspecto que se comprobó al momento de las excavaciones realizadas en los filtros para evaluar las condiciones de la capa soporte y medio filtrante, en las que se observó que existe una zona de intermezcla considerable debido al desplazamiento de la capa de arena hacia el interior de la capa de antracita.

Considerando que el valor original de diseño la capa de arena es de 22,9 cm, las pruebas realizadas han permitido determinar y confirmar que ha existido una disminución significativa de la capa de arena, la cual se ha fugado por los fondos falsos. En promedio la pérdida de arena en los filtros de acuerdo a los datos levantados, sería de aproximadamente 8 cm en altura y en algunos filtros como los No 1 y 4, se ha llegado a pérdidas de hasta 17 cm, como se observa en el cuadro 5.8.

5.8.7 COMENTARIOS A LA CAPA DE GRANATE

Este material de acuerdo a las referencias del diseño original del medio filtrante, tenía un tamaño efectivo de 0.31 mm, coeficiente de uniformidad de 1.58, con un espesor de 3.8 cm y peso específico de 3,88 g/cm³, en las excavaciones y muestreos realizados, éste no fue encontrado en los lechos filtrantes, razón por la cual no se realizó la determinación de las características granulométricas del mismo.

Por su alta densidad este material ha sido desalojado o se ha perdido por el fondo falso de los filtros, llegando a depositarse en el tanque de agua tratada, situación que se ha comprobado durante los lavados del mismo, con la extracción de apreciables cantidades de arena y granate que para su ingreso tienen como única vía el fondo falso.

5.9 EVALUACIÓN DE LA CAPA SOPORTE O LECHO DE GRAVA

5.9.1 ASPECTOS GENERALES

La capa soporte de grava de un filtro tiene como función el impedir el paso o fuga del material granular arena o antracita a través de los drenajes inferiores en sus diferentes formas u orificios del fondo falso, su altura depende del tipo de drenaje y en la graduación de la capa superior de grava se debe considerar que esta sea de un tamaño un poco mayor al tamaño mayor de la arena y la de la capa inferior debe ser un poco más grande que el diámetro de los orificios del drenaje.

La capa de grava puede ser alterada o perturbada por diferentes razones, así:

- a) Retrolavados súbitos o violentos ligados a la apertura brusca de las válvulas de ingreso de agua de lavado
- b) Lavado del filtro con excesivas tasas de lavado
- c) Distribución desigual del agua del flujo durante el lavado

La evaluación de la capa soporte de grava, comprende los siguientes pasos:

- 1) Inspección visual del filtro durante el retrolavado, observando si existen puntos de ebullición de burbujas de aire o la presencia de vórtices cuando se drena el filtro.
- 2) Determinar si en los mantenimientos o limpieza de los tanques de almacenamiento de agua tratada, se ha detectado la presencia de arena o antracita en su interior, si esto ha ocurrido, es indicativo de la presencia de un problema que ha alterado o perturbado la capa soporte de grava.
- 3) Realizar una excavación en el filtro hasta llegar al nivel de la capa de grava, determinando las alturas de las capas de arena, antracita y grava, tamaño de la grava, condiciones de mezcla de los diferentes tamaños de gravas y grado de acumulación de sedimentos.

5.9.2 PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA CAPA SOPORTE

a) Objetivo

Determinar el desplazamiento y condiciones de la capa soporte de grava, que puede presentarse por deficiencias en:

- El sistema de drenaje por una mala distribución del agua de lavado
- Por la apertura brusca de la válvula de entrada de agua de lavado
- Por el ingreso de aire en los drenes de los filtros
- Por llevar a los filtros a operar con pérdidas de carga negativas
- Por roturas en el fondo falso

a) Procedimiento

1. Realizar el lavado del filtro en la forma normal como lo hacen los operadores, durante el lavado observar si existen zonas de burbujas o ebullición de aire.
2. Luego del lavado, se cierra la válvula de entrada del afluente y se drena el filtro, se observa si hay vórtices o remolinos en el agua. Además, se observará, en qué condiciones queda la superficie de la capa superior (antracita), si es plana o con deformaciones u hundimientos notorios.

3. Seguir los pasos uno al 10 del procedimiento para determinar la granulometría y espesor del medio filtrante, detallado en el subcapítulo 5.8.2.
4. Una vez que sea visible la capa de grava, se extrae muestras de sus diferentes subcapas o tamaños y se medirá la altura de las diferentes subcapas, hasta llegar al nivel superior del fondo falso.
5. Se observará: Alturas y tamaños de las subcapas de grava, condiciones de mezcla, acumulación de sedimentos, etc.
6. Restituir la grava en orden inverso al de su extracción

5.9.3 RESULTADOS EN CAPA SOPORTE DE GRAVA

En el cuadro 5.9, se presentan las características cualitativas, obtenidas en las pruebas de evaluación de la capa soporte de grava.

CUADRO 5.9

CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS DE CAPA SOPORTE

CARACTERÍSTICA	INICIAL (1976)	FILTRO No (2012)								PROMEDIO
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Espesor de grava (cm)	25,5	30	28	11	30	30	30	28	30	27,1
Presencia de burbujas de aire durante el lavado		NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
Presencia de vórtices o remolinos en el drenado		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Acumulación de sedimentos		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Grava entremezclada		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Presencia de arena en el tanque de almacenamiento de agua tratada										SI

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.9.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS EN CAPA SOPORTE

En las pruebas, se determinó que las alturas de las capas de grava, están entre 11 cm y 30 cm, para un promedio de 27 cm, la mayoría de los filtros tienen 30 cm de grava lo que indica que posiblemente, durante el armado de la capa soporte, se autorizó por parte de la fiscalización modificar la altura del diseño original de

25,5 cm a 30 cm, aspecto del cual no se tiene evidencia escrita, documental y tampoco se dispone de planos as-build.

Igualmente, se observó que la distribución de la superficie superior de la grava en los filtros es desuniforme, formando ondas de deformación que en algunos casos determinan, únicamente 5 a 10 cm de grava sobre el fondo falso. Estas alteraciones de los lechos de grava, pudieron ocasionarse por la apertura brusca de las válvulas de retrolavado o fallas en el sistema de control de la apertura.

Otra posible causa para el desarreglo de los lechos de grava es la introducción de aire en el medio filtrante por la presencia de presiones negativas en el interior del filtro lo que provoca la formación de bolsas de aire que se eliminan o salen bruscamente a la superficie durante el lavado. La presentación de presiones negativas en los filtros, puede ser causada por operar los mismos más allá de la máxima pérdida de carga disponible, como se analiza a continuación.

En el estudio, se determinó que el nivel de operación normal promedio de los filtros se ubica en la cota 2985,68 y se detectó que el nivel “cero” de las regletas de los piezómetros, actualmente están ubicados en la cota 2984,76 m. En este sentido, existe una diferencia en las lecturas de pérdidas de carga obtenidas en los piezómetros de 0,92 m, en defecto. De acuerdo al manual de operación de la PTAP, se indica que el nivel máximo de operación, aproximado de un filtro en servicio normal se encuentra en la cota 2985,60 m.

De acuerdo a las instrucciones de operación de los filtros de la PTAP, CÓDIGO: IGAP-34, Anexo No. 7, se permite que la pérdida de carga sea de hasta 1,70 m. Considerando el error encontrado de 0,92 m, antes indicado, y sumándolo al valor de 1,70 m, se tiene que la pérdida de carga real hasta la cual están trabajando los filtros en la actualidad, es de 2,62 m. La máxima pérdida de carga, recomendada por el constructor es 2,44 m.

En conclusión, hasta una revisión total del sistema de control de apertura de la válvula de retrolavado, se recomiendan las siguientes medidas:

- Reubicación de las regletas de los piezómetros, de modo que el cero de ellas coincida con la cota 2985,68 m. o si se mantiene la actual ubicación permitir que los filtros operen hasta cuando la pérdida de carga sea máximo 1,52 m.
- Recomendar la apertura lenta de las válvulas de entrada del agua de retrolavado y la revisión de los tiempos de apertura de la misma a fin de permitir un intervalo adecuado de tiempo entre el inicio y fin de la apertura.

5.10 EVALUACIÓN DE FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA

5.10.1 ASPECTOS GENERALES

En las tuberías de salida de cada uno de los filtros de la PTAP, se dispone de válvulas controladoras de caudal de 16" de diámetro que tienen un sistema de diferencial de presión creado por un Venturi que permite regular el caudal de filtrado y mantenerlo constante durante la carrera del filtro. En cada tubería de salida, están colocados piezómetros de vidrio, para medir las pérdidas de carga.

La presión diferencial se incrementa cuando se incrementa la tasa de filtración, el flujo de agua filtrada debe ser tal que provoque una presión diferencial suficiente para balancear el peso de la contrapesa en el punto que esta ha sido fijada sobre la barra graduada, en forma similar la rata de filtración disminuye cuando se incrementan las pérdidas de carga en el filtro, entonces para compensar la diferencia en presión diferencial la tasa de flujo filtrado se incrementa.

La presencia del tubo Venturi, ocasiona la presencia del efecto del mismo nombre que produce succiones intermitentes por el desprendimiento de la lámina de agua de las paredes de la tubería. Dependiendo de la magnitud de las succiones se presentan fluctuaciones de flujo puntuales que influyen en el proceso de filtrado y que se pueden observar y medir su amplitud en los piezómetros de cada filtro.

5.10.2 PROCEDIMIENTO PARA MEDIR FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA

a) Objetivo

Determinar la magnitud de las oscilaciones o fluctuaciones del nivel de agua en los piezómetros ubicados en la tubería del efluente de cada uno de los filtros.

b) Equipo y material necesario

- Una regla graduada o flexómetro
- Piezómetros (tubos plásticos transparentes) de ¼" a 1/2" de diámetro

c) Datos necesarios

- Pérdida de carga que se tenga en el filtro al momento del ensayo (h_f)

d) Procedimiento

1. Se determina visualmente el punto medio de las fluctuaciones del nivel de agua, en el piezómetro.
2. Colocar la regla o flexómetro paralela al piezómetro, de modo que su valor cero, se ubique por encima del valor o punto de máxima fluctuación.
3. Durante aproximadamente dos minutos, se leen y registran las lecturas máximas y mínimas del nivel del agua en el piezómetro.
4. Se obtiene la amplitud de las oscilaciones, restando los valores máximos de los valores mínimos de nivel de agua.
5. Se determina el porcentaje de fluctuación con la ecuación No. 9

$$\% \text{ Fluctuación} = \frac{A * 100}{h_f} \quad (5.8)$$

Donde:

A = amplitud de la oscilación

h_f = Pérdida de carga, existente al momento del ensayo

6. En un gráfico doble logarítmico, se grafican los porcentajes de variación de la fluctuación de la pérdida de carga en función del caudal de filtración expresado en litros/seg. Los puntos ploteados, se deben alinear sobre una recta con tangente igual a dos, puesto que estudios realizados por Baylis y Hudson establecieron que la amplitud de las oscilaciones de pérdida de carga varían en proporción al cuadrado del caudal de agua filtrada.

5.10.3 RESULTADOS DE FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA

El resumen de resultados de las pruebas de fluctuación de la pérdida de carga, se reportan en el cuadro 5.10; el detalle de cada una de ellas se presentan en el Anexo 2, cuadros No. 22 a 29 y en los gráficos No. 11 a 18, se observa la velocidad de filtración Vs. Porcentaje de fluctuación de la pérdida de carga.

CUADRO 5.10

FLUCTUACIONES DE PÉRDIDA DE CARGA EN FILTROS

FILTRO No.	PÉRDIDA DE CARGA CORREGIDA / AMPLITUD DE PÉRDIDA DE CARGA	CAUDAL DE FILTRACIÓN (l/s)						Pendiente de recta (m)
		100	130	150	170	190	210	
1	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	71.8	81.2	100.8	118.7	167	204.4	1.41
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	1.5	1.7	2.5	3	3.5	4	
2	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	126.8	137.4	155.5	178.5	223.5	272.9	0.66
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	2.9	3	3.6	4.6	4.3	4.3	
3	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	118	129.5	141.5	143.5	143.2	143.6	1.33
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	1.9	2.4	2.7	3.4	4.7	4.8	
4	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	126.5	134.4	146.7	185.3	224.5	266.1	-0.49
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	1.9	2.1	1.8	1.7	1.4	1.5	
5	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	92.7	102	123.7	127.5	127.2	126.7	2.16
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	1.4	2	2.6	4.1	5.9	8.1	
6	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	162.3	164.5	171	204	242.7	285.3	0.47
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	3	3.5	3.7	3.9	4	4.4	
7	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	144.7	175.3	179	211.8	252.6	287.1	0.91
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	2.1	2.9	3.1	3.5	3.6	4.3	
8	Pérdida de carga corregida (h') (cm)	94.3	103	107.2	132.9	166.6	202.1	0.36
	Amplitud de Pérdida de carga (%)	2.1	2.5	2.6	2.8	2.7	2.8	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

5.10.4 CRITERIOS REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN

Los cambios bruscos de flujo en un filtro provocan el desprendimiento de las partículas adheridas a los granos del lecho filtrante. Por tanto existe una relación directa entre el porcentaje de fluctuación de la pérdida de carga y la calidad del efluente del filtro, en el cuadro 5.11, se dan los valores referenciales que permiten calificar la calidad del agua filtrada en función de las fluctuaciones obtenidas en la prueba.

CUADRO 5.11**CALIDAD DE EFLUENTE Vs. % DE FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA**

Calidad del efluente	% de fluctuación de la pérdida de carga
Buena	≥ 2
Mediana	≥ 4
Mala	≥ 6

Fuente: CEPIS. (1992b). Manual IV: Evaluación

5.10.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En el cuadro 5.10, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en las pruebas, se observa que la amplitud de las pérdidas de carga, se incrementan al subir el caudal de filtración. En la actualidad el caudal que los operadores normalmente fijan en las pesas de la válvula de control del efluente de los filtros es de 150 l/s, para este caudal las fluctuaciones de la pérdida de carga, de acuerdo a los datos obtenidos en las pruebas, están dentro del rango de 1,8% a 3,8%, así, empleando los criterios del cuadro 5.11, podemos calificar la calidad del efluente de los filtros como “buena”.

Se obtuvieron, amplitudes de pérdida de carga, mayores al 4% para caudales mayores a 170 l/s, lo que permite indicar que caudales o tasas mayores a este valor no son recomendables en las actuales condiciones de los reguladores de caudal, pues la calidad del efluente corre el riesgo de pasar de una calidad calificada de “buena” en la actualidad a una calidad “mediana”.

En el filtro No. 4, las fluctuaciones de pérdida de carga obtenidas, son muy erráticas y la pendiente de la recta ajustada, tiene valor negativo ($m = -0,49$), lo que demuestra un funcionamiento totalmente anómalo del controlador de caudal.

Por el contrario, el filtro No 5, presento variaciones en las fluctuaciones de pérdida de carga, consistente con un funcionamiento adecuado del controlador de caudal, los puntos graficados, se ajustan a una recta de pendiente igual a 2,16 (ver gráfico No. 15), cercano al valor recomendado de pendiente igual a 2.

Adicionalmente, hay que considerar lo indicado en el subcapítulo 5.9.4, respecto a que, debido a la incorrecta ubicación del nivel “cero” de las regletas de los piezómetros, existe una diferencia promedio en las lecturas de pérdidas de carga de 0,92 m, en defecto. Es decir, a la lectura obtenida en los piezómetros de los filtros de la PTAP, se debe sumar 92 cm, para obtener la verdadera lectura de pérdida de carga. La corrección antes indicada se realizó a las lecturas obtenidas en las pruebas y se presentan en el cuadro resumen 5.10 y Anexo 2, cuadros No. 22 a 29.

Igualmente, se mencionó que la pérdida de carga real hasta la cual están trabajando los filtros en la actualidad, es de 2,62 m. La máxima pérdida de carga, recomendada por el constructor es 2,44 m; es decir en promedio se está llevando a trabajar los filtros 18 cm, más allá del límite recomendado, lo que ocasiona la entrada de aire por la presentación de presiones negativas dentro del medio filtrante y el deterioro de la calidad del agua filtrada.

En general, se recomienda el mantenimiento total de los controladores del caudal del efluente y una amplia evaluación mecánica de su funcionamiento para establecer las alternativas de repararlos o de reemplazarlos con controladores nuevos, esto permitiría operar los filtros a tasas mayores a las actuales de 150 l/s, sin el riesgo de deterioro de la calidad del efluente.

CAPÍTULO 6

INVESTIGACIÓN EN COLUMNAS DE FILTRACIÓN PILOTO

6.1 OBJETIVO Y CONSIDERACIONES DE LA INVESTIGACIÓN PILOTO

6.1.1 OBJETIVO

Uno de los objetivos planteados en la investigación es evaluar el estado y comportamiento de los medios filtrantes de arena y antracita en los filtros existentes en la PTAP, lo cual ha sido desarrollado, detallado y analizado en el capítulo 5.

Finalmente, en el presente y siguiente capítulo, se desarrolla el segundo objetivo propuesto en la investigación, para lo cual se planteó la realización de una investigación en columnas de filtración piloto que determine la factibilidad de cambiar las características granulométricas de los medios filtrantes, actuales, de arena y antracita permitiendo la optimización de la calidad del efluente con tasas de filtración, pérdidas de carga y longitud de carreras de filtración adecuadas y en función de los resultados obtenidos recomendar las características granulométricas que deberían considerarse en las actividades de optimización de los filtros de la PTAP (prototipo).

Efectivamente, el sistema de filtración piloto fue implementado e instalado (tres columnas de filtración), se armaron sus lechos filtrantes y se lo puso en operación, se desarrollaron cuatro pruebas y en base al análisis de los resultados obtenidos, se llegó a determinar las características recomendadas para los medios filtrantes.

6.1.2 CONSIDERACIONES EN EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA PILOTO

A continuación, se presentan los aspectos considerados para el dimensionamiento de las columnas piloto de la PTAP:

- a) Arboleda, J. (2000), indica: “Empíricamente se ha establecido que la relación entre el tamaño máximo del grano y el diámetro del filtro no debe ser menor de 1 a 50. Lo cual significa que si se usa un medio filtrante cuyas partículas más grandes tienen 2 mm. de diámetro el tubo en el cual se coloquen no debe ser menor de 100 mm.”

Para los ensayos realizados el tamaño mayor de la antracita, empleada corresponde a 2 mm y el diámetro de las columnas piloto es de 15,5 cm, por tanto la relación entre el tamaño más grande del grano y el diámetro del filtro es de 1 a 77,5, valor que cumple con la regla empírica, antes formulada, para evitar la influencia de las paredes en los modelos piloto.

- b) Considerando, de acuerdo al diseño de la PTAP, que la cota superior del falso fondo es 2983,17 m. y la cota del vertedero de salida de las canaletas de lavado es 2985,28 m. y que la cota del nivel superior del lecho filtrante es 2984,14 m. se tiene que la altura libre disponible entre el lecho filtrante y el vertedero de salida es de 1,14 m. y la altura libre con respecto al nivel inferior de la canaleta de lavado es de 0,59 m.

Estos aspectos presentes desde la construcción de la PTAP, constituyen limitantes para la formulación de cambios en el espesor total del medio filtrante puesto que inciden directamente en la hidráulica y expansión del lecho filtrante a obtenerse durante el lavado del filtro. Por este motivo, en la investigación, se consideró para el lecho doble de antracita y arena una altura total de 75 cm, valor que guarda congruencia con las condiciones constructivas de diseño, presentes en la PTAP.

- c) El sistema de filtros de la PTAP, opera con nivel y tasa constante de filtración, este aspecto se consideró en la implementación del sistema piloto a fin de que este pueda operar bajo el mismo sistema de control, para lo cual se ubicó una tubería de desborde del agua clarificada en cada columna piloto para mantener el nivel constante en la misma y por medio de válvulas de flotador horizontal ubicadas en sendos tanques, hacia los cuales ingresan las tuberías de salida de cada columna de filtración, se controló la tasa de filtración fijada para cada prueba.
- d) Entre el nivel de operación normal de los filtros (2985,60 m) y el nivel del piso de la galería de filtros (2981,70m), existe un desnivel de 3,90 m. altura disponible que permitió la ubicación vertical de las columnas piloto, cajón repartidor de caudal y entrada del agua clarificada para que el sistema piloto funcione con flujo continuo y a gravedad.
- e) Es importante mencionar que dado que la PTAP, está en operación, existen condiciones conocidas, como: calidad de agua clarificada y filtrada de la PTAP, longitud de carreras de filtración y tasas de filtración, así como las condiciones granulométricas iniciales de diseño y las condiciones actuales de los filtros en base a la evaluación previa realizada. Esto permite que la investigación piloto tenga datos y condiciones de arranque conocidos que permitieron delinear la investigación para la optimización de los medios filtrantes y sus parámetros operativos.

6.1.3 ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACIÓN PILOTO

Considerando que el objetivo de la investigación piloto es optimizar los medios filtrantes de la PTAP y que dado su tiempo de operación, se tienen antecedentes previamente conocidos, como: aspectos constructivos, condiciones operativas, granulometría original y actual de los lechos filtrantes, condiciones del agua clarificada y filtrada que constituyen una línea base para la investigación piloto, a continuación se indican algunos aspectos que se consideraron en el enfoque y dirección a darse a la investigación piloto.

- a) En el numeral 2.4, se indicó que el agua que sale de los clarificadores y que ingresa a los filtros, presenta una turbiedad promedio de 1,07 NTU y la del efluente de los filtros tiene 0,52 NTU, lo que indica que en los filtros se obtienen eficiencias de remoción del 51,4% en relación a la turbiedad del agua clarificada.

En este sentido, se tiene una situación crítica de la calidad del agua filtrada que demande de la investigación piloto una reformulación fuerte de las condiciones del medio filtrante, al contrario, se plantea como objetivo optimizar la eficiencia actual de los filtros, mejorándola a fin de que la calidad de su efluente se ubique en valores promedio menores a 0,5 NTU.

- b) El caudal promedio tratado en la PTAP es de 2128 l/s, que corresponde a una tasa de filtración de $245 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, valor que, se prevé, en poco tiempo llegará a los 2400 l/s que es la capacidad máxima de tratamiento de la PTAP, en la actualidad la PTAP llega a tratar este caudal en oportunidades que son cada vez más frecuentes, por tanto, es de prever que aproximadamente en el lapso de tres a cinco años estará operando con caudales similares o muy cercanos a la capacidad de diseño original.
- c) No existen alternativas que consideren a futuro incrementar la capacidad de tratamiento de la PTAP, dado que esto implicaría el incremento previo de los caudales de agua cruda. La disponibilidad de agua cruda ha llegado a valor máximo, incluso a la fecha el sistema Pita que abastece a la PTAP, recibe el aporte de aproximadamente 500 l/s de agua cruda provenientes del sistema de la Mica, caudal que podría bajar e incluso eliminarse si se construye a futuro la ampliación de la segunda etapa de la Planta de El Troje.
- d) Por tanto, no existirá variación en la capacidad máxima de tratamiento actual de la PTAP de 2400 l/s que equivale a una tasa de filtración de $275 \text{ m}^3/\text{d}$, operando 16 filtros y $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, operando 14 filtros, por consiguiente, en las pruebas de la investigación piloto no se contemplaron tasas de filtración mayores a $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

- e) Los filtros de la PTAP son operados, hasta cumplir carreras de filtración de 70 horas y pérdidas de carga de 1,70 m. En la mayoría de los casos los filtros salen de operación por haber cumplido las 70 horas de operación y en pocas oportunidades, especialmente en los meses de invierno, cuando la turbiedad del agua cruda se eleva con respecto a su promedio, se terminan sus ciclos de filtrado por haber llegado al límite de pérdida de carga establecido; estas condiciones fueron consideradas en las pruebas piloto a fin de establecer condiciones comparativas entre el prototipo y el modelo piloto.
- f) Los criterios recomendados en la bibliografía técnica, constituyen referencias obligatorias para la selección de la granulometría y espesor de los medios filtrantes, en el presente estudio los criterios de selección para el modelo piloto, se han apegado a las recomendaciones dadas en las publicaciones de la AWWA. (1998, 1999 y 2002) y CEPIS. (1992_a, 1992_b y 1992_c), entre otros.
- g) Los aspectos antes indicados, sumados a los resultados obtenidos en la evaluación de los filtros del prototipo, realizada en el presente trabajo, y que se detallan a lo largo del Capítulo 5 - Evaluación del Sistema de Filtración – son y constituyen excelente referencia para la selección de las condiciones del lecho, tasas y carreras de filtración a implementarse en el modelo piloto.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN PILOTO

Antes de describir el sistema de filtración piloto, es importante indicar que la PTAP cuenta con dos baterías de filtros, cada una incluye a cuatro unidades de filtración doble, así la batería No. 1, se halla al costado sur del edificio de filtros, comprende los filtros No. 1 al 4 y la batería No. 2 se ubica al costado norte e incluye los filtros No. 5 al 8. Los filtros No. 7 y 8, corresponden a la batería de filtros localizada al costado norte del edificio de filtros que además tiene a los filtros No. 5 y 6.

El agua empleada en la operación y pruebas de los filtros piloto, es la misma agua que ingresa a los filtros de la PTAP y que proviene de los clarificadores, a esta se la conoce y denomina en la presente investigación, como “agua clarificada”.

Conviene indicar que las aguas (efluentes) proveniente de las dos baterías de clarificadores, se unen y mezclan en un canal común desde el cual se reparte el agua clarificada a cada una de las baterías de filtros. En la fotografía No. 6.1, se presenta una vista general del sistema piloto de filtros piloto.

FOTOGRAFÍA 6.1

VISTA GENERAL DE LOS FILTROS PILOTO



Fuente: Filtro piloto, PTAP

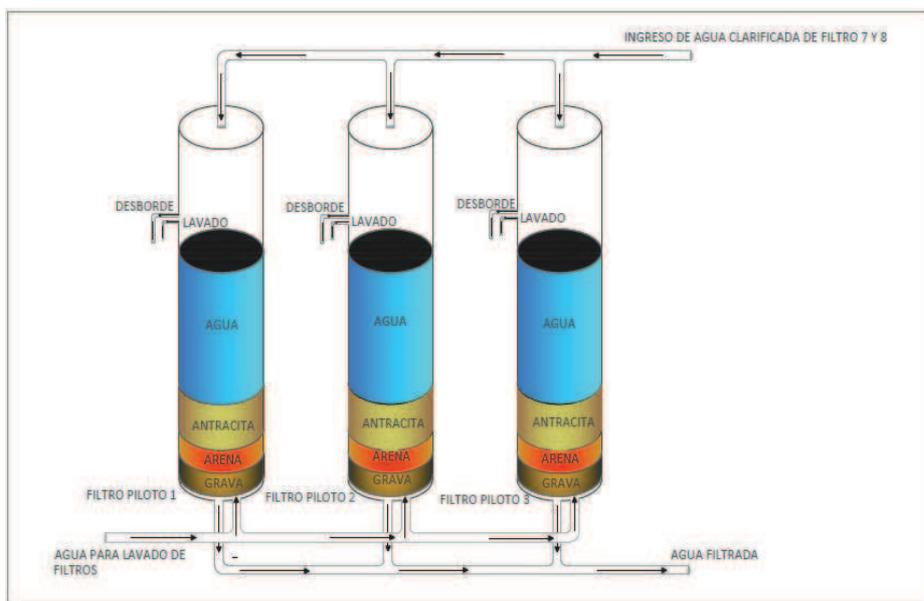
El sistema de filtros piloto, está conformado por tres columnas de acrílico transparente de 15,5 cm de diámetro, las cuales se ubicaron en la galería de las válvulas de filtros, entre los filtros No. 7 y 8 de la PTAP (prototipo) que se encuentra por debajo de la galería de las consolas de filtros. Para determinar la ubicación de los filtros piloto, se consideró un lugar que no perturbe mayormente las labores de operación y mantenimiento de la PTAP.

Para facilitar la identificación y toma de datos durante las pruebas, a las columnas de filtración piloto se las denominó y denominará en el presente documento, de izquierda a derecha, como: Filtro No. 1 (F1), Filtro No. 2 (F2) y Filtro No. 3 (F3), En el gráfico 6.1, se presenta el sistema piloto.

Aprovechando una tubería de una pulgada de diámetro que se halla instalada en la parte superior cada uno de los cajones de los filtros y que atraviesa hacia la

galería de filtros, se captó el agua clarificada, se habilitó tuberías y válvulas de ingreso a fin de que al sistema piloto ingrese el agua clarificada, ya sea desde del filtro No. 7, o desde el filtro No. 8, del prototipo, o de ambos a la vez.

GRÁFICO 6.1 SISTEMA DE FILTROS PILOTO



Elaborado por: Fernando Ojeda N

El agua clarificada ingresa a dos cajas repartidoras de caudal que poseen vertederos de entrada y laterales que permiten mantener una carga de agua constante sobre la tubería que lleva el agua a cada uno de los filtros y descargar los excesos del caudal. A fin de mantener una carga constante de agua en cada columna, se dispone de orificios conectados a tuberías que hacen las veces de desbordes del caudal de exceso. Las cajas repartidoras están colocadas sobre una estructura metálica de 2,6 m de altura con lo que se asegura el ingreso a gravedad del agua clarificada a cada columna de filtración.

En el tramo inferior de cada filtro o columna piloto, se ubicaron cinco piezómetros a la altura de: 5, 25, 50, 70 y 80 cm, medidos, desde la placa perforada que hace la función de falso fondo, en estos se midieron las pérdidas de carga que se fueron presentando en las diferentes corridas realizadas. En el Anexo No. 6, fotografía No. 18, se observa la localización de los piezómetros en las columna piloto de acrílico y la ubicación de las mangueras, las que se colocaron sobre un

tablero vertical que tiene una regla impresa, con divisiones, cada 10 cm y 1 cm, que permiten leer las pérdidas de carga en los piezómetros, el cero, corresponde al nivel constante del agua durante la operación del filtro.

Cada columna, consta de tres tramos de acrílico transparente de un metro de altura cada uno, que poseen en sus extremos uniones bridadas que permiten su armado y desarmado en vertical. Los primeros tramos tienen en su base una placa perforada como falso fondo por la que se recolecta el agua filtrada y se distribuye el agua de lavado y en la que se asienta la capa soporte de grava.

Luego de que el agua filtrada sale de cada columna esta pasa por un medidor de flujo que permite tomar lecturas y conocer los volúmenes filtrados, luego pasa a un tanque circular en la que se halla instalada una válvula de flotador horizontal la cual permite mantener un caudal constante de filtrado, la regulación de este se realiza con la válvula que se halla a la salida de cada tanque. Desde la salida de cada tanque el agua filtrada es conducida hasta un desagüe de piso, en este punto se realiza el aforo volumétrico de los volúmenes filtrados en cada columna piloto en base al cual se ejecuta el ajuste respectivo en la válvula de salida del tanque circular. En las fotografías del Anexo No. 6, se presentan los elementos y componentes, antes indicados.

El sistema de columnas piloto consta de válvulas y tuberías que permiten su operación de filtrado y lavado en forma individual e independiente. Para disponer de agua para el lavado de las columnas se habilitó una tubería de la línea de agua presurizada de la PTAP que sale del tanque hidroneumático. A fin de evacuar el agua de lavado se dispuso, en cada columna, de una tubería de salida conectada a un tanque recolector donde se realiza la medición de los volúmenes de agua de lavado. El control de los caudales de lavado (retrolavado) se realizó mediante una válvula de ingreso, en base a la expansión obtenida del medio filtrante.

Durante la duración del ciclo de filtrado de cada una de las pruebas se tomaron muestras de agua en el afluente y efluente de cada columna piloto en las que se midió la turbiedad, parámetro que fue tomado como referencia para evaluar el

rendimiento de los filtros piloto. En el caso del afluente (agua clarificada) las muestras se tomaron en la caja repartidora de caudales y para el efluente se tomaron en el tanque donde se ubicó la válvula de flotador, a la salida de cada columna piloto.

6.3 DESCRIPCIÓN DE MEDIOS FILTRANTES EMPLEADOS EN EL MODULO PILOTO

6.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ARENA Y ANTRACITA

En la selección de la granulometría de la arena y antracita a emplearse en las diferentes pruebas de evaluación piloto, se tomaron en cuenta los aspectos detallados en el numeral 6.1.3, que en resumen son:

- Calidad de agua clarificada y filtrada actuales
- Carreras de filtración actuales
- Tasas de filtración actuales
- Granulometría original y actual
- Posibilidad futura de incremento en la producción
- Recomendaciones bibliográficas

Del análisis de los aspectos antes mencionados, se llegó a definir la granulometría de la arena y en base a esta, se seleccionó la antracita con tres granulometrías distintas y se determinó que la selección de la arena con una granulometría común para los tres filtros piloto era factible y recomendable, dado que se cumplían las condiciones y criterios de verificación para evitar la presencia de intermezcla entre la arena y antracita.

En el Anexo 3, cuadro No. 1, se presenta las características granulométricas de la arena y antracita originales y actuales (2012) del prototipo y las seleccionadas para el modelo piloto y la comprobación de los criterios para tener una intermezcla limitada entre la antracita y arena.

6.3.1.1 Criterios de verificación de intermezcla limitada

A continuación, se indican los criterios de verificación para tener una intermezcla limitada, que se comprobaron en la selección de los medios filtrantes a ser evaluados a nivel piloto y cuyos valores se reportan en el Anexo 3, cuadro No. 1

1. El tamaño grueso de la antracita (d_{90}), debe ser igual a tres veces el tamaño efectivo (d_{10}) de la arena.

$$\frac{d_{90} \text{ antracita}}{d_{10} \text{ arena}} = 3 \quad (6.1)$$

2. El tamaño efectivo de la antracita (d_{10}), debe ser la mitad del tamaño más grueso (d_{90}), seleccionado para la misma.

$$d_{10} \text{ antracita} = \frac{(d_{90} \text{ antracita})}{2} \quad (6.2)$$

3. De acuerdo a Kawamura, S. (1991), la altura del medio filtrante está relacionada con el tamaño del grano, así, para medios homogéneos de arena fina ordinaria y lechos dobles, se indica:

$$\frac{L}{d_e} \geq 1000 \quad (6.3)$$

Donde:

L = Altura del medio filtrante (mm)

d_e = Tamaño efectivo del medio filtrante (mm)

Para el caso de lechos dobles se calcula por separado, para cada capa filtrante, el valor de L/d_e y luego se los suma y este resultado se lo compara con el criterio de ser ≥ 1000 . El empleo del criterio de L/d ha crecido en los últimos años.

4. La relación de los tamaños (d_1/d_2) de medios granulares, que alcanzan igual expansión al ser lavados con una velocidad (V_a), es función de sus densidades y del régimen de flujo que establezcan y se determina con:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{\delta_2 - \delta_a}{\delta_1 - \delta_a} \right)^n \quad (6.4)$$

Donde:

d_1 = Tamaño del grano mayor del material filtrante 1 (antracita)

d_2 = Tamaño del grano menor del material filtrante 2 (arena)

δ_1 y δ_2 = Densidades de los medios adyacentes (arena y antracita)

δ_a = Densidad del agua (para el presente estudio se adopta = 1)

n = Coeficiente, que para flujo laminar es 0,5 y para flujo turbulento como en el caso de la filtración es 1.

6.3.2 GRANULOMETRÍA Y ESPEORES DE ARENA Y ANTRACITA

En el cuadro 6.1, se indica el resumen de las características granulométricas de la arena y antracita, seleccionadas para las pruebas piloto y que fueron empacadas en cada una de las columnas de filtración del modelo piloto y en el Anexo No. 4, gráficos N0. 1 a 4, se presentan las curvas granulométricas respectivas.

CUADRO 6.1

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE ARENA Y ANTRACITA

CARACTERÍSTICAS	FILTRO PILOTO No.		
	1	2	3
ANTRACITA			
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,9	0,9	0,9
diámetro 60 (mm)	1,17	1,31	1,44
Coeficiente de uniformidad	1,3	1,45	1,6
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,84	0,7	0,7
Tamaño grano más grande (mm)	2	2	2
d90 antracita (mm)	1,54	1,68	1,83
Espesor de capa (cm)	50	50	50
ARENA			
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,5	0,5	0,5
Diámetro 60 (mm)	0,7	0,7	0,7
Coeficiente de uniformidad	1,4	1,4	1,4
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,42	0,42	0,42
Tamaño grano más grande (mm)	1,41	1,41	1,41
Espesor de capa (cm)	23	23	23

Elaborado por: Fernando Ojeda N

A fin de limitar la intermezcla entre la arena y la antracita, en cada columna piloto, se colocó una capa de arena torpedo con las características indicadas a continuación:

Espesor = 2 cm

Tamaño efectivo = 1 mm

Coefficiente de uniformidad $\leq 1,7$

Tamaño del grano menor = 0,84 mm

Tamaño del grano mayor = 2 mm

6.3.3 SELECCIÓN DE CAPA SOPORTE DE GRAVA

Una vez determinada la granulometría de la arena a emplearse en la investigación piloto, se procedió a determinar las características de la capa soporte de grava, para ello se verificó que se cumplan los criterios recomendados para su dimensionamiento y que fueron dados en el cuadro 4.3 del numeral 4.2.2.5 “Capa soporte de grava”.

CUADRO 6.2

CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO SOPORTE DE GRAVA

GRAVA (1)			
Subcapa	Espesor (cm)	Tamaño (mm)	Tamaño (pulg.)
1	10	2,0 - 3,2	1/8" - #10
2	5	3,2 - 6,4	1/8" - 1/4"
3	5	6,4 - 12,5	1/4" - 1/2"
4	5	12,5 - 19	1/2"b - 3/4"

(1) Para fondo falso con bloques de arcilla vitrificada

Fuente: CEPIS. (1992_c). Criterios de Diseño, Manual V, Tomo III

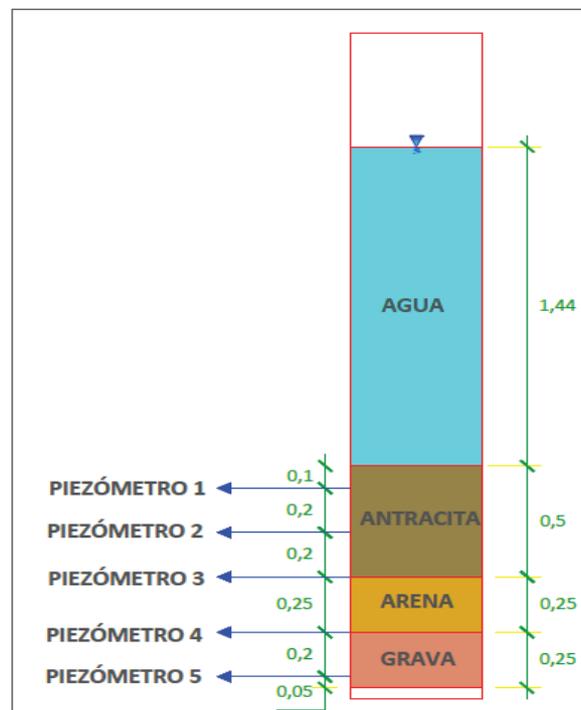
Además, como los filtros de la PTAP disponen de fondos falsos tipo Leopold de arcilla vitrificada y la compañía del mismo nombre, recomienda utilizar las capas, espesores y granulometrías que se indican en el cuadro 6.2, se determinó, colocar el mismo medio soporte de grava en cada una de las tres columnas piloto

que, igual al prototipo, está compuesto por cuatro capas de grava de diferente tamaño con una altura total de 25 cm.

En el gráfico 6.2; se indica la disposición y altura de los medios filtrantes armados (empacados) en los filtros piloto y la posición de los cinco piezómetros que se colocaron a diferentes alturas con el objeto de medir las pérdidas de carga durante la evolución de las carreras de filtración.

GRÁFICO 6.2

FILTRO PILOTO Y POSICIÓN DE PIEZÓMETROS



Elaborado por: Fernando Ojeda N

6.3.4 PREPARACIÓN DE MEDIOS FILTRANTES Y CAPA SOPORTE

Una vez definidas las características de los medios filtrantes y capa soporte se procedió a preparar los mismos, para ello se utilizaron las curvas granulométricas de la antracita y arena que se indican en el Anexo No. 4, gráficos No. 1 a 4; sobre cada curva se definieron diferentes tramos para diferentes intervalos de tamaño del medio filtrante y para cada tramo, se obtuvo de la curva granulométrica, el correspondiente porcentaje acumulado de peso retenido del material.

A fin de facilitar la preparación de los medios filtrantes, se adoptaron como rangos límites para los tramos a ser ubicados sobre las curvas granulométricas aquellos que coincidían con los tamaños estandarizados de apertura de malla de los tamices, así en el Anexo No. 3, cuadro No. 2, se indica los porcentajes y pesos parciales para las diferentes fracciones y rangos de tamaño de los granos para la preparación de la arena y antracita a ser armadas en los filtros piloto.

Conviene indicar que en la preparación de la antracita, arena y capa soporte de grava, se utilizó los mismos materiales que se hallan almacenados en la PTAP de los cuales se tomó los volúmenes requeridos y se los sometió a un proceso de tamizado, pesaje y lavado a fin de obtener las fracciones granulométricas requeridas de acuerdo a lo determinado en las curvas granulométricas.

Una vez preparados los medios filtrantes, estos, fueron armados junto con la capa soporte de grava en cada columna piloto, guardando los espesores determinados para cada uno de ellos y que ya han sido mencionados.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE FILTROS Y PRUEBAS EN FILTRO PILOTO DE LA PTAP

7.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN

La presentación y discusión de los resultados obtenidos en la evaluación del sistema actual de filtración del prototipo se realizó en el capítulo 5, “Evaluación del Sistema de Filtración”, detallándose ampliamente para las pruebas de: velocidad de filtración, velocidad de lavado, expansión del lecho filtrante, tiempo de duración del lavado, medio filtrante, capa soporte y fluctuaciones de la capa soporte el procedimiento, los resultados obtenidos, los criterios para la evaluación de los resultados y la evaluación de los mismos.

7.2 DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE PRUEBAS PILOTO

Una vez que el sistema piloto fue implementado y probado su funcionamiento se procedió a realizar las pruebas o corridas en el modelo piloto. Durante las pruebas se operó los filtros piloto en forma continua, efectuando mediciones de turbiedad del afluente y efluentes de los filtros piloto, lecturas de pérdidas de carga en los piezómetros instalados a diferentes alturas del lecho filtrante y aforo de caudales

Las pruebas piloto se realizaron para diferentes tasas de filtración y condiciones operativas, a continuación en el cuadro 7.1, se indica, para las diferentes tasas de filtración los caudales equivalentes de filtración a nivel de la PTAP y en los filtros piloto.

En la presente sección, se presenta el detalle, condiciones de ejecución (tasas de filtración, carga hidráulica) y resultados de las cuatro pruebas piloto realizadas dentro de la investigación.

CUADRO 7.1**RELACIÓN DE: TASAS DE FILTRACIÓN, CAUDALES EN PTAP Y FILTRO PILOTO**

TASA DE FILTRACIÓN		CAUDAL DE FILTRACIÓN PTAP			CAUDAL DE FILTRACIÓN PILOTO	
(m ³ /m ² /d)	(l/s/m ²)	Q./filtro	Q. con 16 filtros	Q. con 14 filtros	l/s	ml/s
200	2,31	108,9	1743	1525	0,044	43,7
220	2,55	119,8	1917	1677	0,048	48,0
240	2,78	130,7	2091	1830	0,052	52,4
245	2,84	133,4	2135	1868	0,054	53,5
250	2,89	136,1	2178	1906	0,055	54,6
255	2,95	138,9	2222	1944	0,056	55,7
260	3,01	141,6	2265	1982	0,057	56,8
265	3,07	144,3	2309	2020	0,058	57,9
270	3,13	147,0	2353	2058	0,059	59,0
275	3,18	149,8	2396	2097	0,060	60,1
280	3,24	152,5	2440	2135	0,061	61,2
285	3,30	155,2	2483	2173	0,062	62,2
290	3,36	157,9	2527	2211	0,063	63,3
295	3,41	160,6	2570	2249	0,064	64,4
300	3,47	163,4	2614	2287	0,066	65,5
305	3,53	166,1	2657	2325	0,067	66,6
310	3,59	168,8	2701	2363	0,068	67,7
315	3,65	171,5	2745	2402	0,069	68,8
320	3,70	174,3	2788	2440	0,070	69,9
330	3,82	179,7	2875	2516	0,072	72,1
340	3,94	185,2	2962	2592	0,074	74,3
350	4,05	190,6	3050	2668	0,076	76,4
Área de filtro prototipo (m ²)				47,05		
Diámetro de columnas piloto (cm)				15,5		
Área de columnas piloto (cm ²)				188,69		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.2.1 PRUEBA PILOTO No. 1**7.2.1.1 Condiciones de ejecución de la prueba**

En esta prueba, se ejecutó y aplico por igual para los tres filtros piloto una tasa de filtración constante (275 m³/m²/d), similar a la capacidad de filtración de la PTAP y carga hidráulica disponible constante. A continuación en el cuadro 7.2, se indica las condiciones en las que se ejecutó la prueba.

CUADRO 7.2**PRUEBA No.1: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL**

DESCRIPCIÓN	FILTRO PILOTO No.		
	F1	F2	F3
Fecha de inicio de prueba	2013-02-08		
Hora de inicio de prueba	11:00		
Fecha de finalización de prueba	2013-02-11		
Hora de finalización de prueba	11:00		
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	275	275	275
Caudal de filtración piloto (ml/s)	60	60	60
Caudal equivalente en filtro PTAP (l/s)	150	150	150
Caudal total equivalente en PTAP (l/s)	2400	2400	2400
Carrera de filtración (horas)	72	72	72
Carga hidráulica disponible constante (m)	1,44	1,44	1,44

Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.2.1.2 Resultados de prueba piloto No. 1

En el Anexo 3, cuadro No. 3 se presentan los resultados obtenidos durante la prueba piloto No. 1, para la turbiedad del afluente y efluente y, las lecturas de pérdidas de carga en los piezómetros de los filtros piloto No. 1, 2 y 3; con estos valores, se obtuvo las curvas de pérdida de carga Vs. Tiempo de filtración que se indican en el Anexo 4, gráficos No. 5 a 8.

Los valores de turbiedad, obtenidos durante el monitoreo del afluente y efluente de los filtros piloto, se presentan en el Anexo 3, cuadro No. 3 y el gráfico correspondiente en el Anexo 4, gráfico No. 9.

Durante una carrera de filtración, en un cierto instante de tiempo la pérdida de carga en el medio filtrante está compuesta de dos términos:

H_{f_0} = Pérdida de carga en el medio filtrante limpio, $t= 0$

$H_{f(t)}$ = Pérdida de carga en el medio filtrante, en un instante (t)

Por tanto, la pérdida de carga total ($H_{f \text{ total}}$) en el medio filtrante es:

$$H_{f \text{ total}} = H_{f0} + H_{f(t)} \quad (7.1)$$

La evolución de la presión al interior del lecho filtrante está en función del tiempo de filtrado, así, en un determinado instante de la carrera de filtración y para un determinado punto del lecho filtrante, cuando la suma de las pérdidas de carga ($H_{f \text{ total}}$) a partir de la superficie del lecho filtrante es superior a la carga hidráulica de agua sobre este punto o nivel (H), se presenta una presión negativa (menor que la presión atmosférica).

Para cualquier punto dentro del lecho filtrante, en cualquier instante de tiempo en la carrera de filtración, se tiene una carga hidráulica disponible ($H_{\text{disponible}}$), así:

$$H_{\text{disponible}} = H - (H_{f \text{ total}}) \quad (7.2)$$

Si, $H_{\text{disponible}} < 0$; entonces, en el lecho filtrante habrá presiones negativas.

En el Anexo 3, cuadros No. 4 a 6, se indican los valores de: pérdida de carga total de los piezómetros a diferentes alturas del lecho filtrante y los valores calculados de carga hidráulica disponible para el ciclo de filtrado; con estos valores se graficaron y obtuvieron las curvas de evolución y distribución de presiones, durante el ciclo de filtrado, en cada uno de los lechos filtrantes de las columnas piloto, ver gráficos 7.1, 7.2 y 7.3; numeral 7.3.2.

7.2.2 PRUEBA PILOTO No. 2

7.2.2.1 Condiciones de ejecución de la prueba

En esta prueba, se aplicó por igual para los tres filtros piloto una tasa de filtración constante ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) y carga hidráulica disponible constante. A continuación en el cuadro 7.3, se indican las condiciones en las que se ejecutó esta prueba en los tres filtros piloto.

CUADRO 7.3**PRUEBA No. 2: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL**

DESCRIPCIÓN	FILTRO PILOTO No.		
	F1	F2	F3
Fecha de inicio de prueba	2013-02-11		
Hora de inicio de prueba	15:00		
Fecha de finalización de prueba	2013-02-14		
Hora de finalización de prueba	9:00		
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	315	315	315
Caudal de filtración piloto (ml/s)	69	69	69
Caudal equivalente en filtro PTAP (l/s)	171,5	171,5	171,5
Caudal total equivalente en PTAP (l/s)	2745	2745	2745
Carrera de filtración (horas)	72	72	72
Carga hidráulica disponible constante (m)	1,44	1,44	1,44

Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.2.2.2 Resultados de prueba piloto No. 2

En el Anexo 3, cuadro No. 7, se presenta la turbiedad del afluente y efluente obtenidos durante la prueba No. 2 y, las pérdidas de carga en los piezómetros de los filtros piloto No. 1, 2 y 3; con estos valores se obtuvo las curvas de pérdida de carga Vs. Tiempo de filtración que se indican en el Anexo 4, gráficos No. 10 a 13.

Los valores de turbiedad, medidos durante el monitoreo del afluente y efluente de los filtros piloto se presentan en el Anexo 3, cuadro No. 7 y el gráfico correspondiente en el Anexo 4, gráfico No. 14.

Como ya se dejó indicado, en la prueba No. 1, para cualquier punto dentro del lecho filtrante, en cualquier instante de tiempo en la carrera de filtración, se tiene una carga hidráulica disponible ($H_{\text{disponible}}$), ver ecuación 7.1.

Si, $H_{\text{disponible}} < 0$; entonces, se presentan presiones negativas en el lecho filtrante.

En el Anexo 3, cuadros No. 8 a 10, se indican los valores de: pérdida de carga total que corresponden a las lecturas de los piezómetros a diferentes alturas del lecho filtrante y los valores calculados de carga hidráulica disponible para el ciclo

de filtrado. Con estos valores se graficaron las curvas de evolución y distribución de presiones para cada uno de los lechos filtrantes de las columnas piloto, ver gráficos No. 7.4, 7.5 y 7.6.

7.2.3 PRUEBA PILOTO No. 3

7.2.3.1 Condiciones de ejecución de la prueba

En esta prueba el ciclo de filtrado, se realizó en dos fases, en las que se aplicó diferentes tasas de filtración (2) que se ejecutaron y aplicaron por igual para los tres filtros piloto y los filtros No. 7 y 8 del prototipo.

7.2.3.1.1 Fase 1 de prueba No. 3

En esta fase se aplicó a los tres filtros pilotos, durante las ocho primeras horas del ciclo de filtrado, una tasa de filtración constante ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) y carga hidráulica disponible constante. En los filtros No. 7 y 8 del prototipo, las pesas de las válvulas del efluente se fijaron en 170 l/s, equivalente a una tasa de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. En el cuadro 7.4, indicado a continuación se describe las condiciones de tasas y caudales de filtración correspondientes a la primera fase de la prueba No. 3.

Con las condiciones aplicadas en esta fase, se simulará y observará la incidencia en el modelo piloto del incremento de la tasa de filtración durante el lavado de las unidades de filtración en la PTAP (prototipo). Conviene indicar que en condiciones normales, diariamente se lavan de dos a tres filtro dobles y en condiciones máximas se ha llegado a lavar hasta cinco filtros al día; el lavado de una unidad doble de filtración demanda aproximadamente una hora, es decir diariamente se presenta un incremento de la tasa de filtración durante dos a tres horas, aproximadamente.

Durante el lavado de un filtro del prototipo, se dejan de filtrar en promedio 300 l/s, caudal que debe ser asimilado por los 14 filtros restantes (en la actualidad 13 filtros) y que redondeado equivale a una tasa de filtrado de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

CUADRO 7.4**PRUEBA No. 3, FASE 1: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL**

DESCRIPCIÓN	FILTRO PILOTO No.		
	F1	F2	F3
Fecha de inicio de prueba	2013-02-19		
Hora de inicio de prueba	15:00		
Fecha de finalización de la fase 1	2013-02-19		
Hora de finalización de fase 1	23:00		
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	315	315	315
Caudal de filtración piloto (ml/s)	69	69	69
Caudal equivalente en filtro PTAP (l/s)	171,5	171,5	171,5
Caudal total equivalente en PTAP (l/s)	2745	2745	2745
Carrera de filtración (horas)	8	8	8
Carga hidráulica disponible constante (m)	1,44	1,44	1,44

Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.2.3.1.2 Fase 2 de prueba No. 3

Durante el ciclo de filtrado, se monitoreó la turbiedad del efluente y se tomaron lecturas de pérdida de carga, en cada uno de los piezómetros de los filtros piloto. A fin de monitorear paralelamente el prototipo y los filtros piloto, se hizo coincidir el arranque de la prueba con el inicio de operación del filtro No. 7 de la PTAP.

CUADRO 7.5**PRUEBA No. 3, FASE 2: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL**

DESCRIPCIÓN	FILTRO PILOTO No.		
	F1	F2	F3
Fecha de inicio de prueba	2013-02-19		
Hora de inicio de fase 2	23:00		
Fecha de finalización de prueba	2013-02-22		
Hora de finalización de prueba	10:00		
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	275	275	275
Caudal de filtración piloto (ml/s)	60	60	60
Caudal equivalente en filtro PTAP (l/s)	150	150	150
Caudal total equivalente en PTAP (l/s)	2400	2400	2400
Carrera de filtración (horas)	58	61	61
Carga hidráulica disponible constante (m)	1,44	1,44	1,44

Elaborado por: Fernando Ojeda N

Luego de las ocho primeras horas de la carrera de filtración (fase 1), se inició la fase 2, así, en las tres columnas piloto, se disminuyó la tasa de filtración de 315 a 275 m³/m²/d, tasa que se la mantuvo hasta el final de la carrera de filtración y que equivale a un caudal de filtración de 150 l/s en cada filtro del prototipo; de igual modo se aplicó una carga hidráulica constante. En el cuadro 7.5, se indica las condiciones en las que se ejecutó la segunda fase de la prueba No. 3.

7.2.3.2 Resultados generales de prueba piloto No. 3

En el Anexo 3, cuadro No. 11, se presenta los resultados generales obtenidos durante la prueba piloto No. 3 de la turbiedad del afluente y efluente y, las lecturas de pérdidas de carga en los piezómetros de los filtros piloto No. 1, 2 y 3; con estos valores se obtuvo las curvas de pérdida de carga Vs. Tiempo de filtración que se indican en el Anexo 4, gráficos No. 15 a 18.

Durante la duración de la prueba se monitoreo, por igual, la turbiedad del afluente y efluente de los tres filtros piloto y de los filtros No. 7 y 8 del prototipo, cuyos resultados se presentan en el Anexo 3, cuadro No. 11 y los gráficos correspondientes en el Anexo 4, gráficos No. 19 y 20.

En el Anexo 3, cuadros No. 12 a 14, se indican los valores de: pérdida de carga total que corresponden a las lecturas de los piezómetros a diferentes alturas del lecho filtrante y los valores calculados de carga hidráulica disponible para el ciclo de filtrado. Con estos valores se graficaron las curvas de evolución y distribución de presiones para cada uno de los lechos filtrantes de las columnas piloto y que se observan en los gráficos 7.7, 7.8 y 7.9, numeral 7.3.4.

7.2.4 PRUEBA PILOTO No. 4

7.2.4.1 Condiciones de ejecución de la prueba

En esta prueba se mantuvo constante la carga hidráulica total disponible (nivel constante) y se aplicó por igual a los tres filtros piloto una tasa de filtración

declinante. Para el inicio de la carrera de filtración, se fijó una tasa de filtración de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ y luego se dejó que en cada filtro piloto la tasa de filtración decline paulatinamente conforme se desarrolló el tiempo de filtrado; la carga hidráulica disponible, se mantuvo constante. A continuación en el cuadro 7.6, se indican las condiciones en las que se ejecutó esta prueba en los tres filtros piloto.

CUADRO 7.6

PRUEBA No. 4: TASA DE FILTRACIÓN Y CAUDAL

DESCRIPCIÓN	FILTRO PILOTO No.		
	F1	F2	F3
Fecha de inicio de prueba	2013-02-25		
Hora de inicio de prueba	10:00		
Fecha de finalización de prueba	2013-02-28		
Hora de finalización de prueba	13:00		
Tasa de filtración de arranque ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$)	315	315	315
Tasa de filtración durante ciclo de filtrado	Declinante	Declinante	Declinante
Caudal inicial de filtración piloto (ml/s)	75	75	75
Caudal inicial equivalente en filtro PTAP (l/s)	171,5	171,5	171,5
Caudal inicial total equivalente en PTAP (l/s)	2745	2745	2745
Carrera de filtración (horas)	72	72	72
Carga hidráulica disponible constante (m)	1,44	1,44	1,44

Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.2.4.2 Resultados de prueba piloto No. 4

En el Anexo 3, cuadro No. 15, se presenta los resultados de turbiedad del afluente y efluente, obtenidos en la prueba piloto No. 3 y, las lecturas de pérdidas de carga en los piezómetros de los filtros piloto No. 1, 2 y 3; con estos valores se obtuvo las curvas de pérdida de carga Vs. Tiempo de filtración que se indican en el Anexo 4, gráficos No. 21 a 24.

Los valores de turbiedad, medidos durante el monitoreo del afluente y efluente de los filtros piloto se presentan en el Anexo 3, cuadro No. 15 y el gráfico correspondiente en el Anexo 4, gráfico No. 25.

En el Anexo 3, cuadros No. 16 a 18, se indican los valores de: pérdida de carga total que corresponden a las lecturas en los piezómetros a diferentes alturas del

lecho filtrante y los valores calculados de carga hidráulica disponible para el ciclo de filtrado.

Con los datos de carga hidráulica disponible a diferentes alturas del lecho filtrante, se graficaron las curvas de evolución y distribución de presiones, durante la carrera de filtración, para cada uno de los lechos filtrantes de las columnas piloto, ver gráficos 7.10, 7.11 y 7.12.

En el Anexo 3, cuadro No. 19, se tabula los valores de las tasas de filtración registradas durante la carrera de filtración en cada uno de los filtros piloto y se presentan las pérdidas de carga totales del lecho filtrante; estos valores permitieron elaborar el gráfico No. 26 del Anexo 4, en el cual se representan las curvas de pérdidas de carga total Vs. La carrera de filtración y la tasa de filtración Vs. La carrera de filtración.

7.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE PRUEBAS PILOTO

7.3.1 CRITERIOS GENERALES PARA EVALUAR RESULTADOS

Los resultados logrados en la investigación piloto se analizarán considerando la calidad del agua filtrada, la evolución de las pérdidas de carga y las carreras de filtración obtenidas.

Se adoptaron los siguientes indicadores que permitirán evaluar y comparar los resultados obtenidos en la investigación piloto, así: turbiedad del efluente de agua filtrada (promedio, máximo y mínimo), duración de la carrera de filtración hasta que la pérdida de carga total al nivel inferior de la capa de arena llegue a 2,20 metros, valor que corresponde a la carga hidráulica total en ese punto o llegar a una carrera máxima de filtración de 70 horas que corresponde al límite fijado del ciclo de filtrado en la PTAP (prototipo), igualmente se considera el porcentaje de tiempo en que la turbiedad del efluente se presenta por debajo de: 0,25 NTU; 0,5 NTU y 1,0 NTU, y la evolución de la pérdida de carga en el lecho filtrante.

7.3.2 EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 1

En el Anexo 3, cuadro No. 20, se presenta la clasificación de las turbiedades del afluente y efluente de los filtros piloto y los resultados de la prueba piloto No.1 en función de los parámetros indicadores, como turbiedad promedio, máxima y mínima del afluente y efluente al filtro y además el porcentaje de presentación en tiempo, en relación a la duración de la carrera de filtración, de los valores característicos de la turbiedad del efluente para los valores de: $\leq 1,0$; $\leq 0,50$ y $\leq 0,25$ NTU.

En el cuadro 7.7, que se presenta a continuación, se resume los resultados de la Prueba No. 1, en función de los parámetros adoptados como indicadores para la evaluación de los resultados de las pruebas, así:

CUADRO 7.7

PRUEBA PILOTO No. 1: VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACIÓN

TASA DE FILTRACIÓN CONSTANTE = 275 m ³ /m ² /d Y CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE CONSTANTE										
FILTRO PILOTO No.	TURBIEDAD AFLUENTE (NTU)			TURBIEDAD DEL EFLUENTE (NTU)			PRESENTACIÓN DE TURBIEDADES DURANTE LA CARRERA DE FILTRACIÓN (%)			CARRERA DE FILTRACIÓN HASTA PÉRDIDA DE CARGA FIJADA DE 2,20 m (horas)
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	< 0,25 NTU	< 0,50 NTU	< 1,0 NTU	
1	0,86	1,20	0,6	0,27	0,33	0,22	26,39	100	100	76
2				0,29	0,36	0,23	16,67	100	100	84
3				0,3	0,38	0,24	18,75	100	100	88

Elaborado por: Fernando Ojeda N

Esta prueba, se realizó para una tasa de filtración de 275 m³/m²/d, semejante a las condiciones operativas actuales de la PTAP de 150 l/s por cada filtro (operando 15 filtros), los filtros piloto No. 2 y 3 presentan valores promedio de turbiedad muy similares y ligeramente mayores al filtro 1, pero sin llegarse a marcar diferencias notables.

Para los tres filtros piloto, durante el 100% del tiempo de duración de la carrera de filtración de 72 horas, se obtuvo un efluente menor a 0,5 NTU.

De los gráficos No. 5 a 8, Anexo 4, se obtiene que las carreras de filtración proyectadas para llegar a la máxima pérdida de carga establecida en 2,20 m. son de 84 y 88 horas para los filtro piloto No. 2 y 3, duración de ciclo de filtrado que se presenta muy aceptable, el filtro No.1 presenta una carrera de filtración menor con 76 horas lo que es congruente al tener la antracita con granulometría más fina de los tres filtros y menor coeficiente de uniformidad $CU= 1,3$.

La turbiedad del afluente a los filtros piloto con la que estos trabajaron durante la carrera de filtración, se encuadra dentro del rango de 0,8 a 1,1 NTU que generalmente, se obtiene como efluente de los clarificadores de la PTAP, ver gráfico No. 9, Anexo 4.

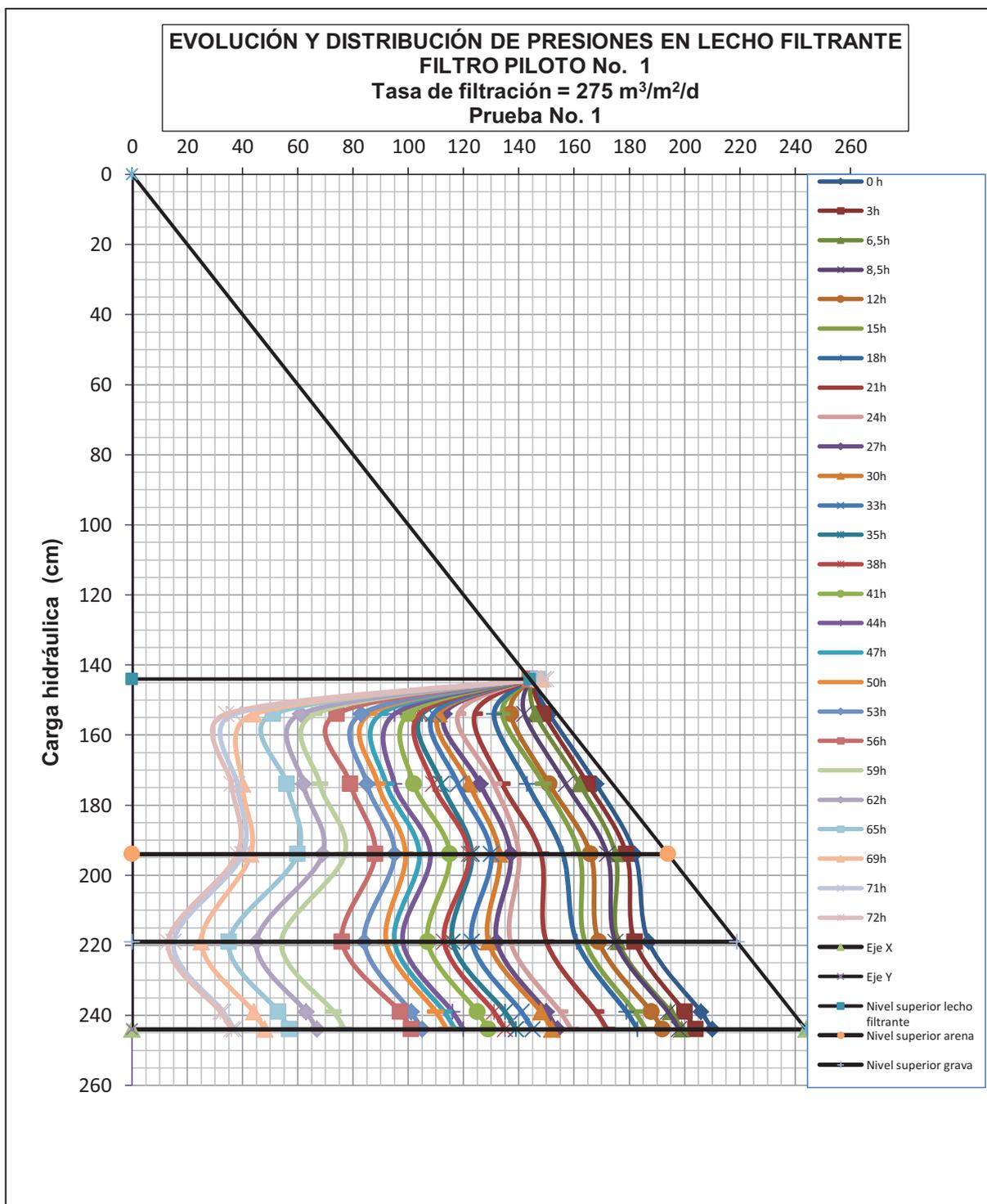
En los gráficos 7.1 a 7.3, se observa la evolución de las pérdidas de carga en cada columna piloto. Al término de las 72 horas de la carrera de filtración, en ninguno de los tres filtros piloto se llegó a completar la máxima pérdida de carga total de 2,20 m. y por tanto no se presentaron presiones negativas, aunque la pérdida de carga al final de la carrera de filtración, fue mayor en el filtro No. 1 con 206 cm; en el filtro No.2 de 184 cm y menor en el filtro No. 3 con 174 cm.

A pesar que en los tres filtros piloto, se obtiene un efluente, en términos generales, bastante similares en turbiedad, la mayor diferencia en su comportamiento está dada por la pérdida de carga y por consiguiente en la longitud de la carrera de filtración, en este sentido los filtros piloto No. 2 y 3 presentan resultados más favorables en la longitud de la carrera de filtración y brinda calidad de efluente muy aceptable.

Un aspecto a resaltar de los gráficos 7.1 a 7.3, es la distribución de las pérdidas de carga en el lecho filtrante, así, en el filtro No.1 se observa una mayor retención de partículas en la capa de arena en relación a la capa de antracita.

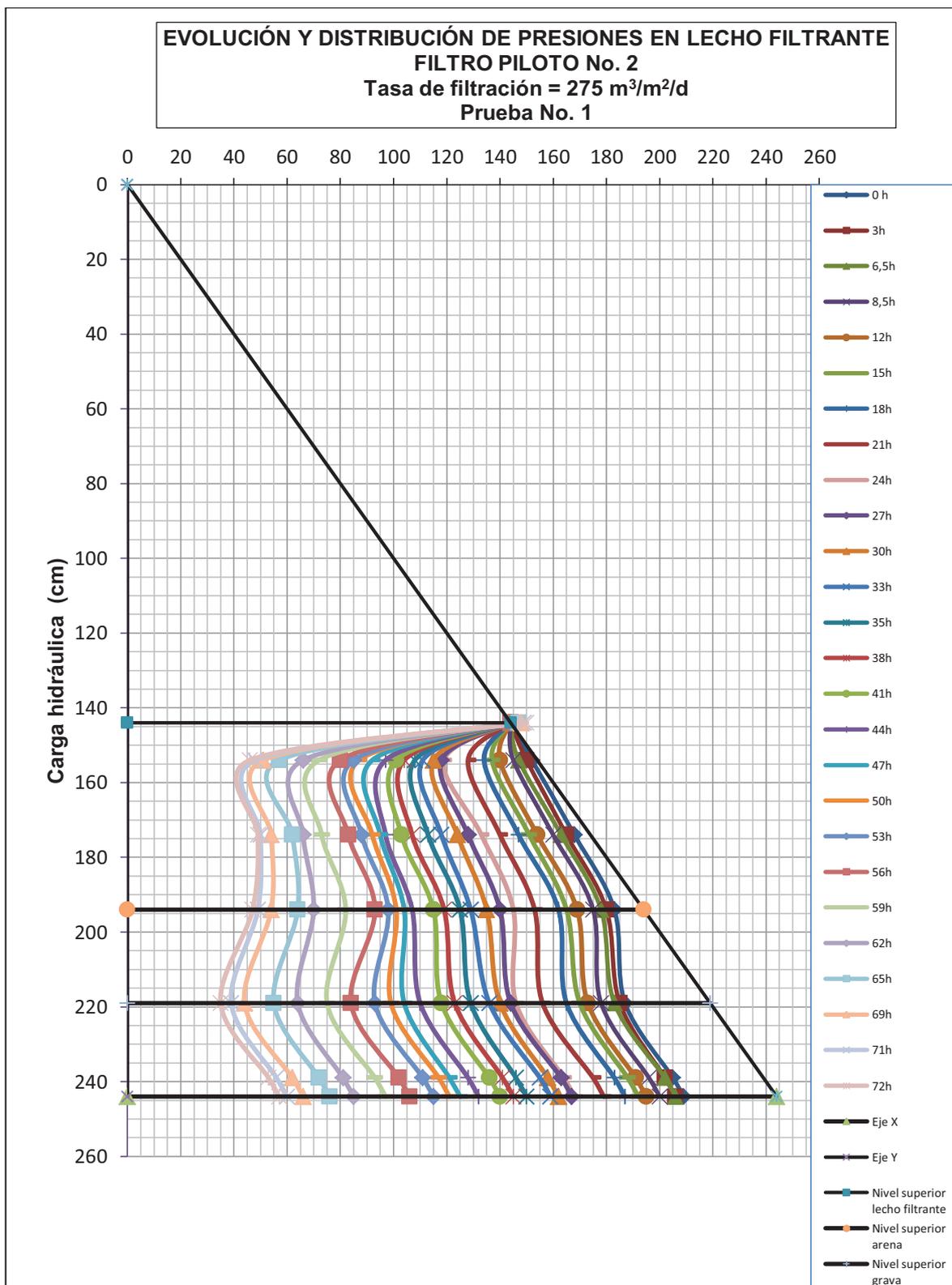
Para los filtros No. 2 y 3, se tiene una menor retención de partículas en la capa de arena, lo que se traduce en una mejor distribución de las pérdidas de carga dentro del lecho y permite el filtrado sin generar pérdidas de carga excesivas.

GRÁFICO 7.1



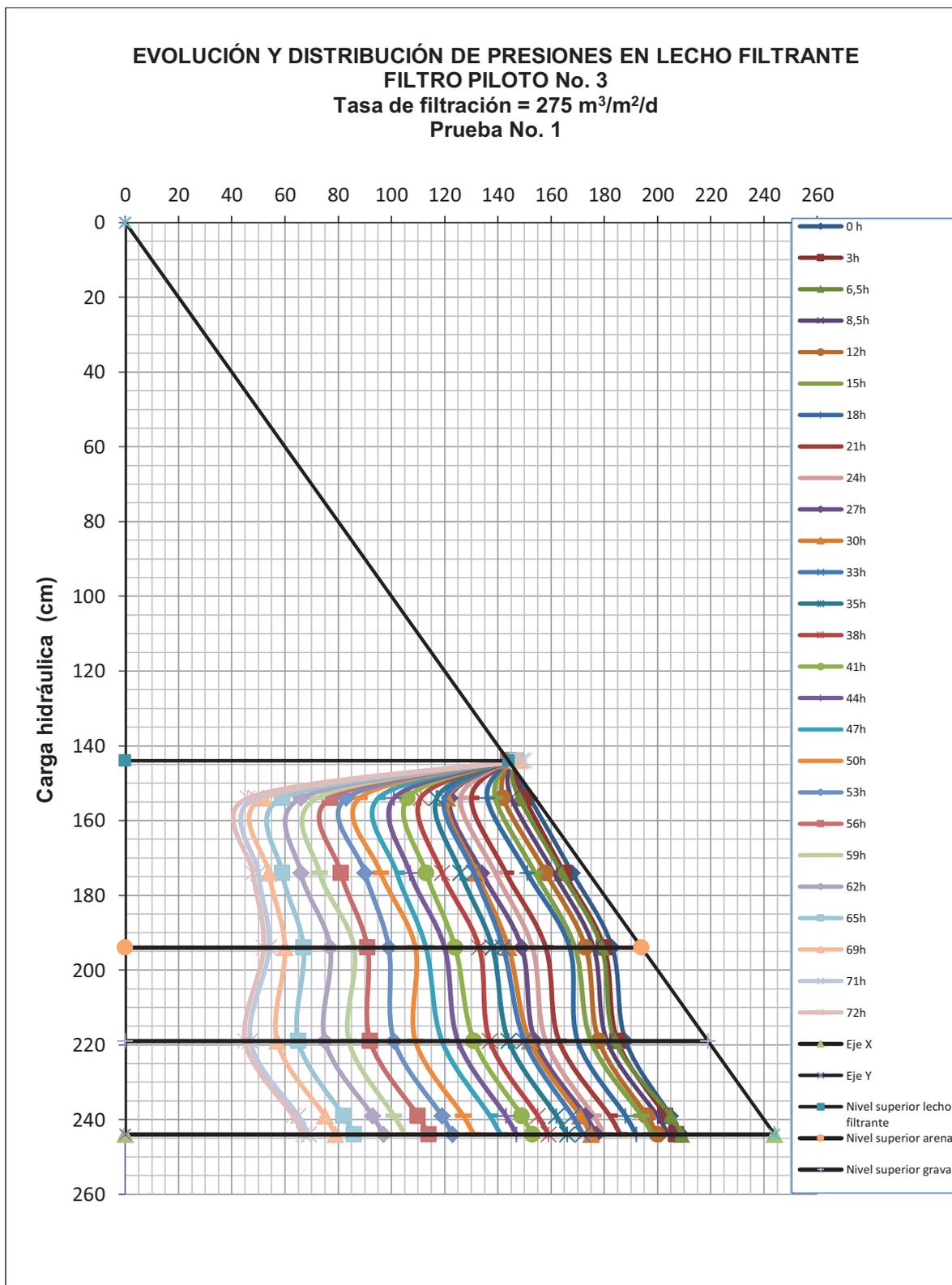
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.2



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.3



Elaborado por: Fernando Ojeda N

En conclusión, los resultados de esta prueba, son positivos y bastante equiparables para los tres filtros en cuanto a la calidad del efluente; pero por otro lado, se obtuvo una diferencia en su comportamiento en la duración de la carrera de filtración en los filtros No. 2 (CU= 1,45) y 3 (CU=1,6), que incluso permite establecer longitudes proyectadas de filtración entre 84 y 88 horas, respectivamente, aspecto que es favorable operacionalmente.

En virtud que los resultados de la prueba, determinan que los lechos filtrantes seleccionados para la modelación presentan eficiencias y comportamiento favorables en los indicadores de turbiedad del efluente, carreras de filtración y evolución de las pérdidas de carga, se decidió proseguir con una siguiente prueba en la que se incrementa la tasa de filtración.

7.3.3 EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 2

En el Anexo 3, cuadro No. 21, se presenta la clasificación de las turbiedades del afluente y efluente de los filtros piloto y los resultados de la prueba piloto No. 2 en función de los parámetros indicadores de turbiedad promedio, máxima y mínima del afluente y efluente al filtro y el porcentaje de presentación en tiempo, en relación a la duración de la carrera de filtración, de los valores característicos de la turbiedad del efluente para los valores de: $\leq 1,0$; $\leq 0,50$ y $\leq 0,25$ NTU.

En el cuadro 7.8, se indica el resumen de resultados de la Prueba No. 2, en función de los parámetros adoptados como indicadores para la evaluación.

Durante la ejecución de la prueba No. 2, se registró una turbiedad promedio en el afluente (agua clarificada) de 1,59 NTU, con valores picos de hasta 4,82 NTU y valores mínimo de 0,82 NTU, valores que muy pocas ocasiones se presentan en el agua clarificada de la PTAP, aspectos que unidos a la alta tasa ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$), aplicada a los filtros piloto, generó en forma coincidental condiciones extremas de operación, durante la prueba.

A pesar de que la prueba se realizó en condiciones operativas muy desfavorables por la alta turbiedad del afluente y alta tasa aplicada, las turbiedades promedio del

efluente de los filtros piloto, se presentan en un rango entre 0,5 y 0,6 NTU que indican una eficiencia muy buena de los lechos filtrantes evaluados, con una ventaja en calidad del agua filtrada del filtro No.1 sobre los filtros piloto 2 y 3, pero a su vez, en este se obtuvo una menor carrera de filtración (51 horas) para llegar a la pérdida de carga de 2,20 m. al contrario de los filtros No. 2 y 3 en los que se tiene 58 y 62 horas, respectivamente como carrera de filtración.

CUADRO 7.8

PRUEBA PILOTO No. 2: VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACION

PRUEBA PILOTO No. 2, TASA DE FILTRACIÓN CONSTANTE = 315 m ³ /m ² /d Y CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE CONSTANTE										
FILTRO PILOTO No.	TURBIEDAD AFLUENTE (NTU)			TURBIEDAD DEL EFLUENTE (NTU)			PRESENTACIÓN DE TURBIEDADES DURANTE LA CARRERA DE FILTRACIÓN (%)			CARRERA DE FILTRACIÓN HASTA PÉRDIDA DE CARGA FIJADA DE 2,20 m (horas)
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	< 0,25 NTU	< 0,50 NTU	< 1,0 NTU	
1	1,59	4,82	0,82	0,52	1,35	0,13	21,4	48,2	89,3	51
2				0,55	1,42	0,21	13,6	40,9	90,9	58
3				0,58	1,46	0,25	18,2	50	90,9	62

Elaborado por: Fernando Ojeda N

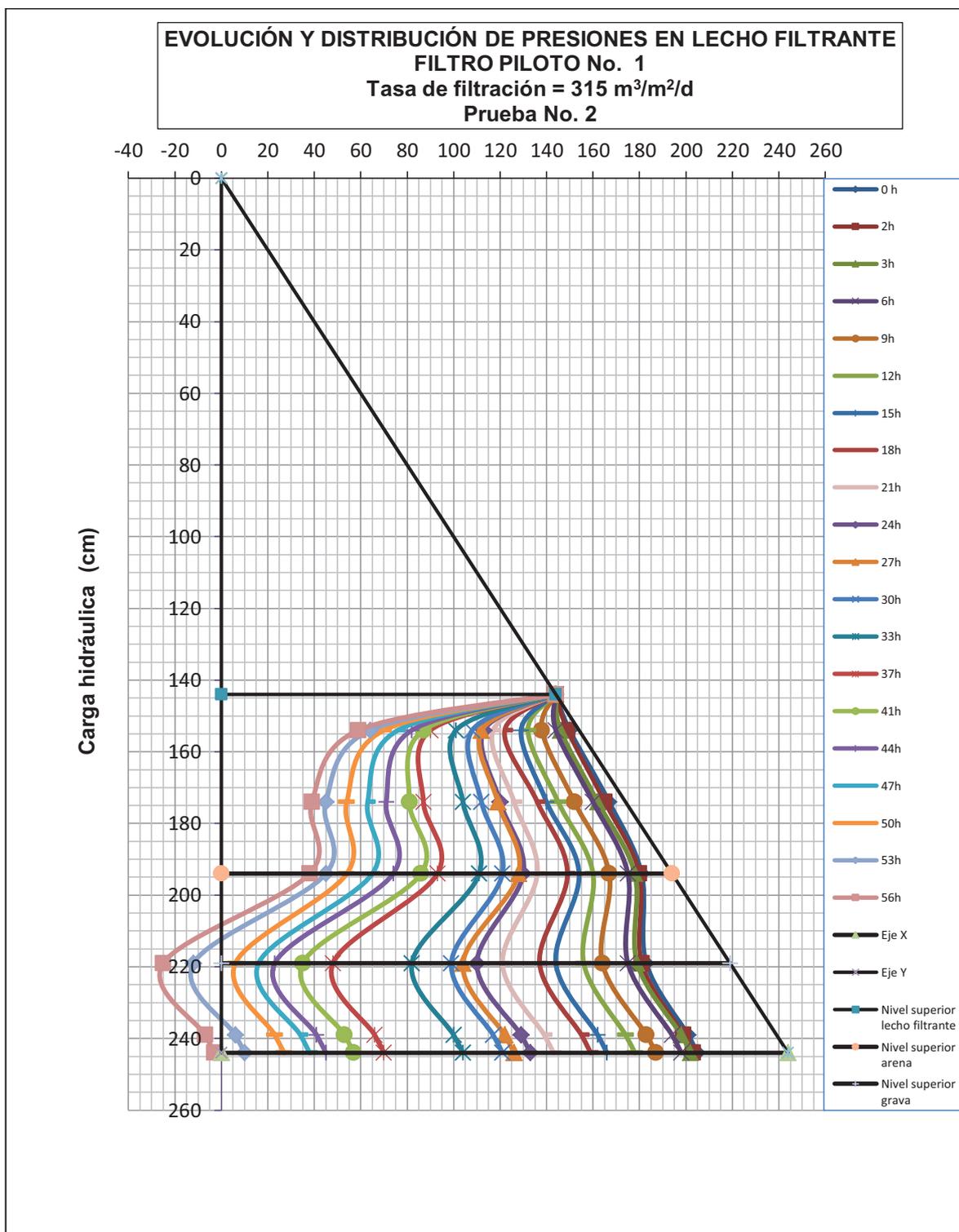
Entre las 27 y 33 horas del ciclo de filtrado, se presentaron turbiedades en el afluente entre 4,4 NTU y 4,82 NTU, a pesar de la ocurrencia de estos picos altos de turbiedad en el agua clarificada, el agua del efluente de los tres filtros piloto, presentó valores menores a 1,5 NTU, durante este período de tiempo.

De los gráficos 7.4 a 7.6, se observa que la distribución y evolución de las pérdidas de carga en la capa de arena del filtro No. 1, son mayores que en la capa de antracita, indicando un mayor trabajo, de la primera en la retención de partículas respecto a la capa de antracita que incluso llegan a generar pérdidas de carga negativas a partir de las 50 horas de la carrera de filtrado.

En los filtros No. 2 y 3, se tiene una mejor distribución de las pérdidas de carga entre las capas de arena y antracita que llegan al límite de generar pérdidas de

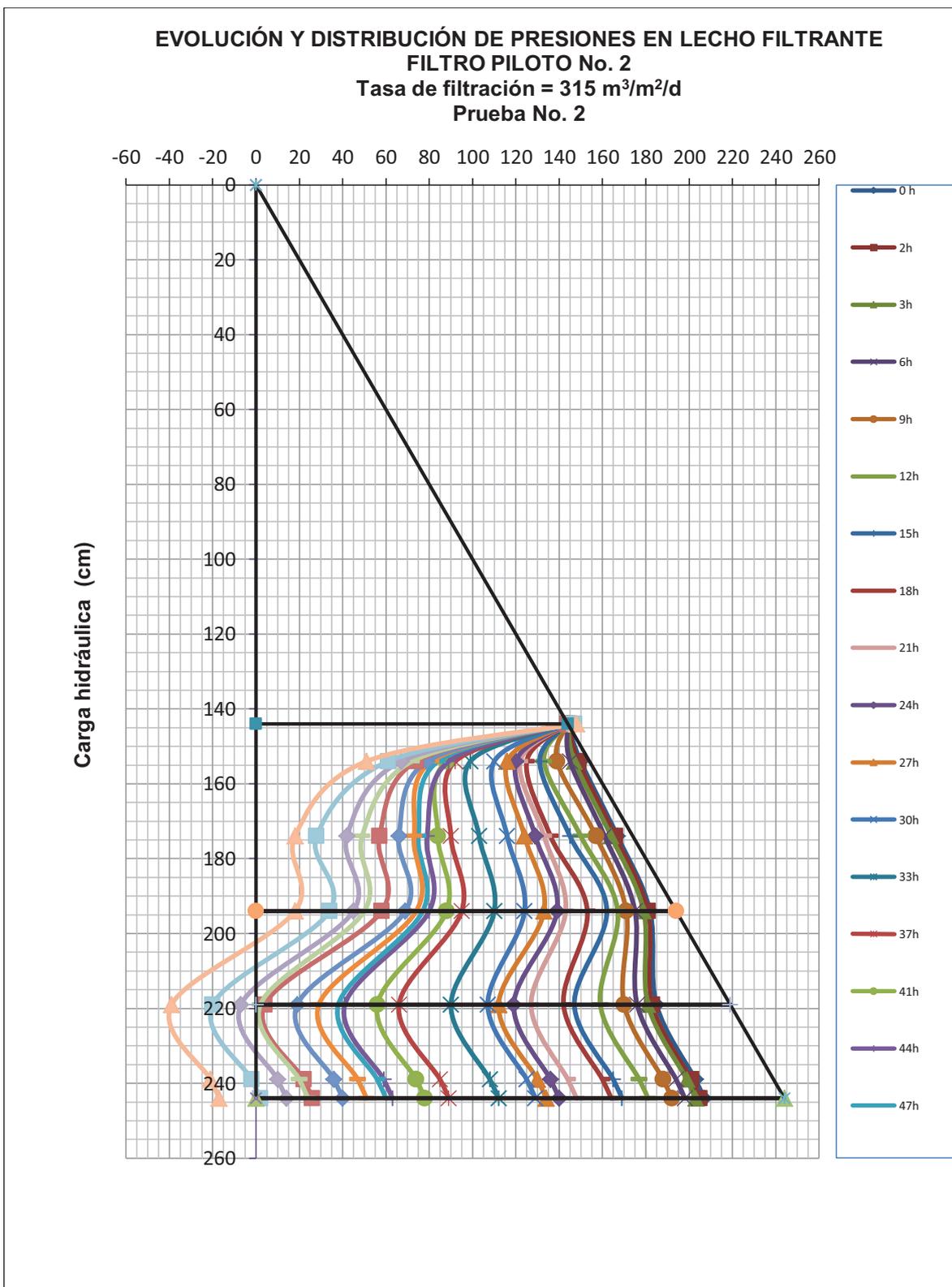
carga negativas a las 58 y 62 horas de la carrera de filtración, respectivamente.

GRÁFICO 7.4



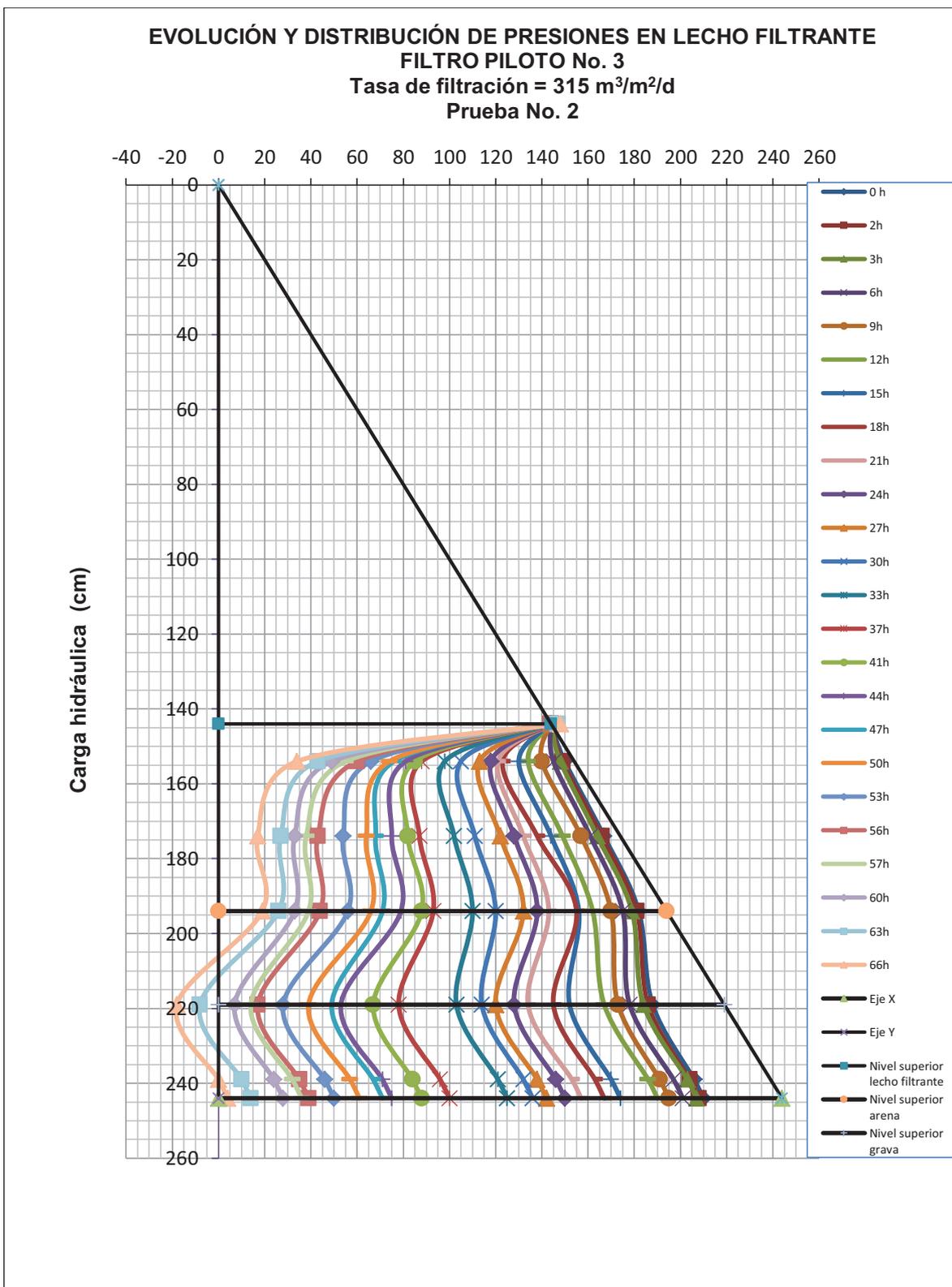
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.5



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.6



Elaborado por: Fernando Ojeda N

En conclusión, los resultados de esta prueba permiten definir que los filtros piloto No. 2 y 3 (CU= 1,45 y CU = 1,6; respectivamente) presentan mayores longitudes en sus carreras de filtración con 58 y 62 horas, respectivamente, tiempos que pueden considerarse bastante buenos a pesar de las altas y exigentes condiciones de tasa de filtración y calidad de agua del afluente, presentes durante la prueba y además, la calidad del efluente obtenido igualmente es muy bueno, en términos de turbiedad.

En este sentido y de acuerdo a los valores obtenidos para los indicadores de evaluación adoptados, se concluye que los lechos filtrantes de las columnas piloto No. 2 y 3, presentan características granulométricas muy eficientes y que es recomendable sobre los resultados de las pruebas piloto No. 1 y 2, seguir la evaluación en el modelo piloto con otras pruebas que permitan valorar su comportamiento para otras situaciones operativas como el incremento de la tasa de filtración durante el ciclo de filtrado.

7.3.4 EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 3

En el Anexo 3, cuadro No. 22, se presenta la clasificación de las turbiedades del afluente y efluente de los filtros piloto y los resultados de la prueba piloto No. 3 en función de los parámetros indicadores de turbiedad promedio, máxima y mínima del afluente y efluente al filtro y además el porcentaje de presentación en tiempo, en relación a la duración de la carrera de filtración, de los valores característicos de la turbiedad del efluente para los valores de: $\leq 1,0$; $\leq 0,50$ y $\leq 0,25$ NTU.

Como ya se indicó, esta prueba y su ciclo de filtrado, se desarrolló en dos fases que se ejecutaron y aplicaron por igual para los tres filtros pilotos y para los filtros No. 7 y 8 del prototipo. En la primera fase se aplicó a los tres filtro pilotos, durante las ocho primeras horas del ciclo de filtrado, una tasa de filtración constante ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) y carga hidráulica disponible constante, durante las seis primeras horas del ciclo de filtrado se presentaron turbiedades en el afluente (agua clarificada), mayores a 1,8 NTU que incluso llegaron a un valor pico de 6 NTU; durante el resto de la carrera de filtración la turbiedad del afluente presentó valores

levemente altos a los normalmente obtenidos a la salida de los clarificadores. En estas condiciones la primera fase de la prueba, igualmente se tuvo una situación coincidental al presentarse una alta turbiedad en el afluente y una alta tasa de filtrado, situación que se generó por igual a los filtro No. 7 y 8 del prototipo.

A continuación, en el cuadro 7.9, se resume los resultados de la prueba No. 3, en función de los parámetros adoptados como indicadores para la evaluación de los resultados de las pruebas, así:

CUADRO 7.9

PRUEBA PILOTO No. 3: VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACION

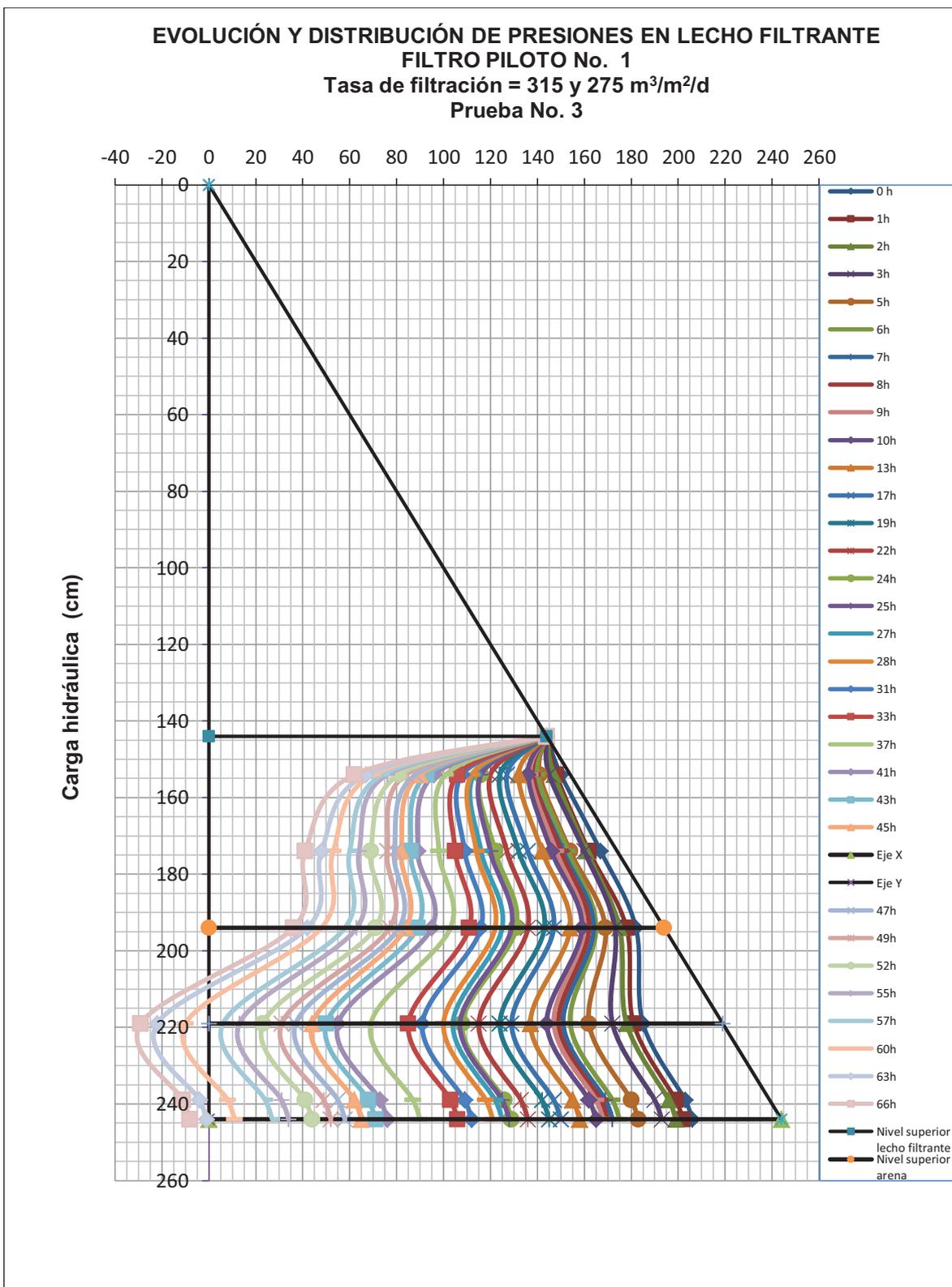
TASA DE FILTRACIÓN CONSTANTE, FASE 1 = 315 m ³ /m ² /d Y FASE 2 = 275 m ³ /m ² /d, CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE CONSTANTE										
FILTRO No.	TURBIEDAD AFLUENTE (NTU)			TURBIEDAD DEL EFLUENTE (NTU)			PRESENTACIÓN DE TURBIEDADES DURANTE LA CARRERA DE FILTRACIÓN (%)			CARRERA DE FILTRACIÓN HASTA PÉRDIDA DE CARGA FIJADA DE 2,20 m (horas)
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	< 0,25 NTU	< 0,50 NTU	< 1,0 NTU	
1	1,49	6	0,75	0,38	0,64	0,16	22,7	83,3	100	58
2				0,36	0,54	0,18	13,0	97,1	100	63
3				0,36	0,67	0,15	16,7	89,9	100	69
Prototipo Filtro 7				0,70	2,10	0,3	0	24,64	92,8	69
Prototipo Filtro 8				0,69	2,28	0,3	0	24,56	91,2	57

Elaborado por: Fernando Ojeda N

En la segunda fase, se disminuyó la tasa de filtración de 315 a 275 m³/m²/d, tasa que se la mantuvo hasta el final de la carrera de filtración y que equivale a un caudal de filtración de 150 l/s en cada filtro del prototipo; de igual modo se aplicó una carga hidráulica constante.

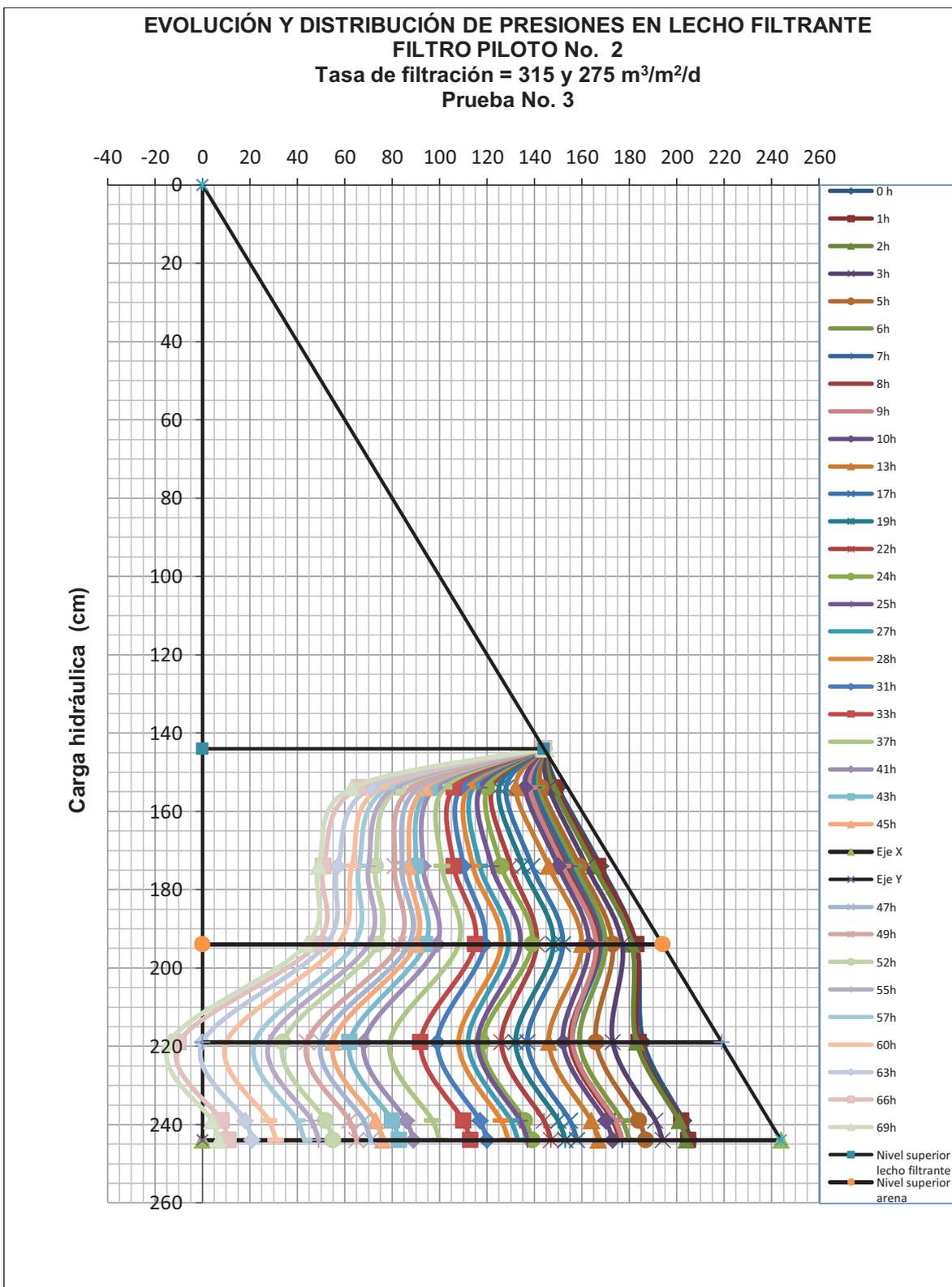
Se monitoreó la turbiedad del efluente de los tres filtros piloto y de los filtros No. 7 y 8 del prototipo, los valores registrados se reportan en el Anexo 3, cuadro No. 11, los valores clasificados y la determinación de los valores de los parámetros de evaluación característicos, se indican en el Anexo 3, cuadro No. 24.

GRÁFICO 7.7



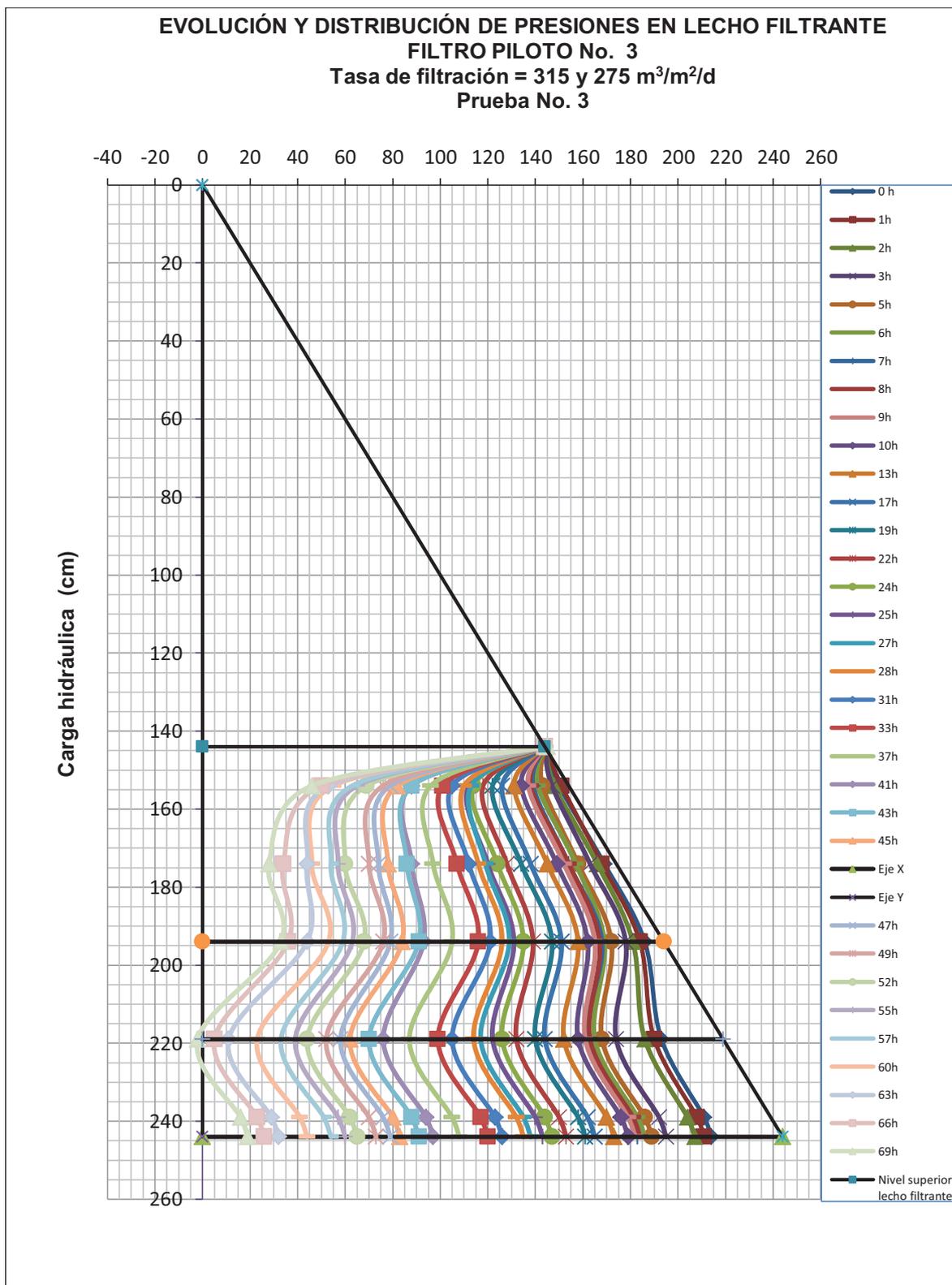
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.8



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.9



Elaborado por: Fernando Ojeda N

En el efluente de los tres filtros piloto se obtuvo turbiedades promedio, máximas y mínimas, casi similares; la turbiedad promedio se registró en el rango de 0,36 a

0,38 NTU y la presentación de turbiedades menores o iguales a 0,5 NTU, fue entre el 83% y 90% del tiempo de duración de la carrera de filtración.

De los gráficos 7.7 a 7.9, se observa que el filtro No. 3, presenta mejor distribución de las pérdidas de carga en la capa de arena y antracita, llegando al límite de la pérdida de carga total de 2,20 m. a las 69 horas. En los filtros No. 1 y 2, la distribución y evolución de la pérdida de carga es mayor en la capa de arena y se llega a generar presiones negativas en el lecho filtrante a las 58 y 63 horas.

Igualmente en esta prueba, el parámetro indicador que marca la diferencia en los resultados obtenidos es la pérdida de carga que generó duraciones de 58, 63 y 69 horas para los filtros piloto No. 1, 2 y 3, respectivamente. Tener una carrera de filtración de 63 a 69 horas, para las condiciones aplicadas y presentadas en la prueba, operativamente representa un resultado positivo y muy aceptable, además, la calidad promedio del efluente es igualmente muy buena.

En relación a los resultados obtenidos en los filtros No. 7 y 8 del prototipo, se deben realizar los siguientes comentarios, la turbiedad promedio, máxima y mínima de sus efluentes son casi similares, pero son entre un 90% y 100% mayores a las turbiedades promedio y mínimas obtenidas en los filtros piloto, y casi un 300% mayores a las turbiedades máximas; además, El 75% del tiempo la turbiedad del efluente se mantiene sobre 0,5 NTU. Las mediciones obtenidas en los efluentes del prototipo, evidencian el mal estado de sus lechos filtrantes y el limitado rendimiento en la remoción de turbiedad ante la presentación de turbiedades altas en el afluente.

La duración de las carreras de filtración en los filtros 7 y 8 del prototipo fueron de 69 y 57 horas, respectivamente, tiempos en los cuales llegaron a la máxima pérdida de carga fijada en la PTAP.

De la prueba se puede definir la obtención de una mejor calidad del efluente y una mayor duración de la carrera de filtración en el filtro piloto 3 (CU= 1,6) respecto a los filtros piloto 1 y 2 y a los filtros No. 7 y 8 del prototipo.

7.3.5 EVALUACIÓN DE PRUEBA PILOTO No. 4

Finalmente, se presentan los resultados de la prueba No. 4, en la que se aplicó condiciones operativas de tasa declinante y carga hidráulica disponible constante (nivel constante), se inició el ciclo de filtrado con una tasa de arranque de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, que luego fue declinando debido al incremento de la resistencia del lecho filtrante por su progresiva acumulación de partículas.

En el Anexo 3, cuadro No. 23, se da la clasificación de las turbiedades del afluente y efluente de los filtros piloto y, además el porcentaje de presentación en tiempo, en relación a la duración de la carrera de filtración para los valores característicos de la turbiedad del efluente de: $\leq 1,0$; $\leq 0,50$ y $\leq 0,25$ NTU.

CUADRO 7.10

PRUEBA PILOTO No. 4: VALORES CARACTERÍSTICOS DE TURBIEDAD Y CARRERA DE FILTRACIÓN

TASA DE FILTRACIÓN DECLINANTE, TASA DE ARRANQUE = $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ Y CARGA HIDRÁULICA DISPONIBLE CONSTANTE										
FILTRO PILOTO No.	TURBIEDAD AFLUENTE (NTU)			TURBIEDAD DEL EFLUENTE (NTU)			PRESENTACIÓN DE TURBIEDADES DURANTE LA CARRERA DE FILTRACIÓN (%)			CARRERA DE FILTRACIÓN HASTA PÉRDIDA DE CARGA FIJADA DE 2,20 m (horas)
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	< 0,25 NTU	< 0,50 NTU	< 1,0 NTU	
1	0,98	1,7	0,66	0,31	0,6	0,19	34,7	94,7	100	65
2				0,31	0,51	0,20	30,7	94,7	100	68
3				0,29	0,51	0,15	45,3	96	100	75

Elaborado por: Fernando Ojeda N

En el cuadro 7.10, se resume los resultados de la Prueba No. 4, en función de los parámetros adoptados como indicadores para la evaluación de la prueba.

Durante la prueba, se presentaron características de turbiedad en el agua del afluente, que en promedio, corresponden a las condiciones que se tienen generalmente en la PTAP a la salida de los clarificadores.

Las turbiedades promedio obtenidas en el efluente de los tres filtros piloto son similares, entre 0,29 y 0,31 NTU e igualmente en los tres filtros piloto, se obtuvo turbiedades menores a 0,5 NTU durante el 95% del tiempo de duración de la carrera de filtración. En el filtro No. 1, se tuvo el 45,3% del tiempo turbiedades menores a 0,5 NTU, valor mayor al 35% y 31%, obtenido en los filtros 1 y 2, respectivamente.

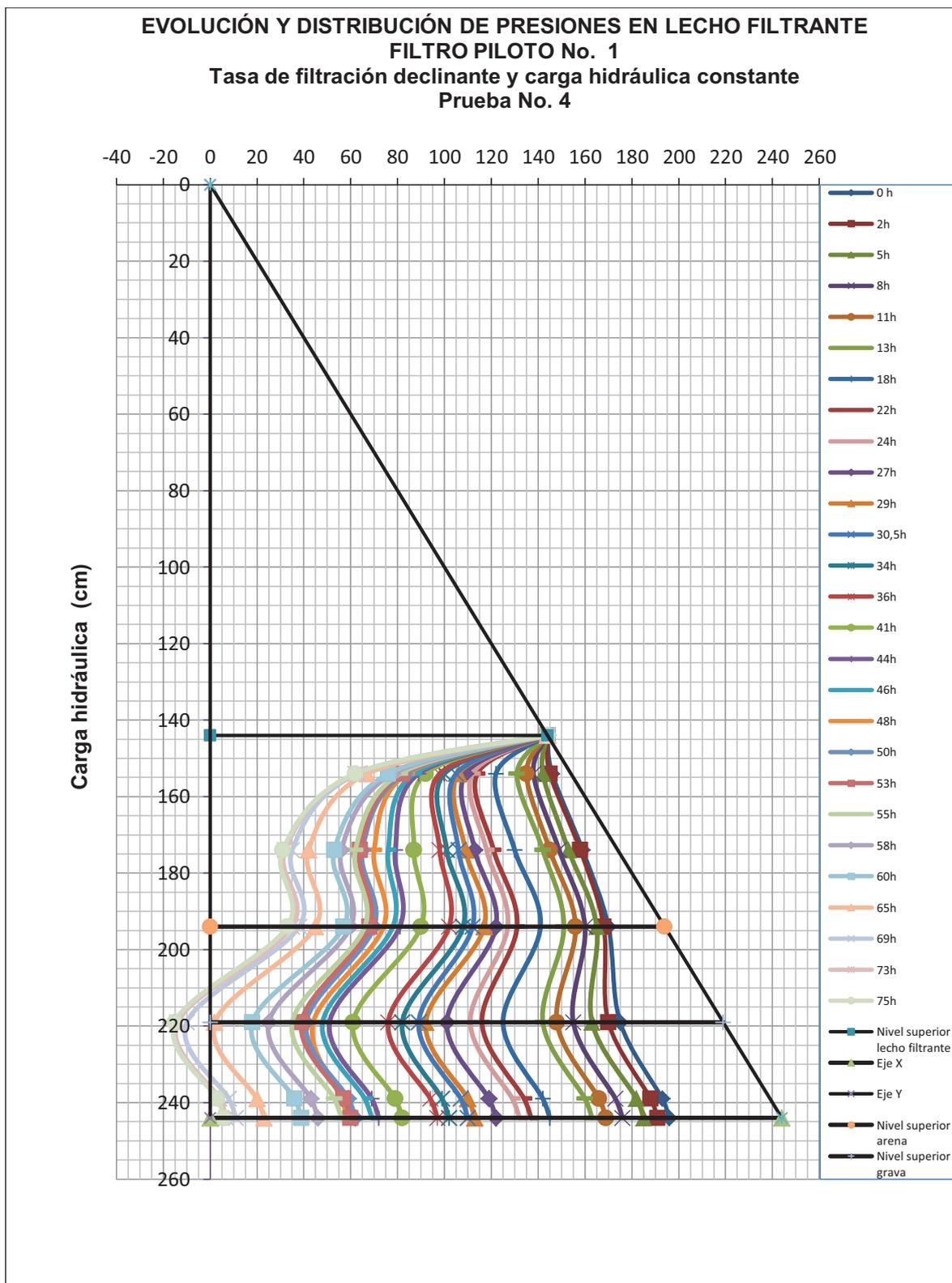
Al igual que en las pruebas anteriores, en el filtro No. 3, se observó una mejor distribución de las pérdidas de carga en las capas del lecho filtrante y llegó a generar pérdidas de carga negativas después de 75 horas de carrera de filtración.

En el filtro piloto No. 1, la duración de la carrera de filtración para llegar a la pérdida de carga máxima disponible de 2,20 m, registró la menor longitud con 65 horas, seguido del filtro No. 2 con 68 horas y filtro No. 3 con 75 horas.

Las condiciones de tasa declinante, durante el ciclo de filtración, se evidencian en el Anexo 3, cuadro No. 19, en el que se registra las pérdidas de carga y tasas de filtración observadas en cada filtro piloto, durante el tiempo de duración de la prueba; los resultados determinan que el filtro No. 3, presenta una tasa de filtración a la terminación de la carga hidráulica disponible (75 horas) de $210 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, el filtro No. 1 de $219 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ a las 65 horas y el filtro No. 3 llega con una tasa de $223 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ a las 68 horas.

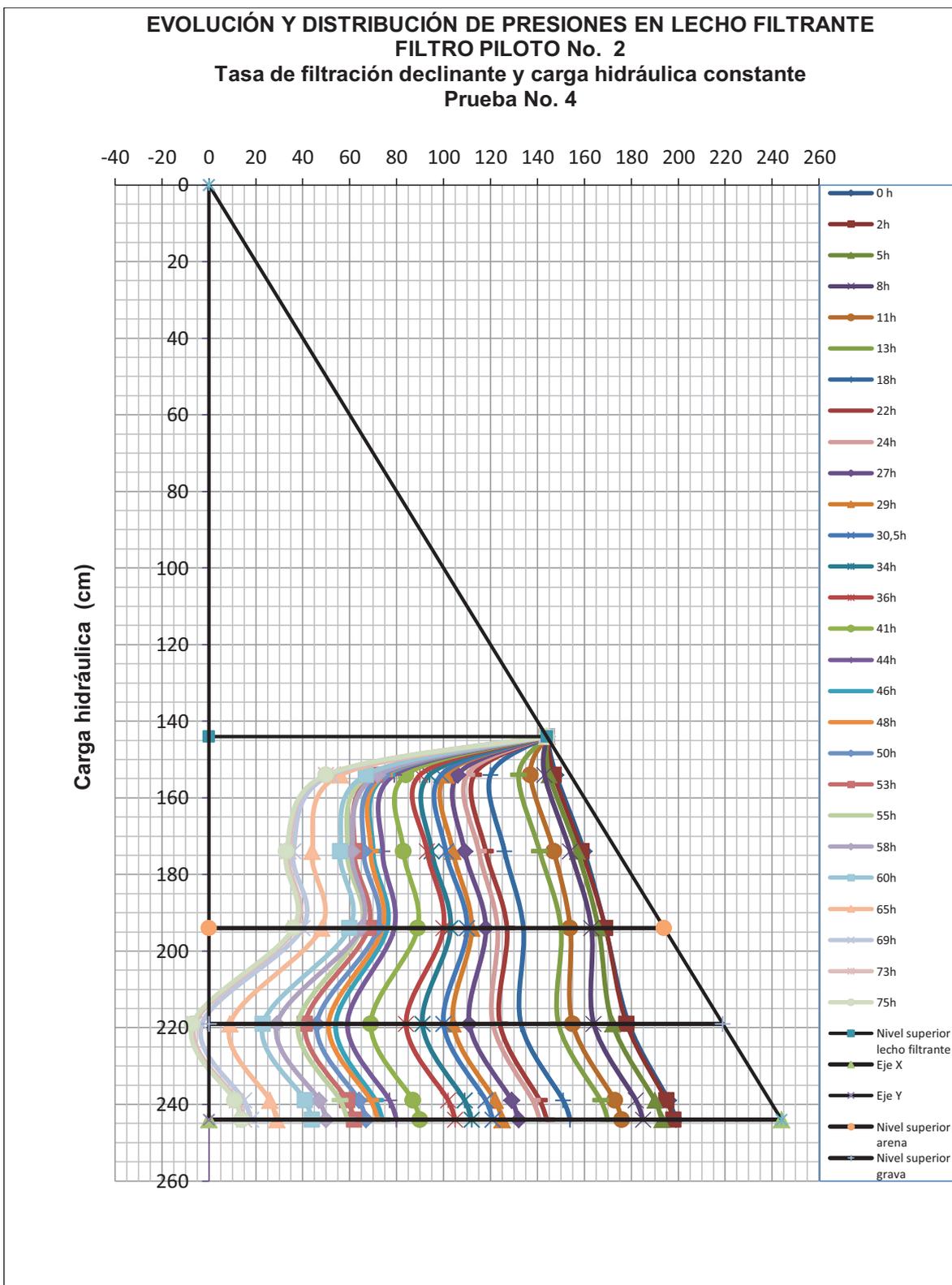
Finalmente, en el Anexo 4, gráfico No. 26, se observan las curvas de pérdida de carga y tasas de filtración Vs. tiempo de carrera de filtración. Conforme progresa la carrera de filtración la tasa declina y las pérdidas de carga se incrementan, manteniendo un comportamiento lineal en el tiempo.

GRÁFICO 7.10



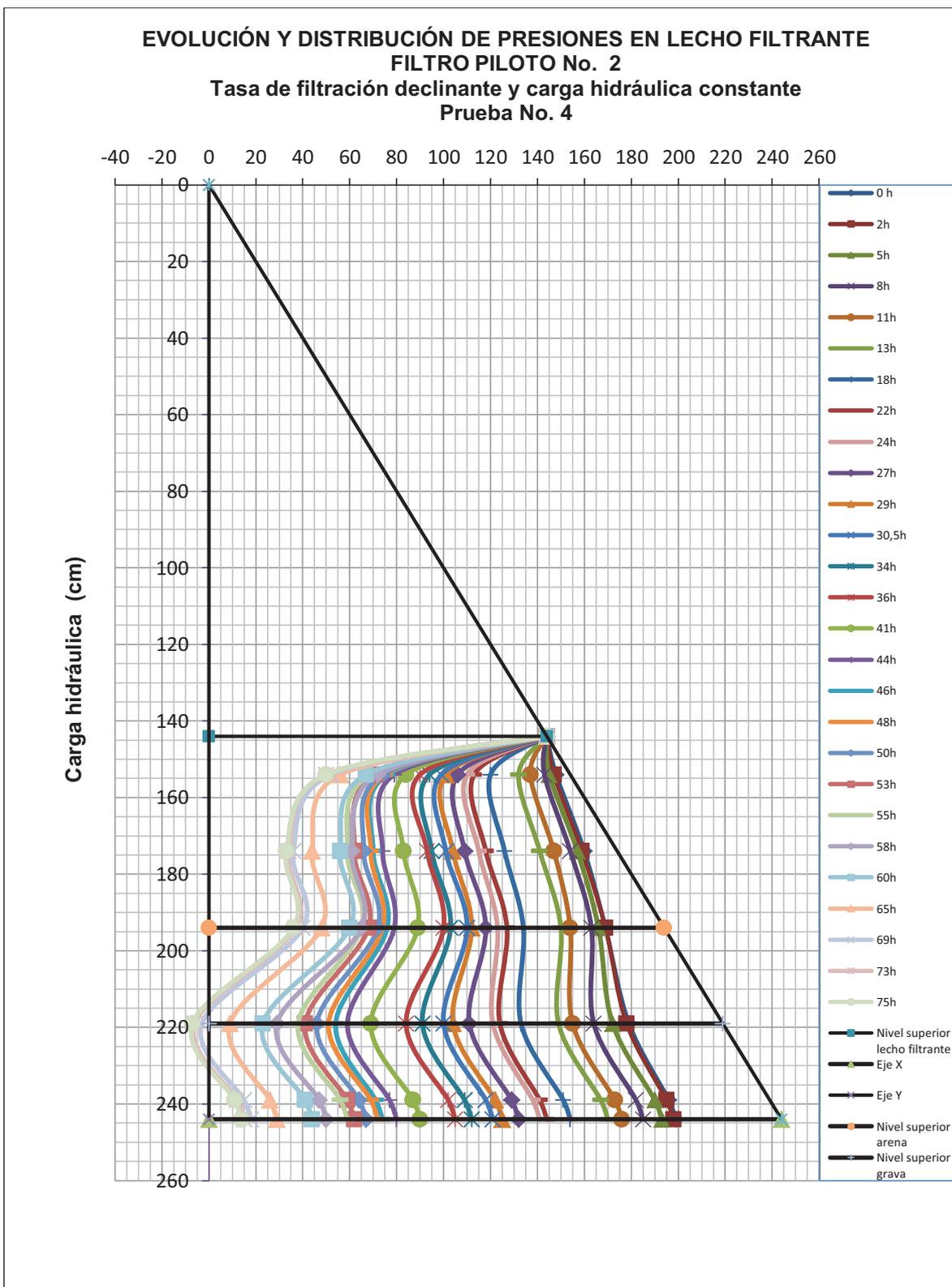
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.11



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO 7.12



Elaborado por: Fernando Ojeda N

7.4 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN PILOTO

Lo ideal en un filtro es que la carrera de filtración llegue a su final al presentarse simultáneamente la pérdida de carga máxima admitida y la turbiedad límite, en todo caso las condiciones más favorables de un lecho filtrante son cuando este presenta una menor evolución de la pérdida de carga, una mayor longitud de carrera de filtración y una calidad satisfactoria del agua filtrada.

Como conclusión de la evaluación de los resultados obtenidos en las cuatro pruebas piloto, podemos decir que los lechos filtrantes de los filtros piloto No. 2 y 3, presentan resultados más favorables y relativamente similares en la evolución de pérdida de carga, longitud de carrera de filtración y una buena calidad en términos de turbiedad en el agua de su efluente. En este sentido, y como conclusión de la investigación piloto, se recomienda que el lecho filtrante adecuado para la PTAP, tenga características granulométricas correspondientes al promedio de las características granulométricas de los dos filtros piloto, tal como se indica, a continuación, en el cuadro 7.11.

CUADRO 7.11

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y ALTURAS RECOMENDADAS PARA LOS MEDIOS FILTRANTES DE LA PTAP

CARACTERÍSTICA	ARENA	ANTRACITA
Diámetro efectivo (mm)	0,50	0,9
Coefficiente de Uniformidad	1,4	Entre 1,50 y 1,55
Tamaño del grano más pequeño (mm)	0,42	0,7
Tamaño del grano más grande (mm)	1,4	2
Altura de la capa (cm)	25	50

Elaborado por: Fernando Ojeda N

La arena y antracita que se recomiendan, de acuerdo a la investigación piloto, permitirían carreras de filtración entre 60 y 65 horas para tasas de filtración de hasta 315 m³/m²/d, para una pérdida de carga total máxima de 2,20 m. y con una calidad satisfactoria del efluente con turbiedades menores a 0,5 NTU, durante al

menos un 80 % del tiempo, para un agua clarificada que en promedio se ubique entre 1,0 y 1,5 NTU.

El coeficiente de uniformidad influye en la duración de la carrera de filtración, así, a menor coeficiente de uniformidad, más uniforme será el material filtrante y más profunda será la retención de impurezas en el lecho filtrante y la carrera de filtración será mayor. Tratándose de lechos dobles, como en el caso de la PTAP, se determina, que tener una antracita con un coeficiente de uniformidad menor a 1,45, no es recomendable, pues dadas las bajas turbiedades del agua clarificada los sólidos suspendidos, que esta contiene, penetrarían más profundamente en la capa de antracita, ocasionando un trabajo de remoción mayor para la capa de arena y el desarrollo de mayores pérdidas de carga al nivel de este material, lo adecuado es permitir que la capa de antracita ejecute un trabajo de remoción lo más intenso y profundo posible pero dejando para la capa de arena únicamente la labor de acabado final de la calidad en términos de turbiedad.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

De la evaluación realizada al sistema de filtración de la PTAP (prototipo) y de los resultados obtenidos en la investigación realizada con filtros piloto, se puede concluir y recomendar, lo siguiente:

La velocidad de filtración promedio en los filtros del prototipo es de 0,31 cm/s, que equivale a una tasa de 254,1 m³/m²/d y a un caudal de filtración de 138,4 l/s/filtro valor obtenido; la tasa de filtración de 254 m³/m²/d, se halla dentro del rango medio recomendado de 180 a 360 m³/m²/d.

La velocidad promedio de lavado obtenida en las pruebas es de 1,18 cm/s o 70,8 cm/min, equivalente a 12,1 l/s/m², valor que se ubica cerca del límite inferior de los rangos recomendado por el CEPIS (1992_c) y la AWWA (1998), pero menor al rango recomendado por Di Bernardo, L. (2002).

Los porcentajes de expansión obtenidos en los lechos filtrantes son bajos y se ubican en el rango del 13,7 % a 18,2 %, y presentan un promedio de 16,4 %, valores inferiores al rango óptimo de expansión del 20% al 25% que recomienda la bibliografía.

Se observaron diferentes valores de expansión dentro de un mismo filtro que pueden explicar y corroborar la presunción de que los fondos falsos se hallan en mal estado, es posible que existan juntas de mortero afectadas o ladrillos Leopold rotos por los cuales el agua de lavado encuentra vías de flujo preferenciales y se esté fugando la arena al tanque de lavado; así como también, puede haber ladrillos Leopold cuyos orificios estén taponados u obstruidos.

Se conoce que la válvula para el caudal de lavado ha sido regulada para un caudal menor a 600 l/s a fin de reducir los esfuerzos hidráulicos (presión) sobre los fondos falsos, aspecto que es congruente con el estado de deterioro de los mismos, dado el tiempo de operación de la PTAP, pero que, de los resultados de expansión de los lechos filtrantes, medidos en la evaluación, tiene su lado negativo en la eficiencia del lavado y en la paulatina acumulación de sedimentos finos que a la larga ocasionarán la formación de bolas de barro en el medio filtrante.

De las curvas de lavado se establece que el tiempo óptimo del retrolavado está en el intervalo de 8 a 9 minutos, sin considerar el tiempo de 5 minutos para el lavado superficial. En virtud que los filtros de la PTAP, tienen 36 años en operación y considerando que los resultados obtenidos de velocidad de lavado y expansión del lecho filtrante son bajos y que por las condiciones de los fondos falsos no sería recomendable incrementar la tasa de lavado actual, se recomienda que en las actuales condiciones el lavado superficial tenga al menos una duración de 12 a 15 minutos, contabilizados o medidos desde el momento en que el agua de lavado desborde por las canaletas de lavado, esto como medida preventiva para evitar la acumulación de lodo en el lecho filtrante y la formación de bolas de barro a futuro.

Considerando el tiempo empleado en el lavado superficial, el tiempo recomendado para un ciclo completo de lavado, sería de 17 a 19 minutos. Esta recomendación, debería implementarse especialmente en la época invernal, donde la presentación de turbiedades altas en el agua clarificada provoca que los filtros de la PTAP, salgan de operación por haber llegado a completarse la pérdida de carga fijada como máxima.

El tamaño efectivo promedio de la antracita de los filtros del prototipo, actualmente, es de 0,55 mm, siendo menor a su rango original de 1 a 1.10 mm. De acuerdo a las recomendaciones técnicas la capa de antracita no debe contener granos más pequeños a 0,7 mm, los resultados de los análisis granulométricos evidencian que entre el 13 % y 23 % del peso acumulado de la

antracita pasa el tamiz No. 25 (0,707 mm), de igual modo se tiene el incremento del coeficiente de uniformidad de su valor original de 1,60 a un valor promedio de 2,98; y la presencia de una fracción alta de granos finos.

La arena de los filtros de la PTAP, ha sufrido una moderada variación con relación a sus características granulométricas originales, así su tamaño efectivo de originalmente 0,45 mm, se ha incrementado a un valor promedio de 0,51 mm; el coeficiente de uniformidad promedio obtenido en el estudio (CU=1,46) es casi similar al de la arena original que tenía un CU = 1,47.

Existe una disminución significativa de la capa de arena, la cual se ha fugado por los fondos falsos. En promedio la pérdida de arena en los filtros de acuerdo a los datos levantados, es de aproximadamente 8 cm en altura y en algunos filtros como los No 1 y 4, se ha llegado a pérdidas de hasta 17 cm

Se encontró que en los filtros del prototipo, en las áreas que no presentan deformaciones de la capa de grava, la altura de la misma es de 27 a 30 cm, lo que indica, que posiblemente, durante el armado de la capa soporte, se modificó la altura del diseño original de 25,5 cm, aspecto del cual no se tiene evidencia escrita o de planos as-build.

Igualmente, se observó que la distribución de la superficie superior de la grava en los filtros no es uniforme, formando ondas que en algunos casos determinan la presencia de tan sólo 5 a 10 cm de grava sobre el fondo falso. Estas alteraciones de los lechos de grava, pudieron ocasionarse por la apertura brusca de las válvulas de retrolavado o fallas en el sistema de control de la apertura.

Otra posible causa para el desarreglo de los lechos de grava es la introducción de aire en el medio filtrante por la presencia de presiones negativas en el interior del filtro lo que provoca la formación de bolsas de aire que se eliminan o salen bruscamente a la superficie durante el lavado. La ocurrencia de esta posible causa, es muy factible de presentación puesto que en la actualidad, y de acuerdo a las instrucciones que siguen los operadores de la PTAP, la máxima pérdida de

carga admitida es de 1,70 m. valor con el que se está llevando a los filtros a desarrollar pérdidas de carga negativas en todas las carreras de filtración, ya que la carga hidráulica asumida como disponible (2,60 m) llega al nivel interior del falso fondo (2983,17 m).

Las fluctuaciones de pérdida de carga en los piezómetros del prototipo, se presentan mayores al 4% para caudales superiores a 170 l/s ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$), lo que permite indicar que caudales o tasas mayores a este valor no son recomendables en las actuales condiciones de los reguladores de caudal, pues la calidad del efluente corre el riesgo de pasar de una calidad en general de “buena” a “mediana”.

Los resultados de la investigación piloto, se analizaron considerando la calidad del agua filtrada, la evolución de las pérdidas de carga y la longitud de las carreras de filtración. Se adoptaron como indicadores para la evaluación y comparación de los resultados a la: turbiedad del efluente de agua filtrada (promedio, máximo y mínimo), duración de la carrera de filtración hasta llegar a la pérdida de carga total de 2,20 metros, valor que corresponde a la carga hidráulica total en el nivel inferior de la capa de arena o llegar a una carrera máxima de filtración de 70 horas, igualmente se consideró el porcentaje de tiempo durante el cual turbiedad del efluente, se presenta por debajo de: 0,25 NTU; 0,5 NTU y 1,0 NTU, y finalmente, la evolución y distribución de la pérdida de carga en el lecho filtrante.

En la prueba piloto No. 1, en la que se aplicó una tasa de filtración de $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ y carga hidráulica disponible constante, semejante a las condiciones operativas actuales de la PTAP de 150 l/s/filtro (operando 15 filtros), los filtros piloto No. 2 y 3, presentaron valores promedio de turbiedad muy similares (0,29 y 0,30 NTU) y ligeramente mayores al filtro 1 (0,27 NTU). Para los tres filtros, el 100% del tiempo de duración de la carrera de filtración, de 72 horas, se obtuvo un efluente menor a 0,5 NTU y la mayor diferencia en su comportamiento, se presentó en la pérdida de carga y por consiguiente en la longitud de la carrera de filtración. Las carreras de filtración proyectadas de acuerdo a la prueba son: Filtro No. 1 = 76 horas; Filtro No.2 = 84 horas y Filtro No.3 = 88 horas.

En la prueba piloto No. 2, en la que se aplicó una tasa de filtración de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ y carga hidráulica disponible constante, se presentó una turbiedad promedio en el afluente (agua clarificada) de 1,59 NTU, con valores picos de hasta 4,82 NTU y valores mínimo de 0,82 NTU, condiciones que en pocas ocasiones se presentan en el agua clarificada de la PTAP, lo que unido a la alta tasa ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$), generó en forma coincidental condiciones extremas de operación, durante la prueba. Las turbiedades promedio del efluente de los filtros piloto No. 1, 2 y 3, fueron: 0,52; 0,55 y 0,58 NTU, respectivamente, indicando una eficiencia muy buena de los lechos filtrantes evaluados. En el mismo orden las carreras de filtración obtenidas fueron de: 51, 58 y 62 horas, para llegar a la pérdida de carga de 2,20 m.

La prueba piloto No. 3, se desarrolló en dos fases que se ejecutaron por igual en los tres filtros piloto y en los filtros No. 7 y 8 del prototipo. En la primera fase se aplicó durante las ocho primeras horas del ciclo de filtrado, una tasa de filtración constante ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) y carga hidráulica disponible constante; en la segunda fase, se disminuyó la tasa de filtración de 315 a $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, que se la mantuvo hasta el final de la carrera de filtración y que equivale a un caudal de filtración de 150 l/s en cada filtro del prototipo; de igual modo se aplicó una carga hidráulica constante. En el efluente de los tres filtros piloto, se obtuvo turbiedades promedio, máximas y mínimas, casi similares; la turbiedad promedio se ubicó entre 0,36 a 0,38 NTU y la presentación de turbiedades menores o iguales a 0,5 NTU, fue entre el 83% y 90% del tiempo de duración de la carrera de filtración de 72 horas.

El parámetro indicador que marca la diferencia en los resultados obtenidos en las pruebas piloto ejecutadas es la pérdida de carga y por consiguiente la duración de la carrera de filtración. Así para la prueba No. 4, se tuvo longitudes de carrera de 58, 63 y 69 horas, para los filtros piloto No. 1, 2 y 3, respectivamente. Obtener carreras de filtración entre 63 a 69 horas, considerando la elevada tasa de filtración y altas turbiedades en el afluente que se tuvieron en la primera fase, operativamente representa un resultado positivo y muy aceptable, además, la calidad promedio del efluente obtenido fue igualmente muy buena.

Los resultados obtenidos en la prueba No.4, para los filtros No. 7 y 8 del prototipo, indican que la turbiedad promedio (0,70 y 0,69 NTU), máxima (2,1 y 2,28 NTU) y mínima (0,3 NTU) de sus efluentes son casi similares entre sí, pero son, entre un 90% y 100% mayores a las turbiedades promedio (0,36 a 0,38 NTU) y mínimas (0,15 a 0,18 NTU) obtenidas en los filtros piloto, y casi un 300% mayores a las turbiedades máximas (0,54 a 0,67 NTU); además, El 75% del tiempo la turbiedad del efluente se mantuvo sobre 0,5 NTU. Los resultados obtenidos en los efluentes del prototipo, evidencian el mal estado de sus lechos filtrantes y el limitado rendimiento en la remoción de turbiedad ante la presentación de turbiedades altas en el afluente. La duración de las carreras de filtración en los filtros 7 y 8 del prototipo fueron de 69 y 57 horas, respectivamente, tiempos en los cuales llegaron a la máxima pérdida de carga fijada en la PTAP.

En la prueba No. 4, se aplicó condiciones operativas de tasa declinante y carga hidráulica disponible constante (nivel constante), tuvo una tasa de arranque de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, que luego fue declinando conforme se desarrolló la carrera de filtración. Las turbiedades promedio obtenidas en el efluente de los tres filtros piloto son similares, entre 0,29 y 0,31 NTU; se obtuvo turbiedades menores a 0,5 NTU durante el 95% del tiempo de duración de la carrera de filtración. En el filtro piloto No. 1, la duración de la carrera de filtración para llegar a la pérdida de carga total de 2,20 m, registró la menor longitud con 65 horas, seguido del filtro No. 2 con 68 horas y filtro No. 3 con 75 horas.

En las pruebas piloto, se observó que el lecho filtrante del filtro piloto No. 3, y el del filtro No.2, presentaron en orden de prelación, una mejor distribución de las pérdidas de carga en relación al filtro No.1 que presentó mayores pérdidas de carga en la capa de arena, aspecto congruente ya que este filtro tiene el menor coeficiente de uniformidad ($\text{CU}=1,3$) y se manifiesta una filtración con acción de profundidad elevada.

Como conclusión de la investigación piloto, se tiene que los lechos filtrantes de los filtros piloto No. 2 y 3, presentan resultados más favorables y relativamente bastante similares en la evolución de pérdida de carga, longitud de carrera de

filtración y una buena calidad en términos de turbiedad en el agua de su efluente.

En este sentido, se concluye y recomienda que el lecho filtrante adecuado para la PTAP, tenga características granulométricas correspondientes al promedio de las características de los lechos de los dos filtros piloto las cuales se dan en el cuadro 7.11.

8.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda el mantenimiento total de los controladores de caudal de la salida de filtros y una amplia evaluación mecánica de su funcionamiento que permita establecer las alternativas de repararlos o de reemplazarlos con controladores nuevos lo que permitiría operar los filtros a caudales mayores a 150 l/s, sin el riesgo de deterioro de la calidad del efluente.

Se recomienda la apertura lenta de las válvulas de entrada del agua de retrolavado, y la revisión de sus tiempos de apertura a fin de permitir un intervalo adecuado de tiempo entre el inicio y fin de la apertura, acción que se recomienda en resguardo de las capa soporte y lechos filtrantes.

Se recomienda la reubicación de las regletas de los piezómetros, ya que los piezómetros actualmente instalados en la PTAP y en los que se mide las pérdidas de carga, tienen el referencial “cero” de sus regletas, ubicados en la cota 2984,70 m, presentando una diferencia de 90 cm. en defecto con relación al nivel de operación normal de los filtros (2985,60 m).

Actualmente y de acuerdo a las instrucciones de operación de los filtros de la PTAP la máxima pérdida de carga admitida es de 1,70 m. con este valor se está llevando a los filtros a desarrollar pérdidas de carga negativas, como ya se indicó, la carga hidráulica asumida como disponible (2,60 m) llega al nivel interior del falso fondo (2983,17 m). En todo caso, de mantenerse la actual ubicación de las regletas, se recomienda que la instrucción operativa que indica que la máxima pérdida de carga es de 1,70 m. se cambie a 1,50 m.

Es necesario el cambio de los fondos falsos tipo Leopold ya que los hallazgos de la evaluación evidencian su grave deterioro y los consecutivos esfuerzos y presiones a los que han sido y son sometidos desde que entraron en operación deben haber generado el agotamiento del mortero, uniones y anclajes.

Dado que la eficiencia de la filtración depende sobremanera de la eficiencia de los procesos previos como la coagulación, floculación y filtración, se recomienda asegurar una adecuada calidad de agua a la salida de los clarificadores a fin de garantizar y facilitar que los filtros tengan condiciones óptimas operativas que determinen carreras de filtración adecuadas y brinden una calidad de efluente satisfactoria. En este sentido previo o paralelamente a las acciones futuras para el reemplazo de los lechos filtrantes, se deben ejecutar acciones que garanticen que la calidad del afluente a los filtros tenga condiciones de turbiedad, en lo posible menores a 1 NTU, lo que facilitará la labor de acabado final de los mismos.

Tratándose de filtros de lechos dobles, como en el caso de la PTAP, se recomienda que la antracita, tenga un coeficiente de uniformidad entre 1,5 y 1,55; a fin de evitar que los sólidos suspendidos que contiene el agua clarificada, que presenta bajas turbiedades, penetren muy profundamente en la capa de antracita y lleguen a pasar a la arena, ocasionando un trabajo de remoción mayor para la capa de arena y el desarrollo de mayores pérdidas de carga al nivel de este material, lo adecuado es permitir que la capa de antracita ejecute un trabajo de remoción lo más intenso y profundo posible que permita a la capa de arena, únicamente la labor de acabado final de la calidad en términos de turbiedad.

Recomendar que para el cambio de los lechos filtrantes, se consideren, las siguientes características:

- a) Arena: CU = 0,50 y Tamaño efectivo = 1,4
- b) Antracita: CU = 1,50 a 1,55 y Tamaño efectivo = 0,9

Características que de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación piloto, permitirían, obtener:

- a) Con tasas de filtración de $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, considerando una pérdida de carga máxima de 2,20 m y una turbiedad promedio de 1,0 NTU para el afluente, obtener carreras de filtración con longitudes de alrededor de 80 horas y una calidad promedio en el efluente de 0,35 NTU.

- b) Con tasas de filtración de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, considerando una pérdida de carga máxima de 2,20 m. y una turbiedad promedio en el afluente de 1,5 NTU, obtener carreras de filtración de alrededor de 55 horas y una turbiedad promedio de 0,6 NTU en el efluente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Water Works Association (AWWA). (1999). Water Quality and Treatment. New York, NY: McGraw-Hill.

American Water Works Association (AWWA)., y American Society of Civil Engineers. (1998). Water Treatment Plant Design. New York, NY: McGraw-Hill.

American Water Works Association (AWWA). (2002). Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Suministros de Agua Comunitaria. McGraw-Hill.

Arboleda, Jorge. (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Bogotá: McGraw-Hill

Arboleda, J. Investigación de Medios Filtrantes Para la Futura Planta de Tratamiento del Acueducto de Bucaramanga.

Arboleda, J. (1970). Filtración en Medios Mezclados en la Futura Planta de Tratamiento de Agua de Cúcuta. Colombia. Evaluación de resultados.

Carbonífera CRICIUMA S.A. Tópicos Importantes Sobre Filtração Rápida Descendente Aplicada ao Tratamento de Água Potável.
www.carbocri.com.br/site/doc/carbotrat/TopicosImportantesSobreFiltracao.pdf

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS. (1992_a). Manual III: Teoría, Tomo III: Filtración.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS. (1992_b). Manual IV: Evaluación. Tomo III: Centro Procesos-Tecnología Convencional.

Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS. (1992_c). Manual V: Criterios de Diseño. Tomo III: Criterios de Diseño para Filtros.

Chinniat, Karu. (2006). Standards and Guidelines for Municipal Waterworks, Wastewater and Storm Drainage Systems. Alberta. <http://www.gov.ab.ca/qp>

Department of Environmental Protection Florida. (2004). Compliance Manual for Subpart H Systems Water. Florida.

Degrémont. (1991). Water Treatment and Book. Paris: Degrémont

Di Bernardo, L. (2002). Small Community Water Supplies – Technology, People and Partnership: 17 Rapid Filtration. The Netherland IRC. International Water and Sanitation Centre.

Environmental Protection Agency, EPA. (1995). Water Treatment Manuals: Filtration. Ireland

Environmental Protection Agency, EPA. (2004). Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule Turbidity Provisions Technical Guidance Manual.

Gordon, G. Conceptos Modernos en Filtración del Agua. Ohio, EEUU.

Great Lakes – Upper Mississippi River Board of State and Provincial Public Health and Environmental Managers. (2012). Recommended Standards for Water Works. Health Education Services Division.

Hach Company., & Engelhardt, T. (2011). Granular Media Filtration for Water Treatment Applications.

Kawamura, S. (1991). Integrated Design of water Treatment Facilities. New York: John Wiley and Sons.

Leopold Company Inc. (1999). Falso fondo Leopold. Catalogo Técnico

Pires, Nadia. (2009). Avaliacao do Tipo de Material Filtrante no Comportamento Hidraulico de Filtros Rapidos de Camada Profunda no Tratamento de Aguas de Abastecimiento. Sao Paulo.

Ríos, D., Manion, I., Pintos, M., Azuris, K y Alberto Michelena. (2006). Determinación de los Parámetros de Diseño de una Batería de Filtración de Tasa Declinante. Para un Caudal de 10.000 m³/h. Mediante Estudios realizados en Planta de Filtros Piloto. Uruguay.

Romero, J.L. (1995). Acuipurificación: Diseño de Sistemas de Purificación de aguas. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

South Carolina Department of Health and Environmental Control. (2003). Filter Assessment Manual. Bureau of Water.

TU-Delf Open Course Ware. (2004). Water Treatment: Granular Filtration.
<http://cookie.tudelft.nl/index.php?action=verify&origin=http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/DrinkingWaterTreatment1/res00067/embedded/!46492046696c747261746966f6e32303037.pdf>

ANEXOS

ANEXO No. 1
CALIDAD DE AGUA

CUADRO No. 1
CALIDAD DE AGUA: CRUDA, CLARIFICADA Y FILTRADA, AÑO 2011

MES	pH		TURBIEDAD (NTU)		COLOR (APHA)				
	CRUDA	CLARIFICADA	TRATADA	CRUDA	CLARIFICADA	TRATADA			
Enero	7,86	7,07	6,92	6,3	0,9	0,8	34	7	1
Febrero	8,01	7,17	7,10	8,7	1,1	0,6	63	5	1
Marzo	7,90	7,24	7,06	14,5	1,0	0,5	84	10	2
Abril	8,00	7,03	7,02	8,0	2,6	0,7	54	13	3
Mayo	8,32	7,28	7,21	8,7	1,0	0,7	43	6	2
Junio	7,96	7,20	7,12	9,0	0,8	0,3	49	14	0
Julio	8,24	7,24	7,21	8,8	0,9	0,4	44	6	2
Agosto	7,9	7,4	7,3	6,3	0,5	0,3	33,8	7,5	0
Septiembre	7,83	7,13	7,01	5,6	0,9	0,5	43	8	2
Octubre	8,18	7,32	7,26	7,3	0,8	0,4	38	6	1
Noviembre	7,81	7,22	7,21	11,0	0,9	0,5	60	5	2
Diciembre	7,81	7,11	6,99	9,2	1,6	0,6	54	11	3
PROMEDIO	7,98	7,20	7,11	8,61	1,07	0,52	50	8	2

MES	TEMPERATURA		ALCALINIDAD (mg/l)		COLIFORMES FECALES (UFC/100ml)				
	CRUDA	CLARIFICADA	TRATADA	CRUDA	CLARIFICADA	TRATADA			
Enero	16,0	16,0	16,0	56	36	34	37	0	<1.1
Febrero	13,4	13,5	12,7	76	57	55	46	0	0
Marzo	12,8	12,8	12,8	67	47	46	117	0	0
Abril	13,5	13,4	13,4	58	42	36	90	0	0
Mayo	17,7	17,7	17,7	69	50	51	77	0	0
Junio	11,2	10,6	11,9	59	40	40	181	0	0
Julio	18,2	18,0	18,1	69	50	48	78	<1.1	<1.1
Agosto	14,7	15,2	13,8	71	50	46	29,5	<1.1	<1.1
Septiembre	18,1	18,1	18,2	60	40	38	17	<1.1	<1.1
Octubre	14,6	14,5	14,7	80	62	60	32	0	0
Noviembre	12,1	13,4	13,2	64	48	48	75	0	0
Diciembre	12,4	13,4	13,0	44	42	42	63	0	0
PROMEDIO	14,6	14,7	14,6	64	47	45	70	0	0

Elaborado por: Fernando Ojeda N

ANEXO No. 2
CUADROS Y GRÁFICOS DE FASE DE EVALUACIÓN

CUADRO No. 2**PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 1**

FILTRO N° 01 - IZQUIERDO					FILTRO N° 01 - DERECHO				
Caudalímetro		Ascenso de nivel			Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0,00
0,5	515	15	12,64	1,19	0,5		15	12,66	1,18
1	515	30	25,47	1,18	1		30	25,57	1,17
4	515	45	37,9	1,19	4		45	38,08	1,18
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,18	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,18
Volumen lavado superficial (m ³)				8	prueba				7
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				346	Volumen retrolavado (m ³)				345
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				600
Caudal determinado por totalizador (l/s)				576,7	Caudal determinado por totalizador (l/s)				575,0
Caudal determinado en la prueba (l/s)				557,1	Caudal determinado en la prueba (l/s)				555,2
Porcentaje de error del totalizador				-3,4	Porcentaje de error del totalizador				-3,5
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				7,4	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				7,3
Pérdida de carga (cm)				180	Pérdida de carga (cm)				145
Carrera de Filtración (horas)				71	Carrera de Filtración (horas)				71
Fecha de ejecución				20/10/2012	Fecha de ejecución				20/10/2012

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 3**PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 2**

FILTRO N° 02 - IZQUIERDO					FILTRO N° 02 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	499	0	0	0,00	1	515	0	0	0,00
2	499	15	12	1,25	2	495	15	11,5	1,30
3	515	30	24	1,25	3	499	30	23	1,30
4	515	45	34	1,32	4	515	45	36	1,25
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,27	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,29
Volumen lavado superficial (m ³)				6	Volumen lavado superficial (m ³)				6
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				299	Volumen retrolavado (m ³)				285
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				560
Caudal determinado por totalizador (l/s)				498,3	Caudal determinado por totalizador (l/s)				508,9
Caudal determinado en la prueba (l/s)				599,7	Caudal determinado en la prueba (l/s)				605,2
Porcentaje de error del totalizador (%)				20,3	Porcentaje de error del totalizador				18,9
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				6,4	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				6,1
Pérdida de carga (cm)				160	Pérdida de carga (cm)				125
Carrera de Filtración (horas)				48	Carrera de Filtración (horas)				48
Fecha de ejecución				16/09/2012	Fecha de ejecución				16/09/2012

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 4 PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 3

FILTRO N° 03 - IZQUIERDO					FILTRO N° 03 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	483	0	0	0,00	1	483	0	0	0,00
2	515	15	11	1,05	2	499	13	15,45	0,84
3	515	30	23	1,30	3	499	27	32,3	0,84
4	515	45	34	1,32	4	515	39	44,5	0,88
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,23	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				0,85
Volumen lavado superficial (m ³)				6	Volumen lavado superficial (m ³)				5
Área de filtro (m ²)				47,05	Área de filtro (m ²)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				326	Volumen retrolavado (m ³)				295
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				780
Caudal determinado por totalizador (l/s)				543,3	Caudal determinado por totalizador (l/s)				378,2
Caudal determinado en la prueba (l/s)				576,8	Caudal determinado en la prueba (l/s)				400,5
Porcentaje de error del totalizador				6,2	Porcentaje de error del totalizador				5,9
Volumen lavado/Área filtro (m ³ /m ²)				6,9	Volumen lavado/Área filtro (m ³ /m ²)				6,3
Pérdida de carga (cm)				150	Pérdida de carga (cm)				130
Carrera de Filtración (horas)				67	Carrera de Filtración (horas)				67
Fecha de ejecución				2012-10-27	Fecha de ejecución				2012-10-27

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 5 PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 4

FILTRO N° 04 - IZQUIERDO					FILTRO N° 04 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	499	0	0	0,00	1	515	0	0	0,00
2	515	15	12	1,25	2	499	15	11,5	1,30
3	515	30	23,5	1,28	3	499	30	24	1,25
4	515	45	37	1,22	4	515	45	36	1,25
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,25	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,27
Volumen lavado superficial (m ³)				4	Volumen lavado superficial (m ³)				4
Área de filtro (m ²)				47,05	Área de filtro (m ²)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				314	Volumen retrolavado (m ³)				320
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				600
Caudal determinado por totalizador (l/s)				523,3	Caudal determinado por totalizador (l/s)				533,3
Caudal determinado en la prueba (l/s)				587,0	Caudal determinado en la prueba (l/s)				596,6
Porcentaje de error del totalizador				12,2	Porcentaje de error del totalizador				11,9
Volumen lavado/Área filtro (m ³ /m ²)				6,7	Volumen lavado/Área filtro (m ³ /m ²)				6,8
Pérdida de carga (cm)				180	Pérdida de carga (cm)				170
Carrera de Filtración (horas)				54	Carrera de Filtración (horas)				54
Fecha de ejecución				9/29/2012	Fecha de ejecución				9/29/2012

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 6

PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 5

Elaborado por: Fernando Ojeda N

FILTRO N° 05 - IZQUIERDO					FILTRO N° 05 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	483	0	0	0,00	1	483	0	0	0,00
2	515	15	12	1,25	2	499	15	11,5	1,30
3	515	30	24	1,25	3	499	30	24	1,25
4	515	45	36	1,25	4	515	45	36	1,25
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,25	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,27
Volumen lavado superficial (m ³)				5	Volumen lavado superficial (m ³)				5
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				331	Volumen retrolavado (m ³)				332
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				600
Caudal determinado por totalizador (l/s)				551,7	Caudal determinado por totalizador (l/s)				553,3
Caudal determinado en la prueba (l/s)				588,1	Caudal determinado en la prueba (l/s)				596,6
Porcentaje de error del totalizador				6,6	Porcentaje de error del totalizador				7,8
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				7,0	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				7,1
Pérdida de carga (cm)				130	Pérdida de carga (cm)				160
Carrera de Filtración (horas)				70	Carrera de Filtración (horas)				70
Fecha de ejecución				2012-10-13	Fecha de ejecución				2012-10-13

CUADRO No. 7

PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 6

FILTRO N° 6 - IZQUIERDO					FILTRO N° 6 - DERECHO (FUERA DE OPERACIÓN)				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	483	0	0	0,00					
2	515	15	12,3	1,22					
3	515	30	24,76	1,21					
4	515	45	38,5	1,17					
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,20	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				
Volumen lavado superficial (m ³)				6	Volumen lavado superficial (m ³)				
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				
Volumen retrolavado (m ³)				323	Volumen retrolavado (m ³)				
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				
Caudal determinado por totalizador (l/s)				538,3	Caudal determinado por totalizador (l/s)				
Caudal determinado en la prueba (l/s)				564,6	Caudal determinado en la prueba (l/s)				
Porcentaje de error del totalizador				4,9	Porcentaje de error del totalizador				
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				6,9	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				
Pérdida de carga (cm)				1,7	Pérdida de carga (cm)				
Carrera de Filtración (horas)				69	Carrera de Filtración (horas)				
Fecha de ejecución					Fecha de ejecución				

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 8**PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 7**

FILTRO N° 7 - IZQUIERDO					FILTRO N° 7 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	483	0	0	0,00	1	483	0	0	0,00
2	515	15	12	1,25	2	499	15	12,3	1,22
3	515	30	25	1,20	3	499	30	24,6	1,22
4	515	45	37	1,22	4	515	45	36,4	1,24
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,22	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,23
Volumen lavado superficial (m ³)				6	Volumen lavado superficial (m ³)				7
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				323	Volumen retrolavado (m ³)				324
Tiempo de retrolavado (s)				600	Tiempo de retrolavado (s)				600
Caudal determinado por totalizador (l/s)				538,3	Caudal determinado por totalizador (l/s)				540,0
Caudal determinado en la prueba (l/s)				575,0	Caudal determinado en la prueba (l/s)				576,4
Porcentaje de error del totalizador				6,8	Porcentaje de error del totalizador				6,7
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				6,9	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				6,9
Pérdida de carga (cm)				160	Pérdida de carga (cm)				170
Carrera de Filtración (horas)				71	Carrera de Filtración (horas)				71
Fecha de ejecución				2012-09-15	Fecha de ejecución				2012-09-15

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 9**PRUEBA DE VELOCIDAD Y CAUDAL DE LAVADO FILTRO 8**

FILTRO N° 8 - IZQUIERDO					FILTRO N° 8 - DERECHO				
Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel			Lecturas Caudalímetro		Ascenso de nivel		
t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)	t (min)	Caudal (l/s)	h (cm)	t (seg)	V _L (cm/s)
1	515	0	0	0,00	1	515	0	0	0,00
2	499	15	12	1,25	2	515	15	12,32	1,22
3	499	30	24	1,25	3	499	30	24,71	1,21
4	499	45	36	1,25	4	515	45	36	1,25
5	499				5	515			
Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,25	Velocidad promedio de lavado (cm/s)				1,23
Volumen lavado superficial (m ³)				6	Volumen lavado superficial (m ³)				5
Área de filtro (m2)				47,05	Área de filtro (m2)				47,05
Volumen retrolavado (m ³)				390	Volumen retrolavado (m ³)				395
Tiempo de retrolavado (s)				780	Tiempo de retrolavado (s)				780
Caudal determinado por totalizador (l/s)				500,0	Caudal determinado por totalizador (l/s)				506,4
Caudal determinado en la prueba (l/s)				588,1	Caudal determinado en la prueba (l/s)				577,4
Porcentaje de error del totalizador (%)				17,6	Porcentaje de error del totalizador				14,0
Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				8,3	Volumen lavado/Área filtro (m3/m2)				8,4
Pérdida de carga (cm)				1,8	Pérdida de carga (cm)				1,40
Carrera de Filtración (horas)				69	Carrera de Filtración (horas)				69
Fecha de ejecución				22/09/2012	Fecha de ejecución				22/09/2012

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 10
EXPANSIÓN DE LECHOS FILTRANTES: 1, 2, 3 y 4

PUNTO DE MUESTREO	FILTRO No 1		FILTRO No 2		FILTRO No 3		FILTRO No 4	
	IZQUIERDO	(%)	IZQUIERDO	(%)	DERECHO	(%)	IZQUIERDO	(%)
	Exp. (cm)		Exp. (cm)		Exp. (cm)		Exp. (cm)	
1	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
2	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
3	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
4	10,00	16,95	5,00	7,69	10,00	13,70	10,00	16,67
5	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
6	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
7	10,00	16,95	10,00	15,38	10,00	13,70	10,00	16,67
% Promedio								
h.antracita + arena = cm	59		65		73		60	

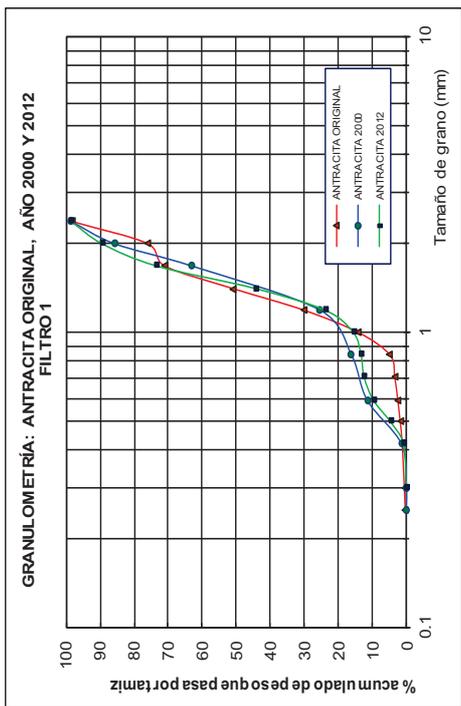
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 11
EXPANSIÓN DE LECHOS FILTRANTES: 5, 6, 7 y 8

PUNTO DE MUESTREO	FILTRO No 5		FILTRO No 6		FILTRO No 7		FILTRO No 8	
	IZQUIERDO	(%)	IZQUIERDO	(%)	IZQUIERDO	(%)	DERECHO	(%)
	Exp. (cm)		Exp. (cm)		Exp. (cm)		Exp. (cm)	
1	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
2	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
3	10,00	17,86	10,00	18,18	5,00	8,47	10,00	18,18
4	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
5	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
6	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
7	10,00	17,86	10,00	18,18	10,00	16,95	10,00	18,18
% Promedio								
h.antracita + arena = cm	56		55		59		55	

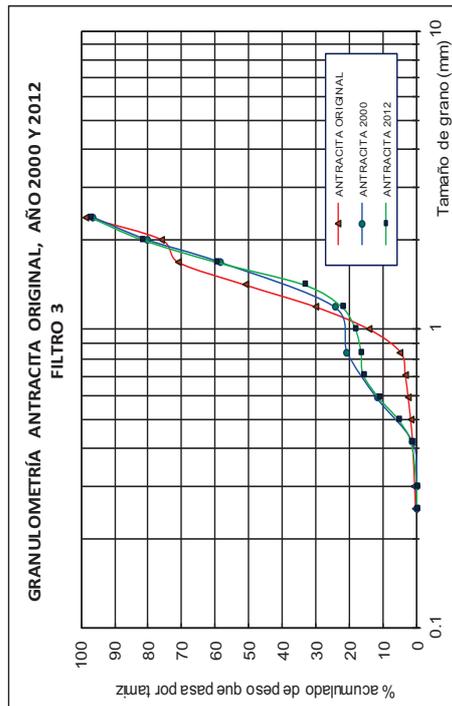
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 1



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 2



Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 12
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 1

TAMIZ	FILTRO No 1						ANTRACITA 2012		ANTRACITA 2000		ANTRACITA ORIGINAL	
	ABERTURA (mm)	Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	%pasa acumul.	Peso retenido	% retenido	% retenido	% reten Acumul.	%pasa acumul.	%reten acumulado	%pasa acumul.
# 8	2.38	3.55	1.43	1.43	98.57	2.87	1.39	1.39	1.39	98.61	1.60	98.40
#10	2	22.49	9.09	10.52	89.48006	26.47	12.84	14.23	14.23	85.77	22.40	76.00
#12	1.68	39.91	16.12	26.64	73.35676	46.90	22.74	36.97	36.97	63.03	5.00	29.00
#14	1.41	71.72	28.97	55.62	44.38		0.00	36.97	74.72	25.28	20.00	49.00
#16	1.19	50.93	20.58	76.19	23.81	77.85	37.75	74.72	74.72	25.28	21.00	70.00
#18	1	20.42	8.25	84.44	15.56	18.91	9.17	83.90	83.90	16.10	16.00	86.00
#20	0.84	5.58	2.25	86.70	13.30		0.00	83.90	83.90	16.10	9.20	95.20
#25	0.707	2.19	0.88	87.58	12.42		0.00	83.90	83.90	16.10	1.40	96.60
#30	0.59	6.83	2.76	90.34	9.66	9.55	4.63	88.53	11.47	11.47	0.90	97.50
#35	0.50	12.23	4.94	95.28	4.72		0.00	88.53	88.53	11.47	0.70	98.20
#40	0.42	9.57	3.87	99.15	0.85	20.75	10.06	98.59	1.41	1.41	0.60	98.80
#50	0.3	2.11	0.85	100.00	0.00	2.91	1.41	100.00	0.00	0.00	0.60	99.40
#60	0.25		0.00	100.00	0.00		0.00	100.00	0.00	0.00	0.28	99.68
Sobranite			0.00	100.00	0.00		0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	99.68
Total		247.53	100			206.21	100.00				99.68	

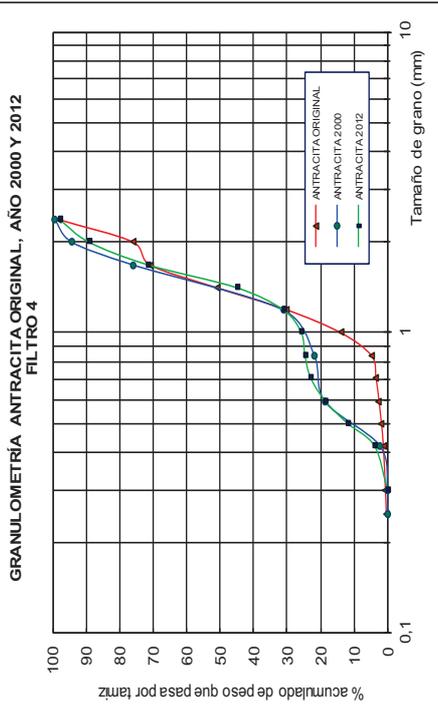
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 13
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 3

TAMIZ	FILTRO No 3						ANTRACITA 2012		ANTRACITA 2000		ANTRACITA ORIGINAL	
	ABERTURA (mm)	Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	%pasa acumul.	Peso retenido	% retenido	% retenido	% reten Acumul.	%pasa acumul.	%reten acumulado	%pasa acumul.
# 8	2.38	6.55	2.61	2.61	97.38732	10.76	3.56	3.56	3.56	96.44	1.60	98.40
#10	2	38.9	15.52	18.13	81.87076	48.77	16.14	19.70	19.70	80.30	22.40	76.00
#12	1.68	55.69	22.21	40.34	59.65696	66.02	21.85	41.54	41.54	58.46	5.00	29.00
#14	1.41	65.82	26.25	66.60	33.40		0.00	41.54	41.54	20.00	20.00	49.00
#16	1.19	27.88	11.12	77.72	22.28	102.92	34.05	75.60	75.60	24.40	21.00	70.00
#18	1	10.23	4.08	81.80	18.20		0.00	75.60	75.60	14.00	16.00	86.00
#20	0.84	4.1	1.64	83.43	16.57	11.18	3.70	79.30	79.30	20.70	9.20	95.20
#25	0.707	1.55	0.62	84.05	15.95		0.00	79.30	79.30	1.40	1.40	96.60
#30	0.59	11.83	4.72	88.77	11.23	26.78	8.86	88.16	88.16	11.84	0.90	97.50
#35	0.50	14.34	5.72	94.49	5.51		0.00	88.16	88.16	1.18	0.70	98.20
#40	0.42	9.57	3.82	98.31	1.69	32.21	10.66	98.82	1.18	1.18	0.60	98.80
#50	0.3	4.24	1.69	100.00	0.00	3.58	1.18	100.00	0.00	0.00	0.60	99.40
#60	0.25		0.00	100.00	0.00		0.00	100.00	0.00	0.00	0.28	99.68
Sobranite			0.00	100.00	0.00		0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	99.68
Total		250.7	100			302.22	100.00				99.68	

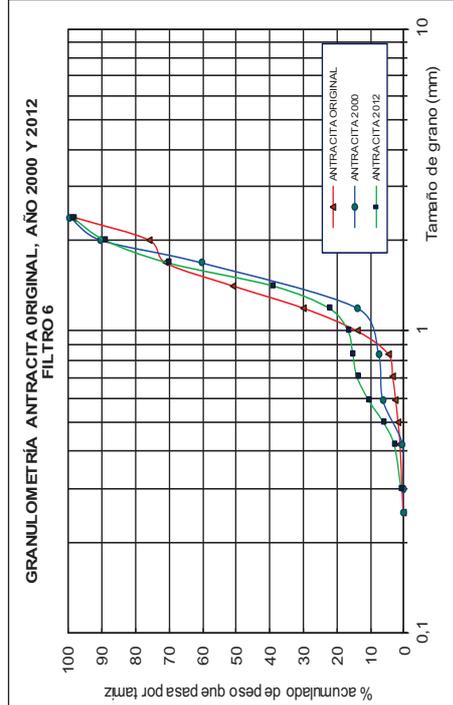
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No.3



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 4



Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 14
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 4

TAMZ	ABERTURA (mm)	FILTRO No 4				ANTRACITA ORIGINAL			
		ANTRACITA 2012		ANTRACITA 2000		ANTRACITA ORIGINAL		ANTRACITA ORIGINAL	
		Peso retenido	% retenido	%reten Acumul.	%pasa acum.	Peso retenido	% retenido	%reten Acumul.	%pasa acum.
# 8	2.38	4.28	1.93	98.07	1.65	0.55	99.45	1.60	98.40
#10	2	19.67	8.87	89.20	15.32	5.11	5.66	22.40	76.00
# 12	1.68	39.22	17.68	71.52	54.82	18.29	23.95	5.00	71.00
# 14	1.41	58.89	26.55	44.96	0.00	0.00	23.95	20.00	51.00
# 16	1.19	30.75	13.87	68.90	134.51	44.87	68.82	21.00	30.00
# 18	1	11.84	5.34	74.24	0.00	0.00	68.82	16.00	14.00
# 20	0.84	2.42	1.09	75.33	27.95	9.32	78.14	9.20	4.80
# 25	0.707	3.82	1.72	77.06	0.00	0.00	78.14	1.40	3.40
# 30	0.59	9.97	4.50	81.55	9.51	3.17	81.31	0.90	2.50
# 35	0.50	14.35	6.47	88.02	0.00	0.00	81.31	0.70	1.80
# 40	0.42	18	8.12	96.14	49.37	16.47	97.78	0.60	0.60
# 50	0.3	8.56	3.86	100.00	6.64	2.22	100.00	0.60	0.60
# 60	0.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.28	0.32
Sobranite		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
Total		221.77	100		299.77	100.00		99.68	

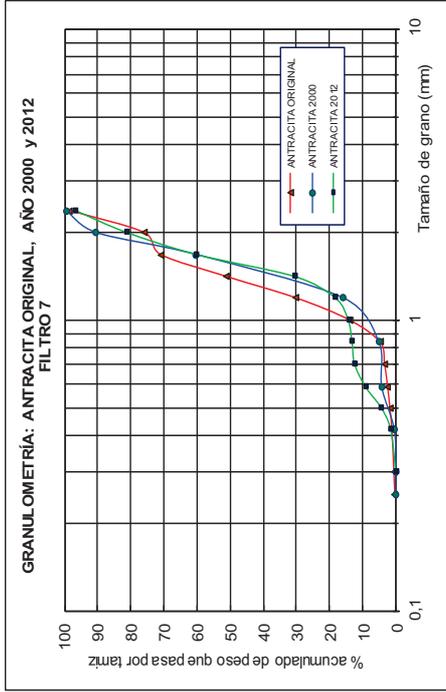
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 15
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 6

TAMZ	ABERTURA (mm)	FILTRO No. 6				ANTRACITA ORIGINAL			
		ANTRACITA 2012		ANTRACITA 2000		ANTRACITA ORIGINAL		ANTRACITA ORIGINAL	
		Peso retenido	% retenido	%reten Acumul.	%pasa acum.	Peso retenido	% retenido	%reten Acumul.	%pasa acum.
# 8	2.38	2.9	1.10	98.90	0.88	0.43	99.57	1.60	98.40
#10	2	25.49	9.69	10.79	18.63	9.11	9.54	22.40	76.00
# 12	1.68	49.85	18.95	29.74	61.82	30.23	39.77	5.00	71.00
#14	1.41	81.96	31.16	60.90	0.00	0.00	39.77	20.00	51.00
# 16	1.19	43.95	16.71	77.60	94.62	46.26	86.03	21.00	30.00
# 18	1	14.92	5.67	83.27	0.00	0.00	86.03	16.00	14.00
# 20	0.84	3.76	1.43	84.70	13.02	6.37	92.40	9.20	4.80
# 25	0.707	3.2	1.22	85.92	0.00	0.00	92.40	1.40	3.40
# 30	0.59	9.22	3.50	89.42	2.61	1.28	93.67	0.90	2.50
# 35	0.50	11.32	4.30	93.73	0.00	0.00	93.67	0.70	1.80
# 40	0.42	8.76	3.33	97.06	12.15	5.94	99.61	0.60	0.60
# 50	0.3	5.4	2.05	99.11	0.79	0.39	100.00	0.60	0.60
# 60	0.25	2.34	0.89	100.00	0.00	0.00	100.00	0.28	0.32
Sobranite		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
Total		263.07	100		204.52	100.00		99.68	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 5



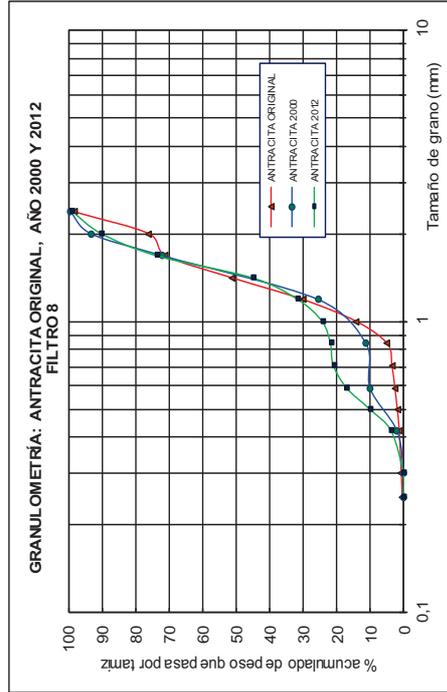
CUADRO No. 16
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 7

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ANTRACITA 2012			ANTRACITA 2000			ANTRACITA ORIGINAL		
		Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	% reten acumul.
# 8	2,38	8,04	3,18	96,82	1,02	0,51	99,57	1,60	1,60	98,40
# 10	2	39,34	15,56	81,25865	11,41	5,72	90,46	22,40	24,00	76,00
# 12	1,68	53,05	20,98	60,27451	43,26	21,68	60,23	5,00	29,00	71,00
# 14	1,41	75,28	29,78	69,50	30,50	0,00	27,91	20,00	49,00	51,00
# 16	1,19	30,94	12,24	81,74	18,26	56,34	15,75	21,00	70,00	30,00
# 18	1	9,72	3,84	85,59	14,41	0,00	84,25	16,00	86,00	14,00
# 20	0,84	3,02	1,19	86,78	13,22	10,62	94,86	9,20	95,20	4,80
# 25	0,707	1,85	0,73	87,51	12,49	0,00	94,86	1,40	96,60	3,40
# 30	0,59	8,23	3,26	90,77	9,23	1,71	4,28	0,90	97,50	2,50
# 35	0,50	12,02	4,75	95,52	4,48	0,00	95,72	0,70	98,20	1,80
# 40	0,42	7,34	2,90	98,43	1,57	7,61	0,47	0,60	98,80	1,20
# 50	0,3	3,98	1,57	100,00	0,00	0,93	0,00	0,60	99,40	0,60
# 60	0,25			100,00	0,00		0,00	0,28	99,68	0,32
Subramite										
Total		252,81	100		199,52	100,00		0,00	99,68	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 6



CUADRO No. 17
GRANULOMETRÍA DE ANTRACITA, FILTRO 8

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ANTRACITA 2012			ANTRACITA 2000			ANTRACITA ORIGINAL		
		Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	% reten acumul.
# 8	2,38	3,13	1,07	98,92738	1,07	0,54	99,46	1,60	1,60	98,40
# 10	2	25,47	8,73	90,1991	12,15	6,10	93,37	22,40	24,00	76,00
# 12	1,68	48,27	16,54	73,65752	42,81	21,48	71,89	5,00	29,00	71,00
# 14	1,41	83,65	28,67	55,01	44,99	0,00	28,11	20,00	49,00	51,00
# 16	1,19	39,08	13,39	68,40	31,60	46,39	25,50	21,00	70,00	30,00
# 18	1	21,41	7,34	75,74	24,26	0,00	74,50	16,00	86,00	14,00
# 20	0,84	7,21	2,47	78,21	21,79	28,56	11,17	9,20	95,20	4,80
# 25	0,707	2,55	0,87	79,08	20,92	0,00	88,83	1,40	96,60	3,40
# 30	0,59	11,76	4,03	83,11	16,89	2,47	9,93	0,90	97,50	2,50
# 35	0,50	20,05	6,87	89,98	10,02	0,00	90,07	0,70	98,20	1,80
# 40	0,42	18,78	6,44	96,42	3,58	16,13	1,83	0,60	98,80	1,20
# 50	0,3	10,45	3,58	100,00	0,00	3,65	0,00	0,60	99,40	0,60
# 60	0,25		0,00	100,00	0,00		0,00	0,28	99,68	0,32
Subramite										
Total		291,81	100		199,27	100,00		0,00	99,68	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

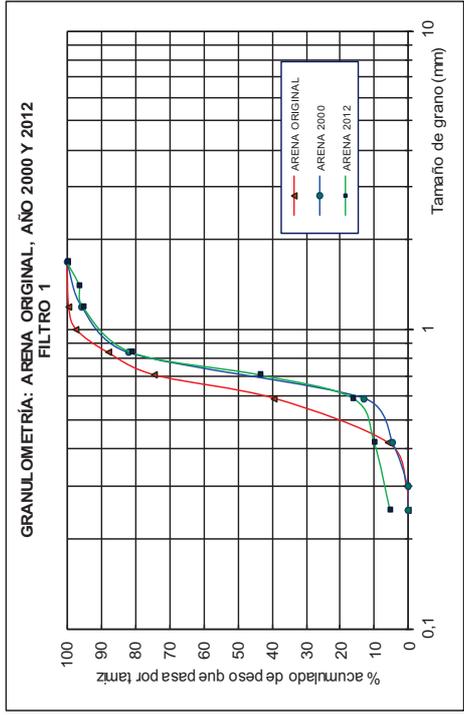
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 18
GRANULOMETRÍA DE ARENA, FILTRO 1

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ARENA 2012			ARENA 2000			ARENA ORIGINAL			
		Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	% retenido	% reten Acumul.	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	%reten acumul.
# 8	2,38										
# 10	2										
# 12	1,68			100	0,00	0,00	100,00				100,00
# 14	1,41	15,16	3,52	96,48	0,00	0,00					
# 16	1,19	4,98	1,16	95,32	9,04	4,42	95,58	0,50	0,50	99,50	
# 18	1		0,00	4,68	0,00	4,42		2,30	2,80	97,20	
# 20	0,84	61,18	14,22	18,90	27,76	13,58	82,00	9,20	12,00	88,00	
# 25	0,707	160,98	37,41	56,30	43,70	18,00	82,00	13,60	25,60	74,40	
# 30	0,59	117,82	27,38	83,68	16,32	69,00	13,00	35,20	60,80	39,20	
# 35	0,50		0,00	83,68		0,00	87,00				
# 40	0,42	26,66	6,20	89,88	10,12	8,22	4,78	33,10	93,90	6,10	
# 50	0,3		0,00	89,88		4,42	0,36	5,40	99,30	0,70	
# 60	0,25	19,83	4,61	94,49	5,51	0,67	0,03	0,70	100,00	0,00	
Sobranie		23,73	5,51	100,00	0,00	0,06	0,00				
Total		430,34	100,00		204,44	100,00		0,00	100,00		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 7



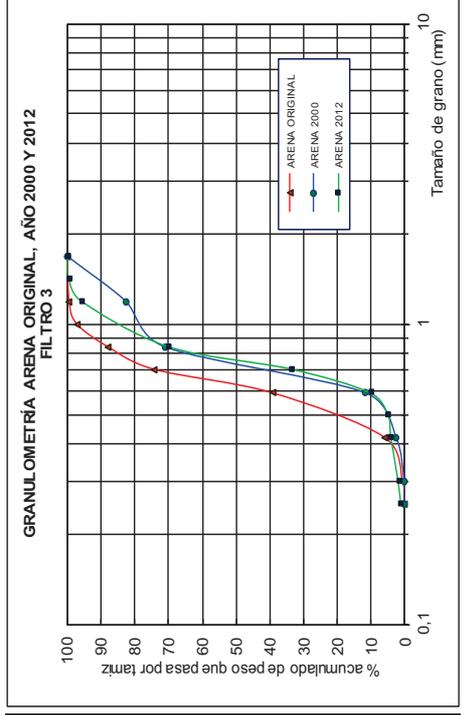
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 19
GRANULOMETRÍA DE ARENA, FILTRO 3

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ARENA 2012			ARENA 2000			ARENA ORIGINAL			
		Peso retenido	% retenido	% reten Acumul.	% retenido	% reten Acumul.	% retenido	% reten Acumul.	Peso retenido	% retenido	%reten acumul.
# 8	2,38										
# 10	2										
# 12	1,68			100	0,00	0,00	100,00				100,00
# 14	1,41	0,98	0,40	99,60	0,00	0,00					
# 16	1,19	9,26	3,75	95,85	69,62	17,31	82,69	0,50	0,50	99,50	
# 18	1		0,00	4,15	0,00	17,31		2,30	2,80	97,20	
# 20	0,84	63,55	25,76	29,91	46,22	11,49	28,81	9,20	12,00	88,00	
# 25	0,707	90,08	36,52	66,43	33,57	0,00	28,81	13,60	25,60	74,40	
# 30	0,59	57,46	23,29	89,72	10,28	59,56	88,37	35,20	60,80	39,20	
# 35	0,50	12,86	5,21	94,94	5,06	0,00	88,37				
# 40	0,42	2,2	0,89	95,83	4,17	9,01	97,38	33,10	93,90	6,10	
# 50	0,3	5,29	2,14	97,97	2,03	2,38	99,76	5,40	99,30	0,70	
# 60	0,25	2	0,81	98,78	1,22	0,92	99,99	0,70	100,00	0,00	
Sobranie		3	1,22	100,00	0,00	0,01	100,00				
Total		246,68	100		402,13	100,00		0,00	100,00		

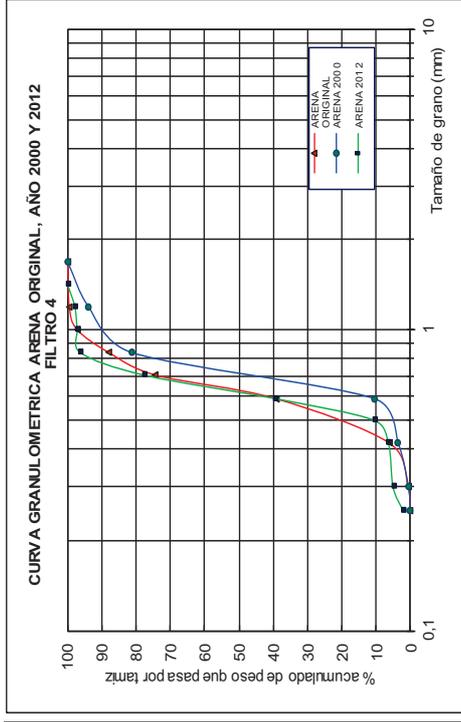
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 8



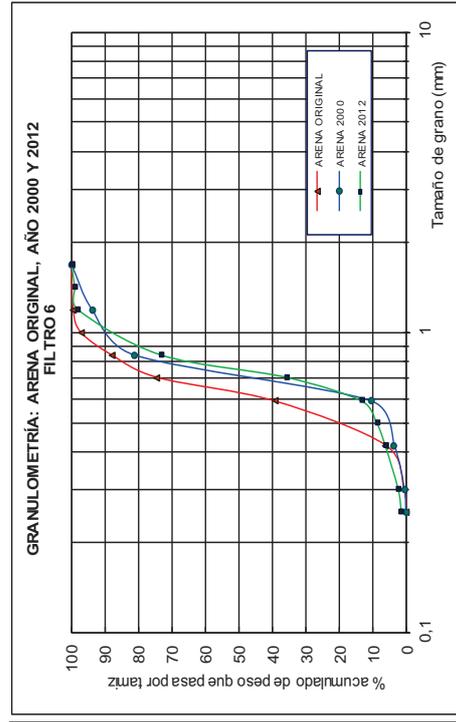
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 9



Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 10



Elaborado por: Fernando Ojeda N

ADRO No. 20
GRANULOMETRÍA DE ARENA, FILTRO 4

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ARENA 2012			ARENA 2000			ARENA ORIGINAL			
		Peso retenido	% retenido	% retenido Acumulad o	Peso retenido	% retenido	% retenido Acumulad o	Peso retenido	% retenido	% retenido acum	
# 8	2,38										
#10	2										
#12	1,68			100	0,00	0,00	100,00			100,00	
#14	1,41	4,88	2,11	97,89	0,00	0,00					
#16	1,19	1,57	0,68	97,21	24,84	6,14	93,86	0,50	0,50	98,50	
#18	1	2,01	0,87	96,34		6,14		2,30	2,80	97,20	
# 20	0,84	42,81	18,54	22,20	77,80	12,58	18,72	81,28	9,20	12,00	88,00
# 25	0,707	88,78	38,45	60,65	39,35	0,00	18,72	13,60	25,60	74,40	
# 30	0,59	66,47	28,79	89,44	10,56	70,84	89,56	10,44	35,20	60,80	39,20
# 35	0,50	9,57	4,14	93,59	6,41	0,00	89,56				
# 40	0,42	3,13	1,36	94,94	5,06	27,76	6,86	96,43	3,57	93,90	6,10
# 50	0,3	6,74	2,92	97,86	2,14	12,21	3,02	99,45	0,55	99,30	0,70
# 60	0,25	1,2	0,52	98,38	1,62	1,90	0,47	99,92	0,08	100,00	0,00
Subramte		3,74	1,62	100,00	0,00	0,33	0,08	100,00	0,00	100,00	0,00
Total		230,9	100		404,37	100,00			0,00	100,00	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 21
GRANULOMETRÍA DE ARENA, FILTRO 6

TAMIZ	ABERTURA (mm)	ARENA 2012			ARENA 2000			ARENA ORIGINAL			
		Peso retenido	% retenido	% retenido Acumulad o	Peso retenido	% retenido	% retenido Acumulad o	Peso retenido	% retenido	% retenido acum	
# 8	2,38										
#10	2										
#12	1,68			100	0,00	0,00	100,00			100,00	
#14	1,41	2,04	0,99	99,01	0,00	0,00					
#16	1,19	1,76	0,86	98,15	24,84	6,14	93,86	0,50	0,50	98,50	
# 18	1		0,00	1,85		6,14		2,30	2,80	97,20	
# 20	0,84	51,03	24,82	26,67	73,33	12,58	18,72	81,28	9,20	12,00	88,00
# 25	0,707	77,21	37,56	64,23	36,77	0,00	18,72	13,60	25,60	74,40	
# 30	0,59	45,98	22,37	86,60	13,40	70,84	89,56	10,44	35,20	60,80	39,20
# 35	0,50	9,29	4,52	91,12	8,88	0,00	89,56				
# 40	0,42	5,29	2,57	93,69	6,31	27,76	6,86	96,43	3,57	93,90	6,10
# 50	0,3	8	3,89	97,58	2,42	12,21	3,02	99,45	0,55	99,30	0,70
# 60	0,25	1,97	0,96	98,54	1,46	1,90	0,47	99,92	0,08	100,00	0,00
Subramte		3	1,46	100,00	0,00	0,33	0,08	100,00	0,00	100,00	0,00
Total		205,57	100		404,37	100,00			0,00	100,00	

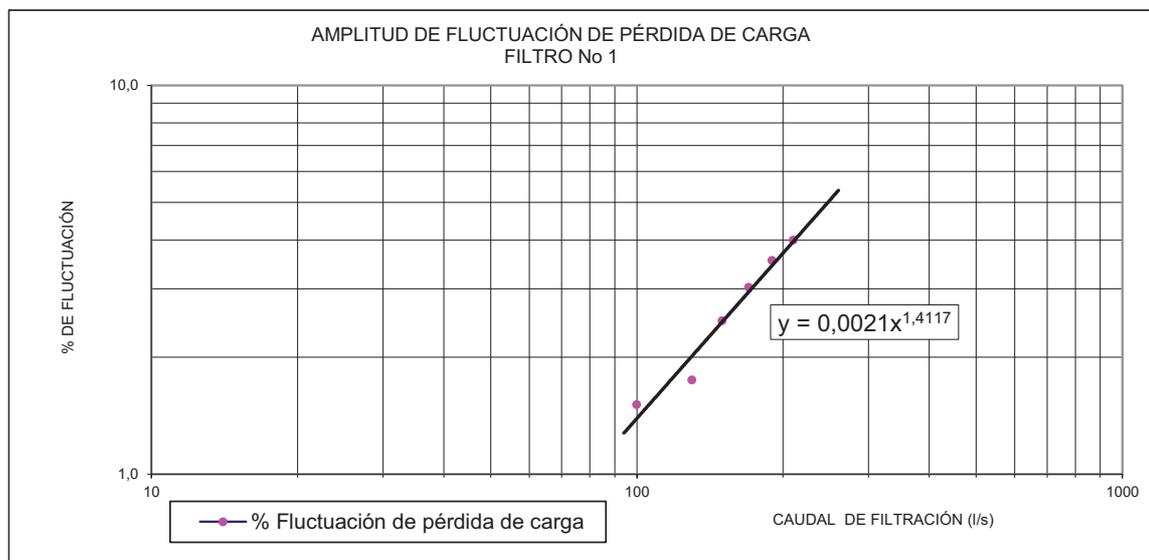
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 22 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 1

FILTRO No 1 FECHA: 10/20/2012 HORA: 13h40 CARRERA DE FILTRO: 0 horas													
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210		
Perdida de carga corregida hf (cm)	71,8		81,2		100,8		118,7		167,0		204,4		
Lectura	h'	Fluctuac.											
1	-21	1	-12	2	8	2	22	4	70	8	105	6	
	-20		-10		10		26		78		111		
2	-19	1	-12	1	7	4	25	5	73	7	102	10	
	-18		-11		11		30		80		112		
3	-21	1	-12	1	8	2	25	5	77	3	110	10	
	-20		-11		10		30		80		120		
4	-21	1	-11	1	9	2	22	4	75	3	108	7	
	-20		-10		11		26		78		115		
5	-21	1	-11	2	7	3	28	2	70	5	100	12	
	-20		-9		10		30		75		112		
6	-21	1	-11	1	7	2	27	3	71	4	109	11	
	-20		-10		9		30		75		120		
7	-21	1	-11	2	8	3	26	3	72	5	110	7	
	-20		-9		11		29		77		117		
8	-20	1	-11	1	7	2	28	3	70	9	111	6	
	-19		-10		9		31		79		117		
9	-21	2	-12	1	7	3	23	4	73	5	111	9	
	-19		-11		10		27		78		120		
10	-21	1	-11	2	8	2	24	3	70	8	113	4	
	-20		-9		10		27		78		117		
11	-22	1	-11	1	8	3	24	2	72	8	111	6	
	-21		-10		11		26		80		117		
12	-20	1	-13	2	7	2	25	5	72	6	110	10	
	-19		-11		9		30		78		120		
PROMEDIO	-20,2	1,1	-10,8	1,4	8,8	2,5	26,7	3,6	75,0	5,9	112,4	8,2	
%Fluctuación de pérdida de carga	1,5		1,7		2,5		3,0		3,5		4,0		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 11



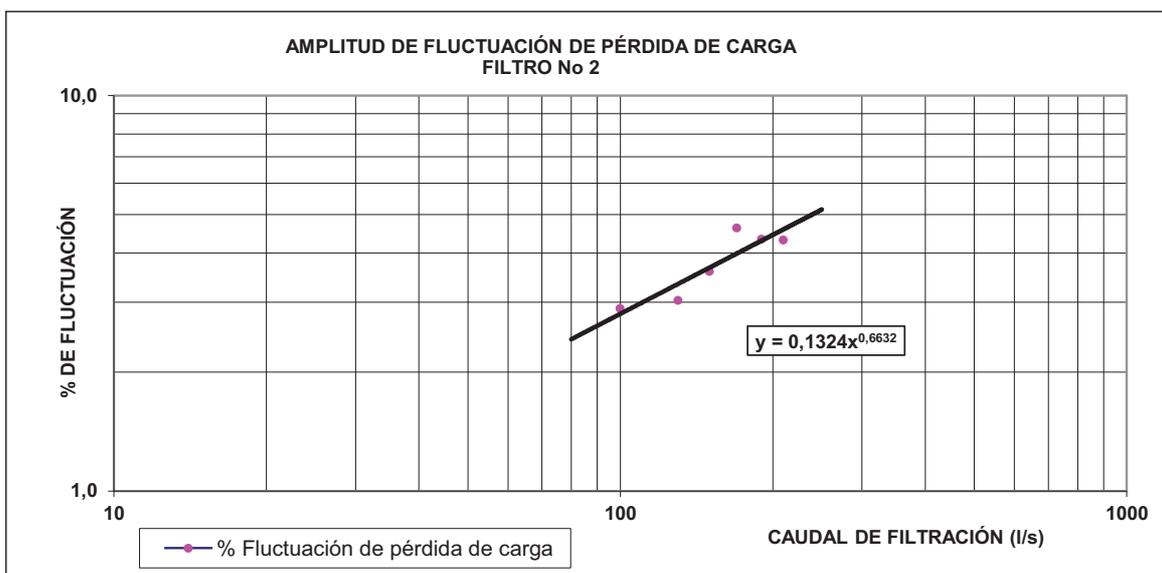
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 23 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 2

FILTRO No 2													
FECHA: 2012-10-27													
HORA: 14H30													
CARRERA DE FILTRO: 6 horas													
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210		
Perdida de carga corregida hf (cm)	126,8		137,4		155,5		178,5		223,5		272,9		
Lectura	h'	Fluctuac.											
1	34	4	48	2	58	5	81	9	125	8	170	10	
	38		50		63		90		133		180		
2	33	4	47	4	59	5	81	8	120	17	169	9	
	37		51		64		89		137		178		
3	35	3	44	5	61	5	81	8	123	10	172	11	
	38		49		66		89		133		183		
4	33	3	45	5	61	4	82	9	128	9	174	10	
	36		50		65		91		137		184		
5	35	4	43	5	58	6	79	9	128	7	175	10	
	39		48		64		88		135		185		
6	34	5	41	5	58	5	88	7	131	8	171	16	
	39		46		63		95		139		187		
7	33	4	40	4	60	7	85	8	129	9	178	13	
	37		44		67		93		138		191		
8	32	3	41	4	59	6	84	8	124	10	180	14	
	35		45		65		92		134		194		
9	32	4	43	3	62	5	86	9	126	10	178	12	
	36		46		67		95		136		190		
10	33	3	46	5	59	8	84	7	129	9	181	11	
	36		51		67		91		138		192		
11	30	4	42	4	70	6	80	10	132	10	176	12	
	34		46		76		90		142		188		
12	31	3	40	4	64	5	78	7	125	9	176	13	
	34		44		69		85		134		189		
PROMEDIO	34,8	3,6667	45,4	4,2	63,5	5,6	86,5	8,3	131,5	9,7	180,9	11,8	
%Fluctuación de pérdida de carga	2,9		3,0		3,6		4,6		4,3		4,3		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 12



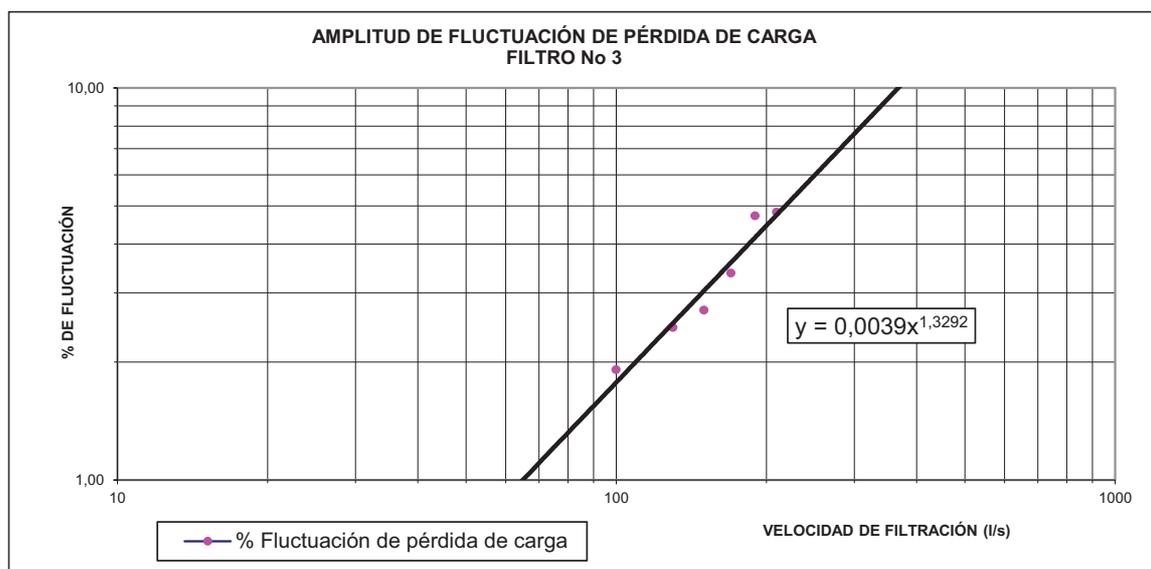
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 24 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 3

FILTRO No 3 FECHA: 2012-10-06 HORA: 9H00 CARRERA DE FILTRO: 3 horas												
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210	
Perdida de carga corregida hf (cm)	118,0		129,5		141,5		143,5		143,2		143,6	
Lectura	h'	Fluctuac.										
1	25	2	36	3	49	2	50	3	49	8	50	3
	27		39		51		53		57		53	
2	24	3	35	3	48	5	50	2	49	5	50	4
	27		38		53		52		54		54	
3	26	3	35	2	47	3	49	8	47	10	50	5
	29		37		50		57		57		55	
4	24	3	35	3	49	4	50	3	50	6	47	8
	27		38		53		53		56		55	
5	25	3	37	4	48	2	48	4	46	8	49	10
	28		41		50		52		54		59	
6	26	2	37	3	45	5	48	5	48	8	43	12
	28		40		50		53		56		55	
7	25	2	38	4	48	4	49	5	49	4	49	7
	27		42		52		54		53		56	
8	23	1	36	4	47	3	48	6	49	5	48	9
	24		40		50		54		54		57	
9	27	2	36	2	46	4	48	9	46	9	49	5
	29		38		50		57		55		54	
10	26	2	35	4	47	4	50	3	48	5	45	10
	28		39		51		53		53		55	
11	23	2	35	3	47	6	50	4	47	7	49	4
	25		38		53		54		54		53	
12	24	2	36	3	50	4	49	6	46	6	49	6
	26		39		54		55		52		55	
PROMEDIO	26,0	2,25	37,5	3,2	49,5	3,8	51,5	4,8	51,2	6,8	51,6	6,9
%Fluctuación de pérdida de carga	1,91		2,45		2,71		3,37		4,71		4,82	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 13



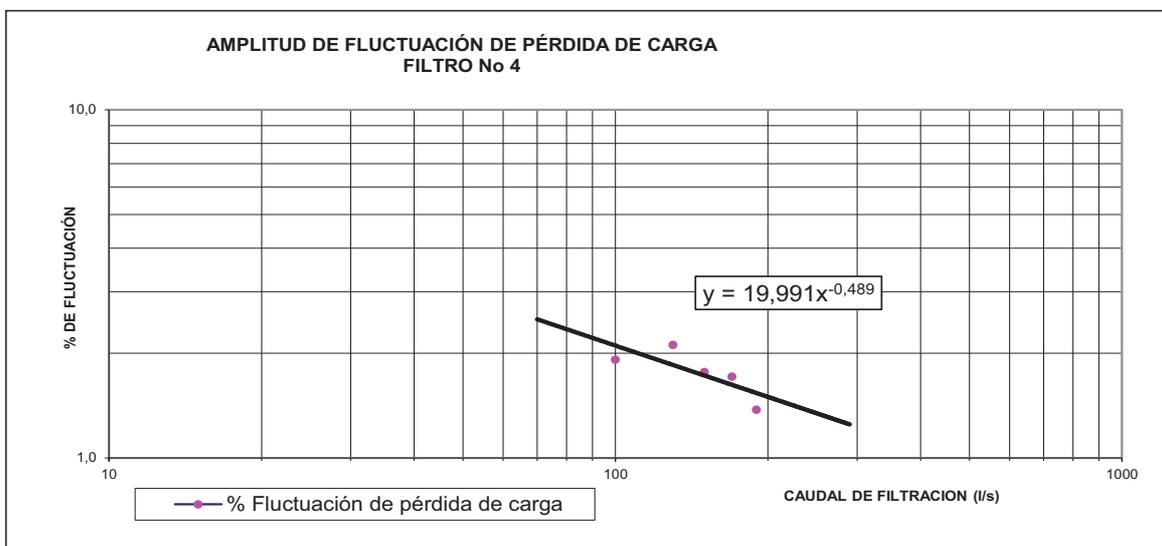
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 25 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 4

FILTRO No 4													
FECHA: 2012-09-22													
HORA: 10H00													
CARRERA DE FILTRO: 25 horas													
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210		
Perdida de carga corregida hf (cm)	126,5		134,4		146,7		185,3		224,5		266,1		
Lectura	h'	F	h'	F									
1	33	2	43	2	50	4	91	4	130	3	180	3	
	35		45		54		95		133		183		
2	34	3	41	2	52	4	92	3	131	5	175	4	
	37		43		56		95		136		179		
3	32	2	39	4	50	3	90	4	132	3	173	3	
	34		43		53		94		135		176		
4	33	3	40	3	56	3	91	4	133	3	172	3	
	36		43		59		95		136		175		
5	32	4	41	3	54	2	93	3	131	4	170	7	
	36		44		56		96		135		177		
6	34	3	39	3	53	2	91	3	128	3	172	4	
	37		42		55		94		131		176		
7	33	2	40	3	54	2	93	2	127	3	176	4	
	35		43		56		95		130		180		
8	33	1	41	3	55	2	95	2	130	3	170	5	
	34		44		57		97		133		175		
9	33	3	42	2	56	2	94	3	132	3	168	4	
	36		44		58		97		135		172		
10	33	2	42	4	54	3	91	3	131	2	170	4	
	35		46		57		94		133		174		
11	34	2	42	3	54	2	90	3	133	3	169	5	
	36		45		56		93		136		174		
12	35	2	42	2	53	2	90	4	133	2	170	3	
	37		44		55		94		135		173		
Promedio de amplitudes de oscilacion	34,5	2,42	42,4	2,83	54,7	2,58	93,3	3,17	132,5	3,08	174,13	4,08	
%Fluctuación de perdida de carga	1,9		2,1		1,8		1,7		1,4		1,5		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 14



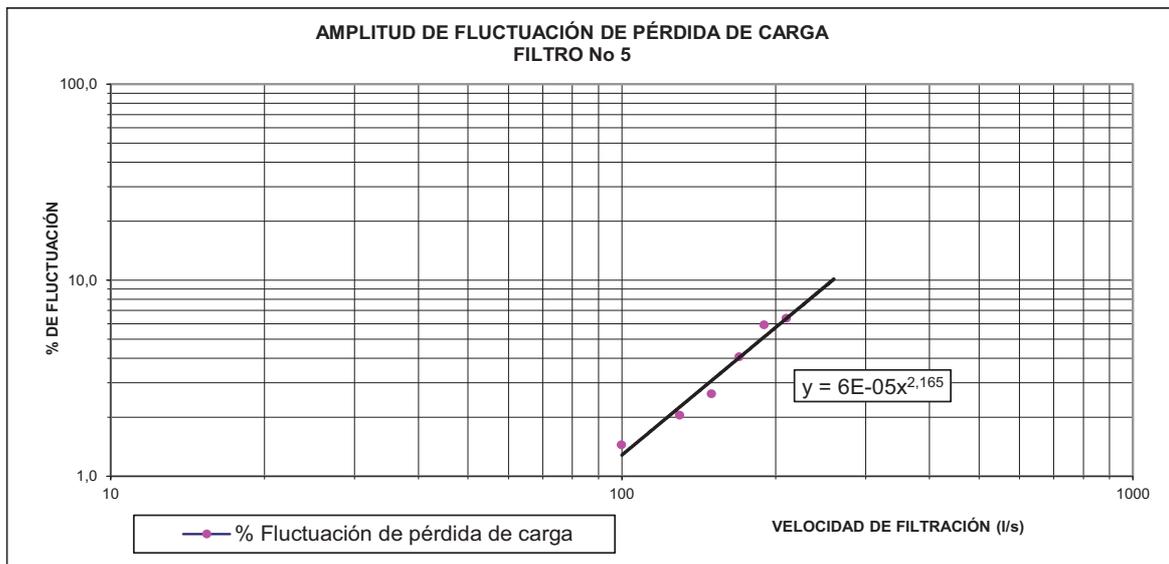
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 26 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 5

FILTRO No 5 FECHA: 2012-10-06 HORA: 8H30 CARRERA DE FILTRO: 10 horas												
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210	
Perdida de carga corregida hf (cm)	92,7		102,0		123,7		127,5		127,2		126,7	
Lectura	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.
1	0	1	8	2	30	2	37	3	33	8	33	11
	1		10		32		40		41		44	
2	0	2	10	2	31	2	36	4	30	8	30	10
	2		12		33		40		38		40	
3	0	1	9	2	27	3	32	7	32	4	30	8
	1		11		30		39		36		38	
4	0	1	9	3	30	2	30	7	32	8	29	7
	1		12		32		37		40		36	
5	0	2	8	2	30	3	33	3	36	6	32	7
	2		10		33		36		42		39	
6	0	1	10	2	30	3	32	3	30	8	30	8
	1		12		33		35		38		38	
7	0	1	9	1	32	5	32	6	31	7	32	9
	1		10		37		38		38		41	
8	0	1	9	3	30	2	38	4	30	6	30	10
	1		12		32		42		36		40	
9	0	1	8	1	31	3	30	7	31	8	30	3
	1		9		34		37		39		33	
10	0	2	9	2	30	3	30	6	33	9	33	6
	2		11		33		36		42		39	
11	0	1	9	3	30	5	31	7	30	8	30	8
	1		12		35		38		38		38	
12	0	2	9	2	30	6	34	5	29	10	29	10
	2		11		36		39		39		39	
PROMEDIO	0,7	1,3	10,0	2,1	31,7	3,3	35,5	5,2	35,2	7,5	34,7	8,1
%Fluctuación de pérdida de carga	1,4		2,0		2,6		4,1		5,9		6,4	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 15



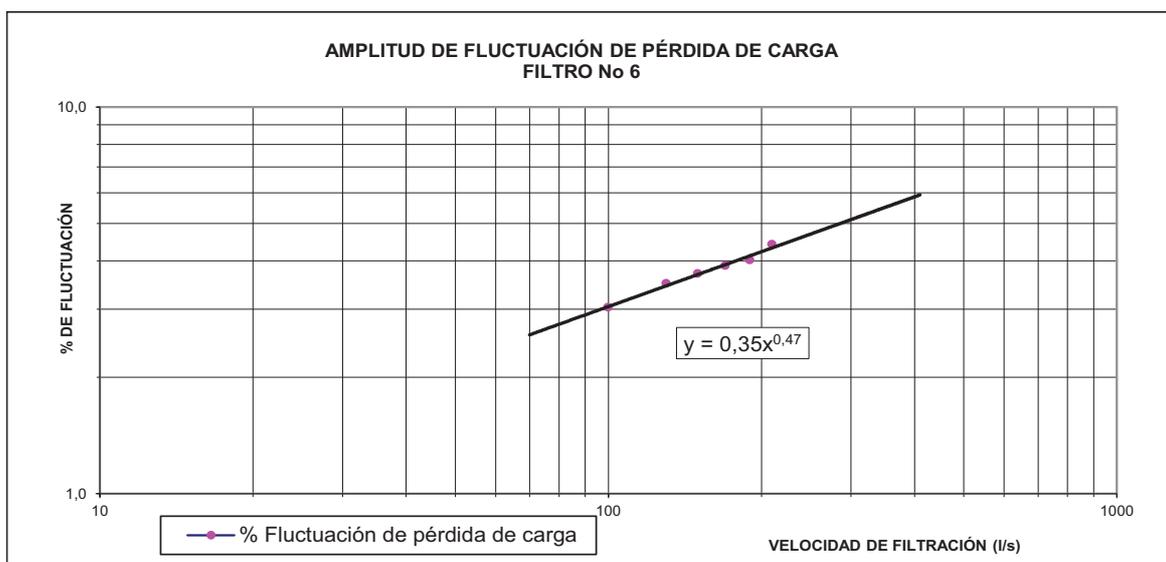
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 27 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 6

FILTRO No 6													
FECHA: 2012-10-22													
HORA: 18H00													
CARRERA DE FILTRO: 26 horas													
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210		
Perdida de carga corregida hf (cm)	162,3		164,5		171,0		204,0		242,7		285,3		
Lectura	h'	Fluctuac.											
1	69	4	70	5	78	6	110	6	148	10	180	20	
	73		75		84		116		158		200		
2	66	6	68	7	76	5	112	7	145	10	185	15	
	72		75		81		119		155		200		
3	68	5	70	6	76	5	107	6	143	12	188	12	
	73		76		81		113		155		200		
4	68	5	69	6	73	7	109	6	142	10	190	10	
	73		75		80		115		152		200		
5	69	5	72	4	79	5	105	10	148	11	188	11	
	74		76		84		115		159		199		
6	67	5	70	5	77	6	107	11	147	8	190	10	
	72		75		83		118		155		200		
7	68	6	70	6	75	7	105	8	147	7	187	11	
	74		76		82		113		154		198		
8	67	4	71	6	74	8	111	7	150	11	190	13	
	71		77		82		118		161		203		
9	68	5	69	7	73	8	106	9	145	10	185	12	
	73		76		81		115		155		197		
10	68	5	68	6	72	7	105	10	144	7	186	13	
	73		74		79		115		151		199		
11	67	4	71	5	78	5	107	7	143	10	193	12	
	71		76		83		114		153		205		
12	69	5	67	6	79	7	112	8	148	11	182	12	
	74		73		86		120		159		194		
PROMEDIO	70,3	4,9	72,5	5,8	79,0	6,3	112,0	7,9	150,7	9,8	193,3	12,6	
%Fluctuación de pérdida de carga	3,0		3,5		3,7		3,9		4,0		4,4		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 16



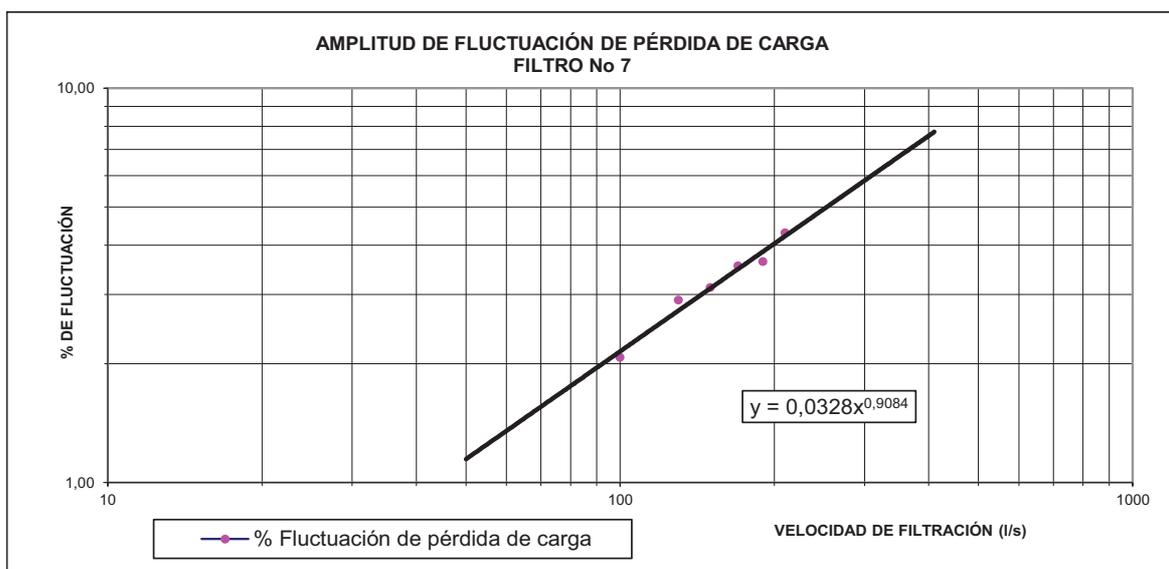
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 28 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 7

FILTRO No 7 FECHA: 2012-10-22 HORA: 18H20 CARRERA DE FILTRO: 37 horas													
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210		
Perdida de carga corregida hf (cm)	144,7		175,3		179,0		211,8		252,6		287,1		
Lectura	h'	Fluctuac.											
1	53	2	81	4	85	5	115	8	160	6	195	11	
	55		85		90		123		166		206		
2	52	3	82	6	85	4	116	8	156	10	190	14	
	55		88		89		124		166		204		
3	53	3	82	4	86	5	118	8	152	11	188	15	
	56		86		91		126		163		203		
4	51	4	79	6	85	4	112	10	155	10	190	10	
	55		85		89		122		165		200		
5	52	3	82	4	84	4	118	5	158	9	188	15	
	55		86		88		123		167		203		
6	50	3	79	5	83	7	117	6	158	8	186	14	
	53		84		90		123		166		200		
7	50	4	80	5	82	5	113	7	157	9	188	13	
	54		85		87		120		166		201		
8	52	3	81	5	85	7	114	8	154	10	189	12	
	55		86		92		122		164		201		
9	50	3	83	5	84	6	118	8	152	8	190	10	
	53		88		90		126		160		200		
10	49	4	78	6	87	5	114	6	153	9	186	14	
	53		84		92		120		162		200		
11	52	1	79	6	83	7	115	10	162	10	188	12	
	53		85		90		125		172		200		
12	50	3	83	5	82	8	123	6	155	10	189	8	
	53		88		90		129		165		197		
PROMEDIO	52,7	3	83,3	5,1	87,0	5,6	119,8	7,5	160,6	9,2	195,1	12,3	
%Fluctuación de pérdida de carga	2,07		2,90		3,12		3,54		3,63		4,30		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 17



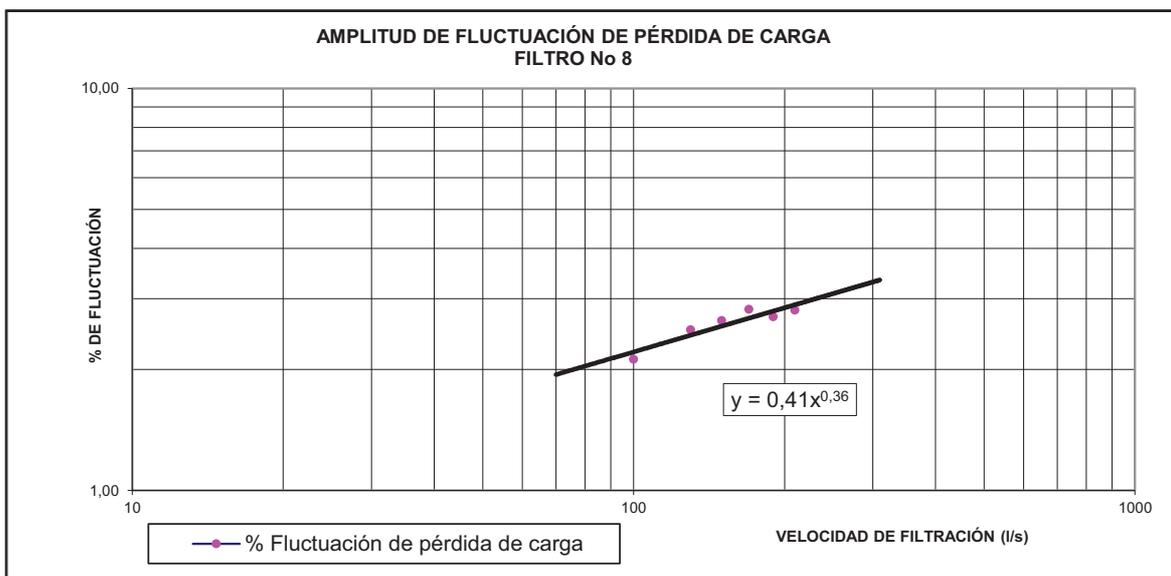
Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 29 FLUCTUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA, FILTRO No. 8

FILTRO No 8												
FECHA: 2012-09-22												
HORA: 14H00												
CARRERA DE FILTRO: 3 horas												
Caudal de filtración (l/s)	100		130		150		170		190		210	
Perdida de carga corregida hf (cm)	94,3		103,0		107,2		132,9		166,6		202,1	
Lectura	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.	h'	Fluctuac.
1	1	2	9	2	15	3	40	4	70	6	103	9
	3		11		18		44		76		112	
2	1	1	9	3	13	3	42	2	70	10	105	10
	2		12		16		44		80		115	
3	2	2	12	3	15	2	39	4	73	5	105	5
	4		15		17		43		78		110	
4	1	2	9	3	13	4	39	4	72	4	108	4
	3		12		17		43		76		112	
5	1	2	10	3	14	2	39	4	72	3	111	2
	3		13		16		43		75		113	
6	1	3	9	2	15	2	37	5	74	4	105	8
	4		11		17		42		78		113	
7	1	2	10	2	13	4	36	4	74	2	105	7
	3		12		17		40		76		112	
8	2	2	9	3	12	2	40	3	73	5	108	3
	4		12		14		43		78		111	
9	2	3	11	3	12	4	39	2	72	2	111	3
	5		14		16		41		74		114	
10	1	1	10	3	14	3	41	4	72	4	107	7
	2		13		17		45		76		114	
11	1	2	10	2	15	2	38	5	73	4	110	5
	3		12		17		43		77		115	
12	2	2	9	2	14	3	38	4	73	5	109	5
	4		11		17		42		78		114	
PROMEDIO	2,3	2	11,0	2,6	15,2	2,8	40,9	3,8	74,6	4,5	110,1	5,7
%Fluctuación de pérdida de carga	2,12		2,51		2,64		2,82		2,70		2,80	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRÁFICO No. 18



Elaborado por: Fernando Ojeda N

ANEXO No. 3
CUADROS FASE DE INVESTIGACIÓN PILOTO

CUADRO No. 1

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LA ARENA Y ANTRACITA DEL PROTOTIPO Y SISTEMA PILOTO

CARACTERÍSTICAS	ANTRACITA					
	GRANULOMETRÍA ORIGINAL	GRANULOMETRÍA PROMEDIO ACTUAL	ALTERNATIVAS PARA SISTEMA PILOTO			
			1	2	3	
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,97	0,55	0,9	0,9	0,9	
diametro 60 (mm)	1,55	1,62	1,17	1,31	1,44	
Coefficiente de uniformidad	1,60	2,96	1,3	1,45	1,6	
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,5	0,42	0,84	0,7	0,7	
Tamaño grano más grande (mm)	2,38	2,38	2	2	2	
d90 antracita (mm)	2,10	2,08	1,54	1,68	1,83	
diametro medio (mm)	1,44	1,40	1,42	1,35	1,35	
Peso específico (gr/cm ³)	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	
Altura capa de antracita (L1) (cm)	49,5	44,9	50	50	50	
ARENA						
Tamaño efectivo (d10) (mm)	0,45	0,51	0,5	0,5	0,5	
Diametro 60 (mm)	0,66	0,74	0,7	0,7	0,7	
Coefficiente de uniformidad	1,47	1,46	1,4	1,4	1,4	
Tamaño grano más pequeño (mm)	0,30	0,25	0,42	0,42	0,42	
Tamaño grano más grande (mm)	1,68	1,68	1,4	1,4	1,4	
diametro medio (mm)	0,99	0,97	0,91	0,91	0,91	
Peso específico (gr/cm ³)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	
Altura capa de arena (L2) (cm)	22,9	15,4	25	25	25	
COMPROBACIONES DE INTERMEZCLA						
(L / d10 ≥ 1000) Kawamura	L1/d10 = arena	510	816	556	556	556
	L2/d10 = antracita	509	302	500	500	500
	L / d10 total	1019	1118	1056	1056	1056
Altura total lecho (antrac+arena= L1+L2=L)	72,4	60,3	75	75	75	
%Antracita altura = L1 / L = 66%	68	74	67	67	67	
d90 antrac / d10 arena = 3	4,7	4,1	3,1	3,4	3,7	
d90% antrac. / d10 antracita = 2	2,5	4,3	1,7	1,9	2,0	
$\frac{d1}{d2} = \left(\frac{\delta 2 - \delta a}{\delta 1 - \delta a} \right)^n$	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
d1/d2	4,67	4,07	3,08	3,36	3,66	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

**CUADRO No. 2
% Y PESOS PARCIALES PARA PREPARACIÓN DE ARENA Y ANTRACITA DE FILTROS PILOTO**

# TAMIZ	ABERTURA (mm)	ANTRACITA						ARENA	
		COLUMNA PILOTO 1		COLUMNA PILOTO 2		COLUMNA PILOTO 3		COLUMNAS 1, 2 Y 3	
		%	Peso (Kg)	%	Peso (Kg)	%	Peso (Kg)	%	Peso (Kg)
#10 a #12	2 1,68	5,00	0,50	10,00	1,00	20,00	2,00		
#12 a #14	1,68 1,41	10,00	1,00	18,00	1,80	23,00	2,30		
#14 a #16	1,41 1,19	20,00	2,00	26,00	2,60	21,00	2,10	2,00	0,18
# 16 a #18	1,19 1	36,00	3,60	24,00	2,40	18,00	1,80	4,00	0,36
# 18 a #20	1 0,84	29,00	2,90	17,00	1,70	13,00	1,30	11,00	0,99
# 20 a #25	0,84 0,707			5,00	0,50	5,00	0,50	21,00	1,89
# 25 a #30	0,707 0,59							32,00	2,88
#30 a #35	0,59 0,5							20,00	1,80
# 35 a # 40	0,5 0,42							10,00	0,90
Total		100,00	10,00	100,00	10,00	100,00	10,00	100,00	9,00
Peso de medio a preparar (Kg)		10						9	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 3
PRUEBA No. 1
PÉRDIDAS DE CARGA Y TURBIEDADES EN FILTROS PILOTO No. 1, 2 y 3
Condiciones de prueba: Tasa de filtración constante = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	TURBIEDAD (NTU)			PÉRDIDAS DE CARGA (cm)																				
			Afluente		Efluente		FILTRO No 1					FILTRO No 2					FILTRO No 3									
			Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	ALTURA DE PIEZÓMETRO (cm)																	
2/ /201	11:00:00	0	0.8	0.28	0.32	0.3	0	3	6	9	15	32	33	95	75	50	30	10	0	0	0	10	30	50	75	75
	14:00:00	3	1.2	0.24	0.26	0.26	0	5	9	15	37	39	34	37	32	6	11	2	0	0	0	4	9	14	31	34
	17:30:00	7	0.6	0.22	0.25	0.25	0	8	12	19	43	44	37	37	37	4	9	4	0	0	0	6	10	15	35	34
	19:30:00	9	0.89	0.28	0.32	0.35	0	12	17	22	44	45	41	43	44	9	14	9	0	0	0	9	13	18	38	39
	23:00:00	12	0.7	0.25	0.29	0.3	0	17	23	28	50	51	48	48	51	14	20	14	0	0	0	12	16	21	41	43
	2:00:00	15	0.95	0.33	0.34	0.33	0	20	25	32	55	57	51	51	57	17	23	17	0	0	0	15	20	25	44	45
	5:00:00	18	0.89	0.29	0.34	0.36	0	23	31	38	58	60	54	56	60	20	27	20	0	0	0	18	23	27	49	51
	8:00:00	21	0.74	0.28	0.3	0.35	0	30	40	46	69	71	63	64	69	26	34	26	0	0	0	24	31	36	56	57
	11:00:00	24	1.00	0.3	0.36	0.36	0	36	43	54	82	84	73	75	84	35	41	35	0	0	0	28	35	41	61	63
	14:00:00	27	0.91	0.27	0.32	0.31	0	41	48	57	87	89	81	81	89	36	46	36	0	0	0	32	40	45	65	66
	17:00:00	30	0.8	0.26	0.29	0.27	0	43	52	61	90	91	81	81	91	39	50	39	0	0	0	33	42	50	67	68
	20:00:00	33	0.84	0.25	0.25	0.27	0	45	56	64	96	98	88	84	98	43	56	43	0	0	0	34	43	52	69	71
22:00:00	35	0.86	0.26	0.29	0.32	0	49	62	71	103	104	90	93	104	46	61	46	0	0	0	37	48	56	75	77	
1:00:00	38	0.81	0.26	0.28	0.31	0	50	65	72	106	108	91	98	108	50	67	50	0	0	0	43	55	61	82	84	
4:00:00	41	1.03	0.31	0.34	0.38	0	54	72	79	112	114	91	103	114	53	71	53	0	0	0	48	61	70	88	90	
7:00:00	44	0.85	0.27	0.29	0.3	0	59	79	86	121	123	91	111	123	57	77	57	0	0	0	53	67	74	94	96	
10:00:00	47	0.83	0.25	0.27	0.29	0	64	82	90	124	126	91	118	126	62	79	62	0	0	0	59	72	81	100	102	
13:00:00	50	0.7	0.24	0.23	0.24	0	68	85	95	127	129	91	122	129	67	82	67	0	0	0	66	78	85	110	112	
16:00:00	53	0.86	0.28	0.32	0.3	0	71	89	99	135	138	91	128	138	69	86	69	0	0	0	71	84	95	118	120	
19:00:00	56	1	0.26	0.28	0.3	0	80	95	106	143	142	91	137	142	74	91	74	0	0	0	77	93	103	127	129	
22:00:00	59	0.9	0.27	0.26	0.26	0	88	106	117	165	166	91	146	166	82	101	82	0	0	0	82	101	108	135	138	
1:00:00	62	0.7	0.26	0.24	0.24	0	93	112	125	174	176	91	158	176	88	108	88	0	0	0	88	108	117	144	146	
4:00:00	65	0.91	0.27	0.25	0.26	0	103	118	134	184	186	91	167	186	97	112	97	0	0	0	95	115	127	154	157	
8:00:00	69	0.9	0.28	0.27	0.25	0	110	134	151	194	195	91	177	195	103	120	103	0	0	0	102	120	134	162	164	
10:00:00	71	0.9	0.3	0.27	0.28	0	117	136	154	204	206	91	183	206	106	124	106	0	0	0	105	124	140	172	174	
11:00:00	72	0.72	0.32	0.27	0.32	0	120	138	156	206	207	91	186	207	108	125	108	0	0	0	108	126	142	174	176	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 4
PRUEBA No. 1 EN FILTRO PILOTO No. 1
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 1													CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE												
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)													H disponible = H - (Hf total)												
			10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244												
2/ /201	11:00:00	0,0	3	6	12	32	33	34		144	151	168	182	187	206	210												
	14:00:00	3,0	5	9	15	37	39	40		144	149	165	179	182	200	204												
	17:30:00	6,5	8	12	19	43	44	45		144	146	162	175	176	195	199												
	19:30:00	8,5	12	17	22	44	45	46		144	142	157	172	175	194	198												
	23:00:00	12,0	17	23	28	50	51	52		144	137	151	166	169	188	192												
	2:00:00	15,0	20	25	32	55	57	58		144	134	149	162	164	182	186												
	5:00:00	18,0	23	31	38	58	60	61		144	131	143	156	161	179	183												
	8:00:00	21,0	30	40	46	69	71	72		144	124	134	148	150	168	172												
	11:00:00	24,0	36	43	54	82	84	85		144	118	131	140	137	155	159												
	14:00:00	27,0	41	48	57	87	89	90		144	113	126	137	132	150	154												
2/9/201	17:00:00	30,0	43	52	61	90	91	92		144	111	122	133	129	148	152												
	20:00:00	33,0	45	56	64	96	98	99		144	109	118	130	123	141	145												
	22:00:00	35,0	49	62	71	103	104	105		144	105	112	123	116	135	139												
	1:00:00	38,0	50	65	72	106	108	109		144	104	109	122	113	131	135												
	4:00:00	41,0	54	72	79	112	114	115		144	100	102	115	107	125	129												
	7:00:00	44,0	59	79	86	121	123	124		144	95	95	108	98	116	120												
	10:00:00	47,0	64	82	90	124	126	127		144	90	92	104	95	113	117												
	13:00:00	50,0	68	85	95	127	129	130		144	86	89	99	92	110	114												
	16:00:00	53,0	71	89	99	135	138	139		144	83	85	95	84	101	105												
	19:00:00	56,0	80	95	106	143	142	143		144	74	79	88	76	97	101												
2/11/201	22:00:00	59,0	88	106	117	165	166	167		145	66	68	77	54	73	77												
	1:00:00	62,0	93	112	125	174	176	177		146	61	62	69	45	63	67												
	4:00:00	65,0	103	118	134	184	186	187		147	51	56	60	35	53	57												
	8:00:00	69,0	110	134	151	194	195	196		148	44	40	43	25	44	48												
	10:00:00	71,0	117	136	154	204	206	207		149	37	38	40	15	33	37												
	11:00:00	72,0	120	138	156	206	207	208		150	34	36	38	13	32	36												

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 5

PRUEBA No. 1 EN FILTRO PILOTO No. 2

PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE

Condiciones de prueba: Tasa constante = $275 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 1																
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)										CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE						
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244		
2/ /201	11:00:00	0,0	0	2	6	11	32	34	34	35	100	0	144	152	168	183	187	205	209
	14:00:00	3,0	4	9	14	34	37	37	38	38	100	0	144	150	165	180	185	202	206
	17:30:00	6,5	7	11	16	36	37	37	38	38	100	0	144	147	163	178	183	202	206
	19:30:00	8,5	9	14	19	41	43	43	44	44	100	0	144	145	160	175	178	196	200
	23:00:00	12,0	14	20	25	46	48	48	49	49	100	0	144	140	154	169	173	191	195
	2:00:00	15,0	17	23	29	49	51	51	52	52	100	0	144	137	151	165	170	188	192
2/9/201	5:00:00	18,0	20	27	32	54	56	56	57	57	100	0	144	134	147	162	165	183	187
	8:00:00	21,0	26	34	41	63	64	64	65	65	100	0	144	128	140	153	156	175	179
	11:00:00	24,0	35	41	49	73	75	75	76	76	100	0	144	119	133	145	146	164	168
	14:00:00	27,0	36	46	54	75	76	76	77	77	100	0	144	118	128	140	144	163	167
	17:00:00	30,0	39	50	59	79	81	81	82	82	100	0	144	115	124	135	140	158	162
	20:00:00	33,0	43	56	65	83	84	84	85	85	100	0	144	111	118	129	136	155	159
2/10/201	22:00:00	35,0	46	61	69	90	93	93	94	94	100	0	144	108	113	125	129	146	150
	1:00:00	38,0	50	67	75	96	98	98	99	99	100	0	144	104	107	119	123	141	145
	4:00:00	41,0	53	71	79	101	103	103	104	104	100	0	144	101	103	115	118	136	140
	7:00:00	44,0	57	77	87	109	111	111	112	112	100	0	144	97	97	107	110	128	132
	10:00:00	47,0	62	79	90	115	118	118	119	119	100	0	144	92	95	104	104	121	125
	13:00:00	50,0	67	82	93	120	122	122	123	123	100	0	144	87	92	101	99	117	121
2/11/201	16:00:00	53,0	69	86	96	126	128	128	129	129	100	0	144	85	88	98	93	111	115
	19:00:00	56,0	74	91	101	135	137	137	138	138	100	0	144	80	83	93	84	102	106
	22:00:00	59,0	82	101	112	144	146	146	147	147	100	0	145	72	73	82	75	93	97
	1:00:00	62,0	88	108	124	155	158	158	159	159	100	0	146	66	66	70	64	81	85
	4:00:00	65,0	97	112	130	164	164	164	168	168	100	0	147	57	62	64	55	72	76
	8:00:00	69,0	103	120	140	175	177	177	178	178	100	0	148	51	54	54	44	62	66
2/11/201	10:00:00	71,0	106	124	145	180	183	183	184	184	100	0	149	48	50	49	39	56	60
	11:00:00	72,0	108	125	147	184	186	186	187	187	100	0	150	46	49	47	35	53	57

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 6

**PRUEBA No. 1 EN FILTRO PILOTO No. 3
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante**

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 1												CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE									
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)												H disponible = H - (Hf total)									
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244							
2/ /201	11:00:00	0,0	0	2	6	11	31	34	35	35	34	34	35	35	100	0	144	154	174	194	219	239	244	
	14:00:00	3,0	4	9	14	34	36	36	37	37	36	36	37	37	100	0	144	150	165	180	185	203	207	
	17:30:00	6,5	6	10	15	35	34	34	35	35	34	34	35	35	100	0	144	148	164	179	184	205	209	
	19:30:00	8,5	9	13	18	38	39	39	40	40	39	39	40	40	100	0	144	145	161	176	181	200	204	
	23:00:00	12,0	12	16	21	41	41	41	44	44	43	43	44	44	100	0	144	142	158	173	178	196	200	
2/9/201	2:00:00	15,0	15	20	25	44	45	45	46	46	45	45	46	100	0	144	139	154	169	175	194	198		
	5:00:00	18,0	18	23	27	49	51	51	52	52	51	51	52	100	0	144	136	151	167	170	188	192		
	8:00:00	21,0	24	31	36	56	57	57	58	58	57	57	58	100	0	144	130	143	158	163	182	186		
	11:00:00	24,0	28	35	41	61	61	61	64	64	63	63	64	100	0	144	126	139	153	158	176	180		
	14:00:00	27,0	32	40	45	65	66	66	67	67	66	66	67	100	0	144	122	134	149	154	173	177		
2/10/201	17:00:00	30,0	33	42	50	67	68	68	69	69	68	68	69	100	0	144	121	132	144	152	171	175		
	20:00:00	33,0	34	43	52	69	71	71	72	72	71	71	72	100	0	144	120	131	142	150	168	172		
	22:00:00	35,0	37	48	56	75	77	77	78	78	77	77	78	100	0	144	117	126	138	144	162	166		
	1:00:00	38,0	43	55	61	82	84	84	85	85	84	84	85	100	0	144	111	119	133	137	155	159		
	4:00:00	41,0	48	61	70	88	90	90	91	91	90	90	91	100	0	144	106	113	124	131	149	153		
2/11/201	7:00:00	44,0	53	67	74	94	96	96	97	97	96	96	97	100	0	144	101	107	120	125	143	147		
	10:00:00	47,0	59	72	81	100	102	102	103	103	102	102	103	100	0	144	95	102	113	119	137	141		
	13:00:00	50,0	66	78	85	110	112	112	113	113	112	112	113	100	0	144	88	96	109	109	127	131		
	16:00:00	53,0	71	84	95	118	120	120	121	121	120	120	121	100	0	144	83	90	99	101	119	123		
	19:00:00	56,0	77	93	103	127	129	129	130	130	129	129	130	100	0	144	77	81	91	92	110	114		
2/11/201	22:00:00	59,0	82	101	108	135	138	138	139	139	138	138	139	100	0	145	72	73	86	84	101	105		
	1:00:00	62,0	88	108	117	144	146	146	147	147	146	146	147	100	0	146	66	66	77	75	93	97		
	4:00:00	65,0	95	115	127	154	157	157	158	158	157	157	158	100	0	147	59	59	67	65	82	86		
	8:00:00	69,0	102	120	134	162	164	164	165	165	164	164	165	100	0	148	52	54	60	57	75	79		
	10:00:00	71,0	105	124	140	172	174	174	175	175	174	174	175	100	0	149	49	50	54	47	65	69		
11:00:00	72,0	108	126	142	174	176	176	177	177	176	176	177	100	0	150	46	48	52	45	63	67			

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 7
PRUEBA PILOTO No. 2
PÉRDIDAS DE CARGA Y TURBIEDADES EN FILTRO PILOTO No. 1, 2 y 3
Condiciones de prueba: Tasa de filtración constante = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	TURBIEDAD (NTU)			PÉRDIDAS DE CARGA (cm)																				
			Afluente	Efluente			FILTRO No 1				FILTRO No 2				FILTRO No 3											
				Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	ALTURA DE PEZÓMETRO (cm)				ALTURA DE PEZÓMETRO (cm)				ALTURA DE PEZÓMETRO (cm)											
2013-02-11	15:00:00	0,0	0,87	0,31	0,29	0,36	0	4	7	13	36	38	95	0	4	7	12	34	36	95	0	4	7	12	31	33
	17:00:00	2,0	0,82	0,29	0,3	0,35	0	5	9	14	38	40	95	0	5	8	13	36	38	95	0	5	8	13	33	35
	18:00:00	3,0	1,04	0,26	0,33	0,36	0	8	12	16	40	41	95	0	7	10	15	38	40	95	0	6	10	15	35	36
	21:00:00	6,0	1,1	0,16	0,21	0,25	0	10	14	19	44	45	95	0	9	13	19	43	45	95	0	9	13	19	41	42
	0:00:00	9,0	1,63	0,3	0,36	0,41	0	16	22	27	55	56	95	0	15	17	23	49	51	95	0	14	17	24	46	48
	3:00:00	12,0	1,74	0,23	0,3	0,25	0	22	29	34	63	65	95	0	21	24	27	60	62	95	0	20	25	32	52	53
2013-02-12	6:00:00	15,0	1,4	0,23	0,23	0,25	0	25	34	40	75	77	95	0	23	29	32	72	74	95	0	24	30	38	67	69
	9:00:00	18,0	1,1	0,13	0,23	0,25	0	32	38	45	82	84	95	0	29	38	41	77	79	95	0	31	36	39	74	76
	12:00:00	21,0	1,28	0,36	0,33	0,34	0	37	48	58	98	100	95	0	32	41	51	92	95	95	0	33	42	51	85	86
	15:00:00	24,0	2,27	0,36	0,45	0,47	0	41	54	64	109	110	95	0	34	45	55	100	103	95	0	36	46	56	91	93
	18:00:00	27,0	1,1	0,32	0,42	0,43	0	42	55	66	115	117	95	0	38	50	61	107	109	95	0	41	52	62	99	101
	21:00:00	30,0	4,37	1,13	1,21	1,46	0	46	62	73	120	122	95	0	44	58	70	112	114	95	0	49	63	74	105	107
2013-02-13	0:00:00	33,0	4,82	1,35	1,42	1,4	0	53	70	83	137	139	95	0	55	71	84	129	131	95	0	56	72	84	116	118
	4:00:00	37,0	1,99	0,76	0,87	0,86	0	64	87	101	171	173	95	0	62	84	99	153	154	95	0	66	87	101	141	143
	8:00:00	41,0	1,43	0,6	0,68	0,75	0	67	93	108	184	186	95	0	66	90	106	163	165	95	0	69	92	106	152	155
	11:00:00	44,0	1,24	0,63	0,65	0,69	0	72	103	120	196	198	95	0	65	95	114	178	180	95	0	73	99	115	166	168
	14:00:00	47,0	1,15	0,55	0,62	0,68	0	78	111	129	203	205	95	0	70	99	117	181	183	95	0	78	106	123	170	172
	17:00:00	50,0	1,62	0,69	0,65	0,78	0	84	120	140	213	216	95	0	73	101	120	190	192	95	0	80	110	128	180	182
2013-02-14	20:00:00	55,0	1,4	0,83	0,58	0,7	0	90	129	149	231	233	95	0	75	108	125	200	203	95	0	88	120	138	191	193
	23:00:00	56,0	1,28	0,7	0,54	0,58	0	95	135	156	244	246	95	0	80	117	136	215	217	95	0	94	131	150	202	204
	0:00:00	57,0	0,92		0,51	0,57							95	0	82	125	144	217	219	95	0	99	136	155	205	207
	3:00:00	60,0	0,88		0,55	0,51							95	0	87	132	149	226	229	95	0	105	141	161	212	215
	6:00:00	63,0	0,9		0,53	0,5							95	0	93	146	160	239	241	95	0	111	147	168	227	229
	9:00:00	66,0	0,99		0,57	0,46							95	0	103	156	176	258	260	95	0	120	157	175	237	239

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 9
PRUEBA No. 2 EN FILTRO PILOTO No. 2
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 2													
			CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE													
			H disponible = H - (Hf total)													
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (Hf) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)													
			10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244
2013-02-11	15:00:00	0,0	4	7	12	34	36	37		144	150	167	182	185	203	207
	17:00:00	2,0	5	8	13	36	38	39		144	149	166	181	183	201	205
	18:00:00	3,0	7	10	15	38	40	41		144	147	164	179	181	199	203
	21:00:00	6,0	9	13	19	43	45	46		144	145	161	175	176	194	198
	0:00:00	9,0	15	17	23	49	51	52		144	139	157	171	170	188	192
2013-02-12	3:00:00	12,0	21	24	27	60	62	63		144	133	150	167	159	177	181
	6:00:00	15,0	23	29	32	72	74	75		144	131	145	162	147	165	169
	9:00:00	18,0	29	38	41	77	79	80		144	125	136	153	142	160	164
	12:00:00	21,0	32	41	51	92	95	96		144	122	133	143	127	144	148
	15:00:00	24,0	34	45	55	100	103	104		144	120	129	139	119	136	140
	18:00:00	27,0	38	50	61	107	109	110		144	116	124	133	112	130	134
	21:00:00	30,0	44	58	70	112	114	115		144	110	116	124	107	125	129
2013-02-13	0:00:00	33,0	55	71	84	129	131	132		144	99	103	110	90	108	112
	4:00:00	37,0	62	84	99	153	154	155		144	92	90	95	66	85	89
	8:00:00	41,0	66	90	106	163	165	166		144	88	84	88	56	74	78
	11:00:00	44,0	65	95	114	178	180	181		144	89	79	80	41	59	63
	14:00:00	47,0	70	99	117	181	183	184		144	84	75	77	38	56	60
	17:00:00	50,0	73	101	120	190	192	193		144	81	73	74	29	47	51
	20:00:00	53,0	75	108	125	200	203	204		144	79	66	69	19	36	40
2013-02-14	23:00:00	56,0	80	117	136	215	217	218		144	74	57	58	4	22	26
	0:00:00	57,0	82	125	144	217	219	220		145	72	49	50	2	20	24
	3:00:00	60,0	87	132	149	226	229	230		146	67	42	45	-7	10	14
	6:00:00	63,0	93	146	160	239	241	242		147	61	28	34	-20	-2	2
	9:00:00	66,0	103	156	176	258	260	261		148	51	18	18	-39	-21	-17

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 11

PRUEBA PILOTO No. 3

PÉRDIDAS DE CARGA Y TURBIEDADES EN FILTROS 7 Y 8 DEL PROTOTIPO Y FILTROS PILOTO

Condiciones de prueba: Tasa filtrado constante: Fase 1 = 315 m³/m²/d, Fase 2 = 275 m³/m²/d, carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	TURBIEDAD (NTU)										PÉRDIDAS DE CARGA (cm)													
			Efluente Prototipo			Efluente Piloto			FILTRO No. 1					FILTRO No. 2					FILTRO No. 3							
			Aluente	Filtro 7	Filtro 8	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	0	10	30	50	75	95	0	10	30	50	75	95	0	10	30	50	75	95
201 -02-19	15:00:00	0.0	1.88	0.79	0.68	0.58	0.52	0.52	0	4	7	12	34	36	0	4	6	11	33	36	0	4	5	8	26	28
	16:00:00	1.0	3.6	0.3	0.3	0.34	0.43	0.46	0	6	12	16	38	40	0	5	7	11	35	37	0	3	6	10	29	31
	17:00:00	2.0	4.48	1.26	1.34	0.41	0.52	0.42	0	7	13	19	41	43	0	6	9	13	36	38	0	6	8	13	33	35
	18:00:00	3.0	6	2.1	2.28	0.23	0.25	0.33	0	9	14	21	47	49	0	8	12	17	46	48	0	7	11	16	45	47
	20:00:00	5.0	2.7	1.56	1.68	0.42	0.47	0.4	0	13	20	25	57	59	0	11	15	22	56	58	0	11	16	22	51	53
	21:00:00	6.0	1.78	1.46	1.22	0.45	0.54	0.67	0	14	21	29	65	67	0	13	17	24	60	62	0	13	17	25	54	56
	22:00:00	7.0	0.95	0.73	0.74	0.42	0.45	0.51	0	16	23	30	68	70	0	14	19	26	63	65	0	15	20	26	57	59
	23:00:00	8.0	1	0.51	0.51	0.45	0.32	0.38	0	16	24	32	70	72	0	16	21	27	64	66	0	16	20	27	56	58
	00:00:00	9.0	0.75	0.4	0.51	0.49	0.28	0.34	0	17	26	34	72	74	0	16	22	28	63	65	0	17	22	29	58	60
	1:00:00	10.0	1	0.44	0.46	0.27	0.28	0.23	0	18	28	35	75	77	0	18	24	31	67	69	0	20	25	32	61	63
3:00:00	13.0	1.07	0.43	0.4	0.22	0.23	0.17	0	22	32	40	82	84	0	22	28	34	73	75	0	23	29	36	67	69	
6:30:00	16.5	1.07	0.55	0.53	0.17	0.26	0.3	0	27	38	47	90	92	0	26	35	42	82	84	0	28	36	43	75	77	
9:00:00	19.0	1.2	0.9	0.65	0.16	0.26	0.15	0	30	42	51	95	97	0	29	39	46	87	89	0	32	40	47	79	81	
12:00:00	22.0	0.9	0.4	0.36	0.16	0.18	0.19	0	34	47	58	104	106	0	32	44	53	93	95	0	36	46	55	87	89	
14:00:00	24.0	0.86	0.38	0.37	0.24	0.24	0.22	0	38	52	63	111	113	0	34	48	55	101	103	0	40	50	59	93	95	
15:00:00	25.0	1.6	0.48	0.43	0.27	0.26	0.29	0	38	54	65	112	114	0	37	52	60	103	105	0	42	54	63	97	99	
17:00:00	27.0	1.55	0.56	0.42	0.26	0.26	0.32	0	41	58	69	115	117	0	40	57	65	107	109	0	41	55	65	102	104	
18:00:00	28.0	1.3	0.62	0.48	0.32	0.34	0.37	0	42	60	72	119	121	0	42	60	68	111	113	0	44	58	68	105	107	
21:00:00	31.0	1.28	0.69	0.58	0.37	0.38	0.28	0	46	65	78	128	130	0	45	64	75	120	122	0	49	62	73	114	116	
23:00:00	33.0	1.37	0.71	0.6	0.39	0.36	0.32	0	48	69	83	134	136	0	48	68	79	127	129	0	53	67	78	120	122	
3:00:00	37.0	1.4	0.64	0.65	0.40	0.36	0.33	0	53	76	91	150	152	0	52	73	86	140	142	0	58	77	89	132	134	
7:00:00	41.0	0.88	0.6	0.64	0.36	0.34	0.29	0	58	85	99	164	166	0	56	81	95	151	153	0	66	86	101	143	145	
9:00:00	43.0	0.91	0.47	0.58	0.36	0.32	0.28	0	61	88	105	169	171	0	58	84	100	157	159	0	66	88	103	149	151	
11:00:00	45.0	1.3	0.53	0.61	0.37	0.35	0.32	0	64	92	110	175	177	0	60	87	104	164	166	0	72	96	110	157	159	
13:00:00	47.0	1.12	0.65	0.56	0.39	0.38	0.34	0	66	95	113	182	184	0	63	90	107	169	171	0	75	100	115	161	163	
15:00:00	49.0	0.98	0.63	0.58	0.45	0.36	0.36	0	70	98	117	188	190	0	66	93	111	175	177	0	78	104	118	167	169	
18:00:00	52.0	0.94	0.58	0.6	0.43	0.4	0.41	0	73	105	123	196	198	0	71	101	120	185	187	0	85	114	126	175	177	
21:00:00	55.0	0.84	0.49	0.57	0.59	0.43	0.43	0	78	110	131	206	208	0	73	104	124	191	193	0	89	117	131	180	182	
23:00:00	57.0	0.83	0.58	0.63	0.64	0.5	0.58	0	80	114	136	213	215	0	76	108	130	197	199	0	91	120	135	186	188	
3:00:00	60.0	0.88	0.59		0.55	0.45	0.47	0	84	121	146	229	231	0	79	111	137	209	211	0	99	128	141	196	198	
5:00:00	63.0	0.93	0.7		0.58	0.38	0.45	0	87	126	152	241	243	0	83	117	142	219	221	0	101	130	150	208	210	
8:00:00	66.0	1.25	0.81		0.47	0.34	0.41	0	92	133	158	248	250	0	88	123	146	229	231	0	104	140	158	214	216	
11:00:00	69.0	0.8	0.64			0.5	0.56	0						0	91	125	150	233	235	0	108	146	161	221	223	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 12
PRUEBA No. 3 EN FILTRO PILOTO No. 1
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante: Fase 1 = 315 m³/m²/d, Fase 2 = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 1												CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE											
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)												H disponible = H - (HF total)											
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244	0	144	150	167	182	185	203	206	
2013-02-19	15:00:00	0	0	4	7	12	34	36	38	38	95	100	0	144	144	150	167	182	185	203	206					
	16:00:00	1	0	6	12	16	38	40	42	42	95	100	0	144	148	162	178	181	199	202						
	17:00:00	2	0	7	13	19	41	43	45	45	95	100	0	144	147	161	175	178	196	199						
	18:00:00	3	0	9	14	21	47	49	51	51	95	100	0	144	145	160	173	172	190	193						
	20:00:00	5	0	13	20	25	57	59	61	61	95	100	0	144	141	154	169	162	180	183						
	21:00:00	6	0	14	21	29	65	67	69	69	95	100	0	144	140	153	165	154	172	175						
	22:00:00	7	0	16	23	30	68	70	72	72	95	100	0	144	138	151	164	151	169	172						
	23:00:00	8	0	16	24	32	70	72	74	74	95	100	0	144	138	150	162	149	167	170						
2013-02-20	0:00:00	9	0	17	26	34	72	74	76	76	95	100	0	144	137	148	160	147	165	168						
	1:00:00	10	0	18	28	35	75	77	79	79	95	100	0	144	136	146	159	144	162	165						
	3:00:00	13	0	22	32	40	82	84	86	86	95	100	0	144	132	142	154	137	155	158						
	6:30:00	17	0	27	38	47	90	92	94	94	95	100	0	144	127	136	147	129	147	150						
	9:00:00	19	0	30	42	51	95	97	99	99	95	100	0	144	124	132	143	124	142	145						
	12:00:00	22	0	34	47	58	104	106	108	108	95	100	0	144	120	127	136	115	133	136						
	14:00:00	24	0	38	52	63	111	113	115	115	95	100	0	144	116	122	131	108	126	129						
	15:00:00	25	0	38	54	65	112	114	116	116	95	100	0	144	116	120	129	107	125	128						
17:00:00	27	0	41	58	69	115	117	119	119	95	100	0	144	113	116	125	104	122	125							
18:00:00	28	0	42	60	72	119	121	123	123	95	100	0	144	112	114	122	100	118	121							
21:00:00	31	0	46	65	78	128	130	132	132	95	100	0	144	108	109	116	91	109	112							
23:00:00	33	0	48	69	83	134	136	138	138	95	100	0	144	106	105	111	85	103	106							
2013-02-21	3:00:00	37	0	53	76	91	150	152	154	154	95	100	0	144	101	98	103	69	87	90						
	7:00:00	41	0	58	85	99	164	166	168	168	95	100	0	144	96	89	95	55	73	76						
	9:00:00	43	0	61	88	105	169	171	173	173	95	100	0	144	93	86	89	50	68	71						
	11:00:00	45	0	64	92	110	175	177	179	179	95	100	0	144	90	82	84	44	62	65						
	13:00:00	47	0	66	95	113	182	184	186	186	95	100	0	144	88	79	81	37	55	58						
	15:00:00	49	0	70	98	117	188	190	192	192	95	100	0	144	84	76	77	31	49	52						
	18:00:00	52	0	73	105	123	196	198	200	200	95	100	0	144	81	69	71	23	41	44						
	21:00:00	55	0	78	110	131	206	208	210	210	95	100	0	144	76	64	63	13	31	34						
23:00:00	57	0	80	114	136	213	215	217	217	95	100	0	144	74	60	58	6	24	27							
2013-02-22	2:00:00	60	0	84	121	146	229	231	233	233	95	100	0	144	70	53	48	-10	8	11						
	5:00:00	63	0	87	126	152	241	243	245	245	95	100	0	144	67	48	42	-22	-4	-1						
	8:00:00	66	0	92	133	158	248	250	252	252	95	100	0	144	62	41	36	-29	-11	-8						

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 13
PRUEBA No. 3 EN FILTRO PILOTO No. 2
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante: Fase 1 = 315 m³/m²/d, Fase 2 = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No. 1												CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE																																																																																																																																																																																																																																																															
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)												H disponible = H - (Hf total)																																																																																																																																																																																																																																																															
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244	0	144	150	168	183	186	203	206	0	144	149	167	183	184	202	205	0	144	146	162	177	173	191	194	0	144	143	159	173	166	184	187	0	144	141	157	170	159	177	180	0	144	140	155	168	156	174	177	0	144	138	153	167	155	173	176	0	144	138	152	166	156	174	177	0	144	136	150	163	152	170	173	0	144	132	146	160	146	164	167	0	144	128	139	152	137	155	158	0	144	125	135	148	132	150	153	0	144	122	130	141	126	144	147	0	144	120	126	139	118	136	139	0	144	117	122	134	116	134	137	0	144	114	117	129	112	130	133	0	144	112	114	126	108	126	129	0	144	109	110	119	99	117	120	0	144	106	106	115	92	110	113	0	144	102	101	108	79	97	100	0	144	98	93	99	68	86	89	0	144	96	90	94	62	80	83	0	144	94	87	90	55	73	76	0	144	91	84	87	50	68	71	0	144	88	81	83	44	62	65	0	144	83	73	74	34	52	55	0	144	81	70	70	28	46	49	0	144	78	66	64	22	40	43	0	144	75	63	57	10	28	31	0	144	71	57	52	0	18	21	0	144	66	51	48	-10	8	11	0	145	63	49	44
2013-02-19	15:00:00	0	0	4	6	11	33	36	38	100	95	75	50	30	10	0	144	154	174	194	219	239	244																																																																																																																																																																																																																																																							
	16:00:00	1	5	7	11	35	37	39	99	94	74	49	28	9	0	144	149	167	183	184	202	205																																																																																																																																																																																																																																																								
	17:00:00	2	6	9	13	36	38	40	98	93	73	48	8	0	144	148	165	181	183	201	204																																																																																																																																																																																																																																																									
	18:00:00	3	8	12	17	46	48	50	97	92	72	47	7	0	144	146	162	177	173	191	194																																																																																																																																																																																																																																																									
	20:00:00	5	11	15	21	53	55	57	96	91	71	46	6	0	144	143	159	173	166	184	187																																																																																																																																																																																																																																																									
	21:00:00	6	13	17	24	60	62	64	95	90	70	45	5	0	144	141	157	170	159	177	180																																																																																																																																																																																																																																																									
	22:00:00	7	14	19	26	63	65	67	94	89	69	44	4	0	144	140	155	168	156	174	177																																																																																																																																																																																																																																																									
	23:00:00	8	16	21	27	64	66	68	93	88	68	43	3	0	144	138	153	167	155	173	176																																																																																																																																																																																																																																																									
	0:00:00	9	16	22	28	63	65	67	92	87	67	42	2	0	144	138	152	166	156	174	177																																																																																																																																																																																																																																																									
2013-02-20	1:00:00	10	18	24	31	67	69	71	91	86	66	41	1	0	144	136	150	163	152	170	173																																																																																																																																																																																																																																																									
	3:00:00	13	22	28	34	73	75	77	90	85	65	40	0	0	144	132	146	160	146	164	167																																																																																																																																																																																																																																																									
	6:30:00	17	26	35	42	82	84	86	89	84	64	39	0	0	144	128	139	152	137	155	158																																																																																																																																																																																																																																																									
	9:00:00	19	29	39	46	87	89	91	88	83	63	38	0	0	144	125	135	148	132	150	153																																																																																																																																																																																																																																																									
	12:00:00	22	32	44	53	93	95	97	87	82	62	37	0	0	144	122	130	141	126	144	147																																																																																																																																																																																																																																																									
	14:00:00	24	34	48	55	101	103	105	86	81	61	36	0	0	144	120	126	139	118	136	139																																																																																																																																																																																																																																																									
	15:00:00	25	37	52	60	103	105	107	85	80	60	35	0	0	144	117	122	134	116	134	137																																																																																																																																																																																																																																																									
	17:00:00	27	40	57	65	107	109	111	84	79	59	34	0	0	144	114	117	129	112	130	133																																																																																																																																																																																																																																																									
	18:00:00	28	42	60	68	111	113	115	83	78	58	33	0	0	144	112	114	126	108	126	129																																																																																																																																																																																																																																																									
2013-02-21	21:00:00	31	45	64	75	120	122	124	82	77	57	32	0	0	144	109	109	119	99	117	120																																																																																																																																																																																																																																																									
	23:00:00	33	48	68	79	127	129	131	81	76	56	31	0	0	144	106	106	115	92	110	113																																																																																																																																																																																																																																																									
	3:00:00	37	52	73	86	140	142	144	80	75	55	30	0	0	144	102	102	108	79	97	100																																																																																																																																																																																																																																																									
	7:00:00	41	56	81	95	151	153	155	79	74	54	29	0	0	144	98	98	99	68	86	89																																																																																																																																																																																																																																																									
	9:00:00	43	58	84	100	157	159	161	78	73	53	28	0	0	144	96	96	90	62	80	83																																																																																																																																																																																																																																																									
	11:00:00	45	60	87	104	164	166	168	77	72	52	27	0	0	144	94	94	87	55	73	76																																																																																																																																																																																																																																																									
	13:00:00	47	63	90	107	169	171	173	76	71	51	26	0	0	144	91	91	84	50	68	71																																																																																																																																																																																																																																																									
	15:00:00	49	66	93	111	175	177	179	75	70	50	25	0	0	144	88	88	81	44	62	65																																																																																																																																																																																																																																																									
	18:00:00	52	71	101	120	185	187	189	74	69	49	24	0	0	144	83	83	73	34	52	55																																																																																																																																																																																																																																																									
2013-02-22	21:00:00	55	73	104	124	191	193	195	73	68	48	23	0	0	144	81	81	70	28	46	49																																																																																																																																																																																																																																																									
	23:00:00	57	76	108	130	197	199	201	72	67	47	22	0	0	144	78	78	66	22	40	43																																																																																																																																																																																																																																																									
	2:00:00	60	79	111	137	209	211	213	71	66	46	21	0	0	144	75	75	63	10	28	31																																																																																																																																																																																																																																																									
	5:00:00	63	83	117	142	219	221	223	70	65	45	20	0	0	144	71	71	57	0	18	21																																																																																																																																																																																																																																																									
	8:00:00	66	88	123	146	229	231	233	69	64	44	19	0	0	144	66	66	51	48	8	11																																																																																																																																																																																																																																																									
	11:00:00	69	91	125	150	233	235	237	68	63	43	18	0	0	145	63	63	49	-14	4	7																																																																																																																																																																																																																																																									

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 14
PRUEBA No. 3 EN FILTRO PILOTO No. 3
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa constante: Fase 1 = 315 m³/m²/d, Fase 2 = 275 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 3												CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE																																																																																																																																																																																																																																		
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)												H disponible = H _t - (HF total)																																																																																																																																																																																																																																		
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244	0	144	150	169	186	193	211	214	144	151	168	181	186	204	207	144	147	163	178	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	50	34	36	5	23	26	145	46	28	33	-2	16
2013-02-19	15:00:00	0	0	4	5	8	10	16	26	28	31	30	30	30	100	0	144	150	169	186	193	211	214	144	144	151	168	181	186	204	207	144	147	163	178	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	50	34	36	5	23	26	145	46	28	33	-2	16	19
	2013-02-20	16:00:00	1	0	3	6	10	13	16	29	31	33	33	33	33	100	0	144	151	168	181	186	190	208	211	144	144	148	163	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	50	34	36	5	23	26	145	46	28	33	-2	16	19						
		17:00:00	2	0	6	13	21	29	33	45	33	35	37	37	37	100	0	144	151	168	181	186	190	208	211	144	144	148	163	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	50	34	36	5	23	26	145	46	28	33	-2	16	19						
		18:00:00	3	0	7	11	16	16	22	45	33	35	37	37	37	100	0	144	151	168	181	186	190	208	211	144	144	148	163	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	50	34	36	5	23	26	145	46	28	33	-2	16	19						
		20:00:00	5	0	11	16	22	22	25	51	33	35	37	37	37	100	0	144	151	168	181	186	190	208	211	144	144	148	163	174	192	195	144	143	158	172	168	186	189	144	141	157	169	165	183	186	144	139	154	168	162	180	183	144	138	154	167	163	181	184	144	137	152	165	161	179	182	144	134	149	162	158	176	179	144	131	145	158	152	170	173	144	126	138	151	144	162	165	144	122	134	147	140	158	161	144	118	128	139	132	150	153	144	114	124	135	126	144	147	144	112	120	131	122	140	143	144	113	119	129	117	135	138	144	110	116	126	114	132	135	144	105	112	121	105	123	126	144	101	107	116	99	117	120	144	96	97	105	87	105	108	144	88	88	93	76	94	97	144	86	86	91	70	88	91	144	82	78	84	62	80	83	144	79	74	79	58	76	79	144	76	70	76	52	70	73	144	69	60	68	44	62	65	144	65	57	63	39	57	60	144	63	54	59	33	51	54	144	55	46	53	23	41	44	144	53	44	44	11	29	32	144	5																		

CUADRO No. 15
PRUEBA PILOTO No. 4
PÉRDIDAS DE CARGA Y TURBIEDADES
Condiciones de prueba: Tasa de filtración declinante, Tasa de arranque = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	TURBIEDAD (NTU)			PÉRDIDAS DE CARGA (cm)																					
				Etienne Filtro			FILTRO No 1					FILTRO No 2					FILTRO No 3											
				Aluente	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	0	10	30	50	75	95	0	10	30	50	75	95	0	10	30	50	75	95			
201 -02-25	10:00:00	0.0			0.40	0.33	0.46	0.46	0	8	15	24	44	44	46	46	0	6	14	25	40	43	0	5	7	12	33	35
	12:00:00	2.0			0.33	0.22	0.25	0.25	0	9	16	26	49	51	51	51	0	7	15	25	41	44	0	6	9	14	35	37
	15:00:00	5.0			0.27	0.33	0.35	0.35	0	12	21	29	56	57	57	57	0	9	17	28	47	49	0	8	14	20	41	44
	18:00:00	8.0			0.23	0.37	0.3	0.3	0	16	25	34	64	66	66	66	0	11	20	31	55	57	0	14	18	25	47	49
	21:00:00	11.0			0.24	0.36	0.26	0.26	0	19	29	38	71	73	73	73	0	17	27	40	64	66	0	20	26	33	56	58
	23:00:00	13.0			0.35	0.48	0.35	0.35	0	23	32	43	77	79	79	79	0	22	33	44	70	72	0	25	31	38	60	63
	4:00:00	18.0			0.19	0.22	0.18	0.18	0	32	44	53	94	97	97	97	0	34	48	60	86	88	0	35	43	52	79	82
	8:00:00	22.0			0.21	0.24	0.19	0.19	0	40	53	63	103	105	105	105	0	41	56	67	95	98	0	42	52	63	86	87
	10:00:00	24.0			0.40	0.2	0.2	0.2	0	42	56	67	108	110	110	110	0	44	59	71	98	101	0	45	55	68	89	89
	13:00:00	27.0			0.31	0.24	0.31	0.31	0	45	61	72	118	120	120	120	0	48	65	76	108	110	0	50	62	73	97	98
15:00:00	29.0			0.25	0.31	0.26	0.26	0	48	65	77	127	129	129	129	0	53	70	82	115	117	0	52	67	78	103	105	
16:30:00	30.5			0.28	0.32	0.26	0.26	0	49	68	82	130	132	132	132	0	55	73	84	119	121	0	55	70	81	108	110	
20:00:00	34.0			0.30	0.28	0.33	0.33	0	54	73	86	137	140	140	140	0	60	79	91	128	130	0	59	77	87	117	116	
22:00:00	36.0			0.32	0.3	0.33	0.33	0	56	76	92	143	145	145	145	0	64	81	94	135	137	0	63	80	90	121	123	
3:00:00	41.0			0.40	0.42	0.48	0.48	0	62	87	104	158	160	160	160	0	70	91	105	150	152	0	69	89	100	137	139	
6:00:00	44.0			0.35	0.46	0.51	0.51	0	65	95	113	168	170	170	170	0	75	100	115	160	162	0	73	95	106	145	147	
8:00:00	46.0			0.28	0.38	0.45	0.45	0	67	98	116	171	173	173	173	0	78	104	118	165	168	0	75	99	110	151	153	
10:00:00	48.0			0.52	0.32	0.35	0.35	0	70	104	120	175	183	183	183	0	79	105	120	168	170	0	77	102	115	153	155	
12:00:00	50.0			0.30	0.38	0.24	0.24	0	71	109	124	178	180	180	180	0	80	108	122	173	175	0	78	106	119	156	158	
15:00:00	53.0			0.20	0.25	0.16	0.16	0	72	110	126	180	182	182	182	0	83	112	126	178	180	0	81	109	123	160	162	
17:00:00	55.0							0	73	112	128	184	186	186	186	0	85	115	129	181	183	0	84	113	126	164	166	
20:00:00	58.0			0.29	0.26	0.22	0.22	0	76	118	134	194	196	196	196	0	82	113	129	190	192	0	91	121	135	174	176	
22:00:00	60.0			0.60	0.51	0.43	0.43	0	78	121	137	201	203	203	203	0	87	118	134	196	198	0	94	125	139	180	182	
3:00:00	65.0							0	87	132	149	217	219	219	219	0	98	130	146	210	213	0	103	136	152	196	198	
7:00:00	68.0			0.21	0.29	0.28	0.28	0	91	139	156	229	231	231	231	0	102	138	154	222	224	0	107	143	159	208	210	
11:00:00	73.0			0.27	0.2	0.15	0.15	0	92	142	159	233	235	235	235	0	104	140	157	225	227	0	110	146	162	213	215	
13:00:00	75.0			0.33	0.28	0.24	0.24	0	92	143	161	234	236	236	236	0	104	141	158	226	228	0	110	147	163	214	216	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 16
PRUEBA No. 4 EN FILTRO PILOTO No. 1
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa de filtración declinante, Tasa de arranque = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 1																
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)																
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244		
CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE																			
H disponible = H - (Hf total)																			
201 -02-25	10:00:00	0,0	0	8	15	24	44	46	48	100	144	146	159	170	175	193	244		
	12:00:00	2,0	0	9	16	26	49	51	53	100	144	145	158	168	170	188	191		
	15:00:00	5,0	0	12	21	29	56	57	59	100	144	142	153	165	163	182	185		
	18:00:00	8,0	0	16	25	34	64	66	68	100	144	138	149	160	155	173	176		
	21:00:00	11,0	0	19	29	38	71	73	75	100	144	135	145	156	148	166	169		
	23:00:00	13,0	0	23	32	43	77	79	81	100	144	131	142	151	142	160	163		
	4:00:00	18,0	0	32	44	53	94	97	99	100	144	122	130	141	125	142	145		
	8:00:00	22,0	0	40	53	63	103	105	107	100	144	114	121	131	116	134	137		
201 -02-2	10:00:00	24,0	0	42	56	67	108	110	112	100	144	112	118	127	111	129	132		
	13:00:00	27,0	0	45	61	72	118	120	122	100	144	109	113	122	101	119	122		
	15:00:00	29,0	0	48	65	77	127	129	131	100	144	106	109	117	92	110	113		
	16:30:00	30,5	0	49	68	82	130	132	134	100	144	105	106	112	89	107	110		
	20:00:00	34,0	0	54	73	86	117	140	142	100	144	100	101	108	82	99	102		
	22:00:00	36,0	0	56	76	92	143	145	147	100	144	98	98	102	76	94	97		
	3:00:00	41,0	0	62	87	104	158	160	162	100	144	92	87	90	61	79	82		
	6:00:00	44,0	0	65	95	113	168	170	172	100	144	89	79	81	51	69	72		
201 -02-27	8:00:00	46,0	0	67	98	116	171	173	175	100	144	87	76	78	48	66	69		
	10:00:00	48,0	0	70	104	120	175	183	185	100	144	84	70	74	44	56	59		
	12:00:00	50,0	0	71	109	124	178	180	182	100	144	83	65	70	41	59	62		
	15:00:00	53,0	0	72	110	126	180	182	184	100	144	82	64	68	39	57	60		
	17:00:00	55,0	0	73	112	128	184	186	188	100	144	81	62	66	35	53	56		
	20:00:00	58,0	0	76	118	134	194	196	198	100	144	78	56	60	25	43	46		
	22:00:00	60,0	0	78	121	137	201	203	205	100	144	76	53	57	18	36	39		
	3:00:00	65,0	0	87	132	149	217	219	221	100	144	67	42	45	2	20	23		
201 -02-2	7:00:00	69,0	0	91	139	156	229	231	233	100	144	63	35	38	-10	8	11		
	11:00:00	73,0	0	92	142	159	233	235	237	100	144	62	32	35	-14	4	7		
	13:00:00	75,0	0	92	143	161	234	236	238	100	144	62	31	33	-15	3	6		

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 17
PRUEBA No. 4 EN FILTRO PILOTO No. 2
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa de filtración declinante, Tasa de arranque = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 2														
			CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE														
			H disponible = H - (Hf total)														
PERDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)			0	10	30	50	75	95	100	144	154	174	194	219	239	244	
2013-02-25	10:00:00	0,0	0	6	14	25	40	43	45	100	144	148	160	169	179	196	199
	12:00:00	2,0	0	7	15	25	41	44	46	144	144	147	159	169	178	195	198
	15:00:00	5,0	0	9	17	28	47	49	51	144	144	145	157	166	172	190	193
	18:00:00	8,0	0	11	20	31	55	57	59	144	144	143	154	163	164	182	185
	21:00:00	11,0	0	17	27	40	64	66	68	144	144	137	147	154	155	173	176
	23:00:00	13,0	0	22	33	44	70	72	74	144	144	132	141	150	149	167	170
2013-02-26	4:00:00	18,0	0	34	48	60	86	88	90	144	144	120	126	134	133	151	154
	8:00:00	22,0	0	41	56	67	95	98	100	144	144	113	118	127	124	141	144
	10:00:00	24,0	0	44	59	71	98	101	103	144	144	110	115	123	121	138	141
	13:00:00	27,0	0	48	65	76	108	110	112	144	144	106	109	118	111	129	132
	15:00:00	29,0	0	53	70	82	115	117	119	144	144	101	104	112	104	122	125
	16:30:00	30,5	0	55	73	84	119	121	123	144	144	99	101	110	100	118	121
201 -02-27	20:00:00	34,0	0	60	79	91	128	130	132	144	144	94	95	103	91	109	112
	22:00:00	36,0	0	64	81	94	135	137	139	144	144	90	93	100	84	102	105
	3:00:00	41,0	0	70	91	105	150	152	154	144	144	84	83	89	69	87	90
	6:00:00	44,0	0	75	100	115	160	162	164	144	144	79	74	79	59	77	80
	8:00:00	46,0	0	78	104	118	165	168	170	144	144	76	70	76	54	71	74
	10:00:00	48,0	0	79	105	120	168	170	172	144	144	75	69	74	51	69	72
201 -02-27	12:00:00	50,0	0	80	108	122	173	175	177	144	144	74	66	72	46	64	67
	15:00:00	53,0	0	83	112	126	178	180	182	144	144	71	62	68	41	59	62
	17:00:00	55,0	0	85	115	129	181	183	185	144	144	69	59	65	38	56	59
	20:00:00	58,0	0	82	113	129	190	192	194	144	144	72	61	65	29	47	50
	22:00:00	60,0	0	87	118	134	196	198	200	144	144	67	56	60	23	41	44
	3:00:00	65,0	0	98	130	146	210	213	215	144	144	56	44	48	9	26	29
201 -02-2	7:00:00	69,0	0	102	138	154	222	224	226	144	144	52	36	40	-3	15	18
	11:00:00	73,0	0	104	140	157	225	227	229	144	144	50	34	37	-6	12	15
	13:00:00	75,0	0	104	141	158	226	228	230	144	144	50	33	36	-7	11	14

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 18

PRUEBA No. 4 EN FILTRO PILOTO No. 3
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE
Condiciones de prueba: Tasa de filtración declinante, Tasa de arranque = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	FILTRO PILOTO No 3													CARGA HIDRÁULICA TOTAL DISPONIBLE									
			PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (HFT) MEDIDA A DIFERENTES ALTURAS DEL LECHO FILTRANTE(cm)													H disponible = H - (Hf total)									
			0	10	30	50	75	95	100	0	144	154	174	194	219	239	244								
201 -02-25	10:00:00	0,0	0	5	7	12	33	35	37	39	46	51	60	65	84	0	144	149	167	182	186	204	207		
	12:00:00	2,0	6	9	14	35	37	39	46	51	60	65	84	89	100	144	148	165	180	184	202	205			
	15:00:00	5,0	8	14	20	41	44	46	51	58	63	65	84	89	100	144	146	160	174	178	195	198			
	18:00:00	8,0	14	18	25	47	49	51	58	63	65	84	89	100	107	144	140	156	169	172	190	193			
	21:00:00	11,0	20	26	33	56	58	60	63	65	84	89	100	107	112	144	134	148	161	163	181	184			
	23:00:00	13,0	25	31	38	60	63	65	84	89	100	107	112	118	125	144	129	143	156	159	176	179			
	4:00:00	18,0	35	43	52	79	82	84	89	91	98	105	110	116	123	144	119	131	142	140	157	160			
201 -02-2	8:00:00	22,0	42	52	63	86	87	89	91	98	105	110	116	123	144	112	122	131	133	152	155				
	10:00:00	24,0	45	55	68	89	89	91	98	105	110	116	123	144	109	119	126	130	150	153					
	13:00:00	27,0	50	62	73	97	98	100	107	112	118	125	132	144	104	112	121	122	141	144					
	15:00:00	29,0	52	67	78	103	105	107	112	118	125	132	144	102	107	116	116	134	137						
	16:30:00	30,5	55	70	81	108	110	112	118	125	132	144	99	104	113	111	129	132							
	20:00:00	34,0	59	77	87	117	116	118	125	132	144	95	97	107	102	123	126								
	22:00:00	36,0	63	80	90	121	123	125	132	144	91	94	104	98	116	119									
201 -02-27	3:00:00	41,0	69	89	100	137	139	141	149	144	85	85	94	82	100	103									
	6:00:00	44,0	73	95	106	145	147	149	155	144	81	79	88	74	92	95									
	8:00:00	46,0	75	99	110	151	153	155	160	144	79	75	84	68	86	89									
	10:00:00	48,0	77	102	115	153	155	157	164	144	77	72	79	66	84	87									
	12:00:00	50,0	78	106	119	156	158	160	168	144	76	68	75	63	81	84									
	15:00:00	53,0	81	109	123	160	162	164	178	144	73	65	71	59	77	80									
	17:00:00	55,0	84	113	126	164	166	168	184	144	70	61	68	55	73	76									
201 -02-2	20:00:00	58,0	91	121	135	174	176	178	198	144	63	53	59	45	63	66									
	22:00:00	60,0	94	125	139	180	182	184	200	144	60	49	55	39	57	60									
	3:00:00	65,0	103	136	152	196	198	200	212	144	51	38	42	23	41	44									
	7:00:00	69,0	107	143	159	208	210	212	217	144	47	31	35	11	29	32									
	11:00:00	73,0	110	146	162	213	215	217	218	144	44	28	32	6	24	27									
	13:00:00	75,0	110	147	163	214	216	218	144	44	27	31	5	23	26										

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 19
PRUEBA PILOTO No. 4
PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL Y TASA DE FILTRACION
Condiciones de prueba: Tasa de filtración declinante, Tasa de arranque = 315 m³/m²/d y carga hidráulica constante

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)			Pérdida de Carga Total en Filtros Piloto		
			F1	F2	F3	F1	F2	F3
2/25/201	10:00:00	0	315	315	315	46	43	35
	12:00:00	2	311	314	314	51	44	37
	15:00:00	5	308	310	313	57	49	44
	18:00:00	8	306	309	312	66	57	49
	21:00:00	11	288	295	299	73	66	58
	23:00:00	13	283	286	291	79	72	63
	4:00:00	18	273	278	284	97	88	82
	8:00:00	22	278	285	290	105	98	87
	10:00:00	24	274	280	285	110	101	89
	13:00:00	27	270	278	281	120	110	98
2/2 /201	15:00:00	29	260	271	275	129	117	105
	16:30:00	31	260	270	276	132	121	110
	20:00:00	34	253	265	270	140	130	116
	22:00:00	36	260	271	276	145	137	123
	3:00:00	41	248	257	267	160	152	139
	6:00:00	44	239	257	262	170	162	147
	8:00:00	46	235	249	257	173	168	153
	10:00:00	48	231	245	252	177	170	155
	12:00:00	50	235	250	260	180	175	158
	15:00:00	53	229	247	258	182	180	162
	17:00:00	55	226	242	254	186	183	166
	20:00:00	58	222	238	250	196	192	176
	22:00:00	60	207	230	243	203	198	182
	3:00:00	65	198	220	235	219	213	198
	7:00:00	69	195	218	230	231	224	210
	11:00:00	73	193	215	227	235	227	215
	13:00:00	75	192	213	225	236	228	216
	Pro medio		251	2	270			

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 20

PRUEBA PILOTO No. 1

VALORES CARACTERÍSTICOS Y % DE PRESENTACIÓN DE TURBIEDAD

	AFLUENTE		FILTRO 1		FILTRO 2		FILTRO 3	
	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad
3.0	1,20	3,00	0,33	3	0,36	3	0,38	
3.0	1,03	1,00	0,32	3	0,34	3	0,36	
3.0	1,00	3,00	0,31	3	0,34	3	0,36	
3.0	1,00	3,00	0,3	3	0,34	2	0,35	
3.0	0,96	2,00	0,3	2	0,32	3	0,35	
3.0	0,95	3,00	0,29	3	0,32	3	0,33	
3.0	0,91	2,00	0,28	3	0,32	2	0,32	
3.0	0,91	3,00	0,28	3	0,3	1	0,32	
3.0	0,90	3,00	0,28	3,5	0,29	3	0,31	
4.0	0,90	4,00	0,28	3	0,29	3	0,31	
2.0	0,90	3,00	0,27	2	0,29	3,5	0,30	
2.0	0,89	3,00	0,27	3	0,29	3	0,30	
3.0	0,89	3,00	0,27	3	0,28	3	0,30	
2.0	0,86	3,00	0,27	3	0,28	3	0,30	
3.0	0,85	3,00	0,26	3	0,27	3	0,29	
3.0	0,84	2,00	0,26	4	0,27	2	0,28	
3.0	0,83	3,00	0,26	2	0,27	3	0,27	
3.0	0,81	3,00	0,26	1	0,27	3	0,27	
3.0	0,80	3,00	0,26	3	0,26	3	0,26	
3.0	0,74	3,50	0,25	3	0,26	3	0,26	
1.0	0,72	3,00	0,25	3,5	0,25	3	0,26	
3.5	0,70	3,00	0,25	3	0,25	3,5	0,25	
3.0	0,70	3,00	0,24	3	0,25	4	0,25	
3.0	0,70	3,00	0,24	3	0,24	3	0,24	
3.5	0,60	3,50	0,22	3	0,23	3	0,24	
Total (horas)	72,0			72		72		
Promedio		0,86		0,27		0,29		0,30
Maximo		1,20		0,33		0,36		0,38
Minimo		0,60		0,22		0,23		0,24
% Tiempo ≤ 1,0 UTN			72,00	100,00	72,00	100,00	72,00	100,00
% Tiempo ≤ 0,50 UTN			72,00	100,00	144,00	29,86	72,00	100,00
% Tiempo ≤ 0,25 UTN			19,00	26,39	21,50	29,86	22,50	31,25

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 21

PRUEBA PILOTO No. 2

VALORES CARACTERÍSTICOS Y % DE PRESENTACIÓN DE TURBIEDAD

	AFLUENTE		FILTRO 1		FILTRO 2		FILTRO 3	
	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad
3.0	4,82	3,00	1,35	3	1,42	3	1,46	
3.0	4,37	3,00	1,13	3	1,21	3	1,40	
3.0	2,27	3,00	0,83	4	0,87	4	0,86	
3.0	1,99	4,00	0,76	4	0,68	4	0,78	
3.0	1,74	3,00	0,7	3	0,65	4	0,75	
3.0	1,63	3,00	0,69	3	0,65	3	0,70	
3.0	1,62	3,00	0,63	3	0,62	3	0,69	
4.0	1,43	4,00	0,6	3	0,58	3	0,68	
3.0	1,40	3,00	0,55	3	0,57	3	0,58	
3.0	1,40	3,00	0,36	3	0,55	1	0,57	
3.0	1,28	3,00	0,36	3	0,54	3	0,51	
3.0	1,28	3,00	0,32	3	0,53	3	0,50	
3.0	1,24	3,00	0,3	1	0,51	3	0,47	
3.0	1,15	2,00	0,29	3	0,45	3	0,46	
3.0	1,10	1,00	0,26	3	0,42	3	0,43	
3.0	1,10	3,00	0,23	3	0,36	3	0,41	
3.0	1,10	3,00	0,23	1	0,33	1	0,36	
1.0	1,04	3,00	0,16	3	0,33	2	0,35	
3.0	0,99	3,00	0,13	2	0,3	3	0,34	
1.0	0,92			3	0,3	3	0,25	
3.0	0,90			3	0,23	3	0,25	
3.0	0,88			3	0,23	3	0,25	
2.0	0,82			3	0,21	3	0,25	
Total (horas)	66,0			66		66		
Promedio		1,59		0,52		0,55		0,58
Maximo		4,82		1,35		1,42		1,46
Minimo		0,82		0,13		0,21		0,25
% Tiempo ≤ 1,0 UTN			50,00	89,29	60,00	90,91	60,00	90,91
% Tiempo ≤ 0,50 UTN			27,00	48,21	25,00	37,88	33,00	50,00
% Tiempo ≤ 0,25 UTN			12,00	21,43	14,00	21,21	12,00	18,18

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 22

PRUEBA PILOTO No. 3

VALORES CARACTERÍSTICOS Y % DE PRESENTACIÓN DE TURBIEDAD

AFLUENTE		FILTRO 1		FILTRO 2		FILTRO 3	
Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad
1.0	6.00	2.00	0.64	1	0.54	1	0.67
1.0	4.48	3.00	0.59	1	0.52	2	0.58
1.0	3.60	3.00	0.58	2	0.5	3	0.56
2.0	2.70	3.00	0.55	3	0.5	1	0.51
1.0	1.78	1.00	0.49	2	0.47	1	0.48
1.0	1.60	3.00	0.47	1	0.45	3	0.47
2.0	1.55	1.00	0.45	3	0.45	3	0.45
4.0	1.40	1.00	0.45	1	0.43	3	0.43
2.0	1.37	2.00	0.45	3	0.43	1	0.42
1.0	1.30	3.00	0.43	3	0.4	3	0.41
2.0	1.30	2.00	0.42	3	0.38	3	0.41
3.0	1.28	1.00	0.42	2	0.38	2	0.40
3.0	1.25	1.00	0.41	3	0.38	1	0.38
2.5	1.20	4.00	0.4	2	0.36	1	0.37
2.0	1.12	2.00	0.39	4	0.36	2	0.36
3.0	1.07	2.00	0.39	2	0.36	1	0.34
3.5	1.07	3.00	0.37	2	0.35	2	0.34
1.0	1.00	2.00	0.37	1	0.34	1	0.33
1.0	1.00	4.00	0.36	4	0.34	4	0.33
2.0	0.98	2.00	0.36	3	0.34	2	0.32
1.0	0.95	1.00	0.34	1	0.32	2	0.32
3.0	0.94	1.00	0.32	2	0.32	2	0.32
3.0	0.93	1.00	0.27	1	0.28	3.5	0.30
2.0	0.91	1.00	0.27	1	0.28	1	0.29
3.0	0.90	2.00	0.26	3.5	0.26	4	0.29
3.0	0.88	2.00	0.24	2.5	0.26	3	0.28
4.0	0.88	1.00	0.23	1	0.26	2	0.28
2.0	0.86	3.00	0.22	2	0.26	1	0.23
3.0	0.84	3.50	0.17	1	0.25	2	0.22
2.0	0.83	2.50	0.16	2	0.24	3	0.19
3.0	0.80	3.00	0.16	3	0.23	3	0.17
1.0	0.75			3	0.18	2.5	0.15
69.0		66.0		69.0		69.0	11.6
Promedio	1.49		0.38		0.36		0.36
Maximo	6.00		0.64		0.54		0.67
Minimo	0.75		0.16		0.18		0.15
% Tiempo ≤ 1.0 UTN		66.00	100.00	69.00	100.00	69.00	100.00
% Tiempo ≤ 0.50 UTN		55.00	83.33	67.00	97.10	62.00	89.86
% Tiempo ≤ 0.25 UTN		15.00	22.73	9.00	13.04	11.50	16.67

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 23

PRUEBA PILOTO No. 4

VALORES CARACTERÍSTICOS Y % DE PRESENTACIÓN DE TURBIEDAD

AFLUENTE		FILTRO 1		FILTRO 2		FILTRO 3	
Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad	Horas	Turbiedad
2.0	1.70	2.00	0.6	2	0.51	3	0.51
2.0	1.70	2.00	0.52	2	0.48	5	0.48
5.0	1.50	2.00	0.4	3	0.46	2	0.46
3.0	1.40	5.00	0.4	5	0.42	2	0.43
2.0	1.20	2.00	0.35	2	0.38	3	0.35
3.0	1.19	3.00	0.35	2	0.38	2	0.35
2.0	1.13	2.00	0.33	3	0.37	2	0.35
3.0	1.08	2.00	0.33	3	0.36	2	0.33
2.0	0.95	2.00	0.32	3	0.33	3	0.31
2.0	0.94	5.00	0.32	1.5	0.32	3	0.30
2.0	0.94	3.00	0.31	2	0.32	3.5	0.30
4.0	0.89	3.50	0.3	2	0.31	4	0.28
4.0	0.88	2.00	0.3	2	0.3	3	0.26
4.0	0.84	3.00	0.29	4	0.29	2	0.26
2.0	0.83	1.50	0.28	3.5	0.28	1.5	0.26
5.0	0.83	2.00	0.28	2	0.28	2	0.25
3.0	0.82	3.00	0.27	2	0.27	5	0.25
3.0	0.81	4.00	0.27	3	0.26	2	0.24
1.5	0.80	2.00	0.25	5	0.26	2	0.24
2.0	0.77	3.00	0.24	3	0.25	3	0.22
2.0	0.77	2.00	0.24	4	0.24	2	0.20
3.0	0.76	3.00	0.23	3	0.24	4	0.19
2.0	0.74	4.00	0.21	2	0.22	2	0.19
3.0	0.73	4.00	0.21	5	0.22	5	0.18
5.0	0.72	3.00	0.2	2	0.2	3	0.16
3.5	0.66	5.00	0.19	4	0.2	4	0.15
Total (horas)		75.0		75.0		75.0	
Promedio	0.98		0.31		0.31		0.29
Maximo	1.70		0.60		0.51		0.51
Minimo	0.66		0.19		0.20		0.15
% Tiempo ≤ 1.0 UTN		75.00	100.00	75.00	100.00	75.00	100.00
% Tiempo ≤ 0.50 UTN		71.00	94.67	71.00	94.67	72.00	96.00
% Tiempo ≤ 0.25 UTN		25.00	34.67	23.00	1.57	34.00	45.33

Elaborado por: Fernando Ojeda N

CUADRO No. 24

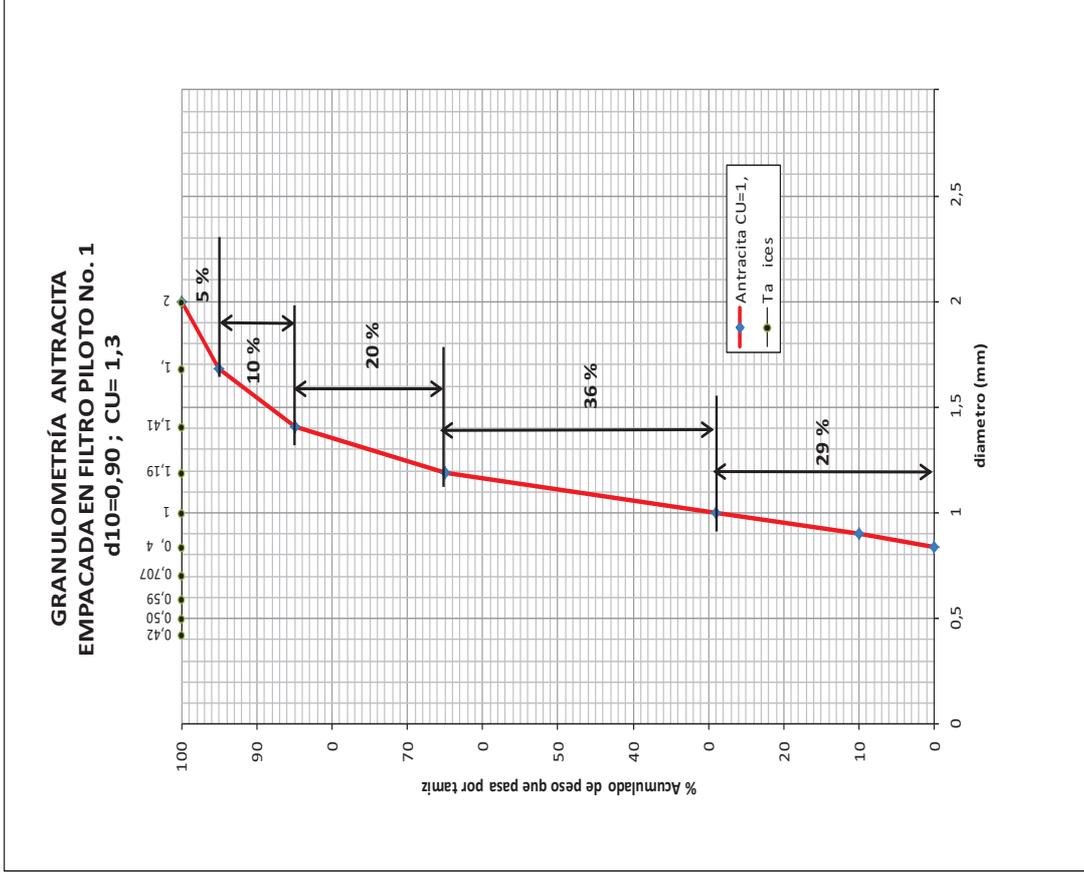
PRUEBA PILOTO No. 3
VALORES CARACTERÍSTICOS Y % DE PRESENTACIÓN DE TURBIEDAD EN
FILTROS No. 7 Y 8 (PTAP)

Fecha	Hora	Tiempo Acumulado (horas)	Intervalos de tiempo	TURBIEDAD DATOS CRONOLÓGICOS (NTU)			TURBIEDAD DATOS CLASIFICADOS						
				Afluente	Efluente Prototipo		Afluente		Efluente Prototipo				
					Filtro 7	Filtro 8			Filtro 7		Filtro 8		
2013-02-19	15:00:00	0,0		1,88	0,79	0,68							
	16:00:00	1,0	1,0	3,6	0,3	0,3	1	3,6	1	2,1	1	2,28	
	17:00:00	2,0	1,0	4,48	1,26	1,34	1	6	2	1,56	2	1,68	
	18:00:00	3,0	1,0	6	2,1	2,28	1	4,48	1	1,46	1	1,34	
	20:00:00	5,0	2,0	2,7	1,56	1,68	2	2,7	1	1,26	1	1,22	
	21:00:00	6,0	1,0	1,78	1,46	1,22	1	1,78	2,5	0,9	1	0,74	
	22:00:00	7,0	1,0	0,95	0,73	0,74	1	1,6	3	0,81	2,5	0,65	
	23:00:00	8,0	1,0	1	0,51	0,51	2	1,55	1	0,73	4	0,65	
2013-02-20	0:00:00	9,0	1,0	0,75	0,4	0,51	4	1,4	2	0,71	4	0,64	
	1:00:00	10,0	1,0	1	0,44	0,46	2	1,37	3	0,7	2	0,63	
	3:00:00	13,0	3,0	1,07	0,43	0,4	1	1,3	3	0,69	2	0,61	
	6:30:00	16,5	3,5	1,07	0,55	0,53	2	1,3	2	0,65	2	0,6	
	9:00:00	19,0	2,5	1,2	0,9	0,65	3	1,28	4	0,64	3	0,6	
	12:00:00	22,0	3,0	0,9	0,4	0,36	3	1,25	3	0,64	3	0,58	
	14:00:00	24,0	2,0	0,86	0,38	0,37	2,5	1,2	2	0,63	2	0,58	
	15:00:00	25,0	1,0	1,6	0,48	0,43	2	1,12	1	0,62	2	0,58	
	17:00:00	27,0	2,0	1,55	0,56	0,42	3	1,07	4	0,6	3	0,57	
	18:00:00	28,0	1,0	1,3	0,62	0,48	3,5	1,07	3	0,59	2	0,56	
	21:00:00	31,0	3,0	1,28	0,69	0,58	1	1	3	0,58	3,5	0,53	
	23:00:00	33,0	2,0	1,37	0,71	0,6	1	1	2	0,58	1	0,51	
2013-02-21	3:00:00	37,0	4,0	1,4	0,64	0,65	2	0,98	2	0,56	1	0,51	
	7:00:00	41,0	4,0	0,88	0,6	0,64	1	0,95	3,5	0,55	1	0,48	
	9:00:00	43,0	2,0	0,91	0,47	0,58	3	0,94	2	0,53	1	0,46	
	11:00:00	45,0	2,0	1,3	0,53	0,61	3	0,93	1	0,51	1	0,43	
	13:00:00	47,0	2,0	1,12	0,65	0,56	2	0,91	3	0,49	2	0,42	
	15:00:00	49,0	2,0	0,98	0,63	0,58	3	0,9	1	0,48	3	0,4	
	18:00:00	52,0	3,0	0,94	0,58	0,6	4	0,88	2	0,47	2	0,37	
	21:00:00	55,0	3,0	0,84	0,49	0,57	3	0,88	1	0,44	3	0,36	
	23:00:00	57,0	2,0	0,83	0,58	0,63	2	0,86	3	0,43	1	0,3	
2013-02-22	2:00:00	60,0	3,0	0,88	0,59		3	0,84	1	0,4			
	5:00:00	63,0	3,0	0,93	0,7		2	0,83	3	0,4			
	8:00:00	66,0	3,0	1,25	0,81		3	0,8	2	0,38			
	11:00:00	69,0	3,0	0,8	0,64		1	0,75	1	0,3			
Total (horas)							69		69		57		
Promedio								1,49		0,70		0,69	
Maximo								6		2,10		2,28	
Minimo								0,75		0,30		0,30	
% Tiempo ≤ 1,0 UTN									64	92,75	52,00	91,23	
% Tiempo ≤ 0,50 UTN									17	24,64	14,00	24,56	
% Tiempo ≤ 0,25 UTN									0	0	0	0	

Elaborado por: Fernando Ojeda N

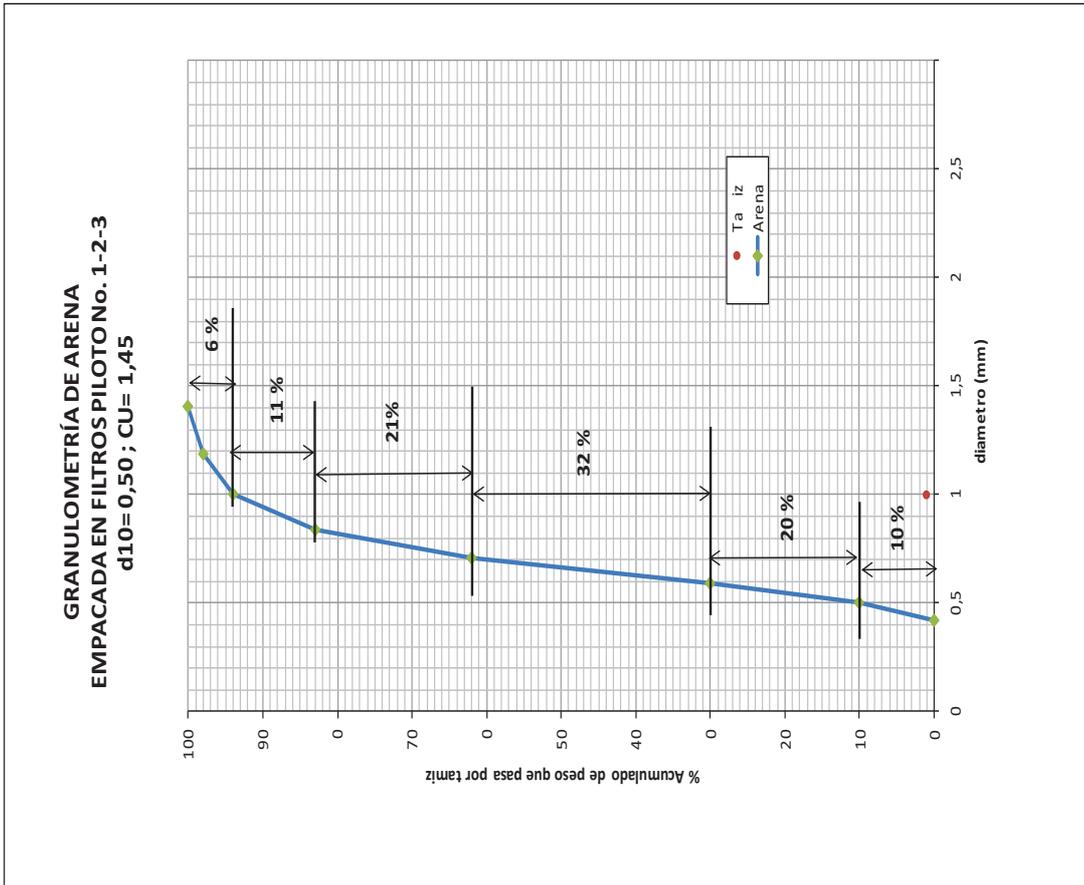
ANEXO No. 4
GRÁFICOS FASE DE INVESTIGACIÓN PILOTO

GRAFICO No. 2



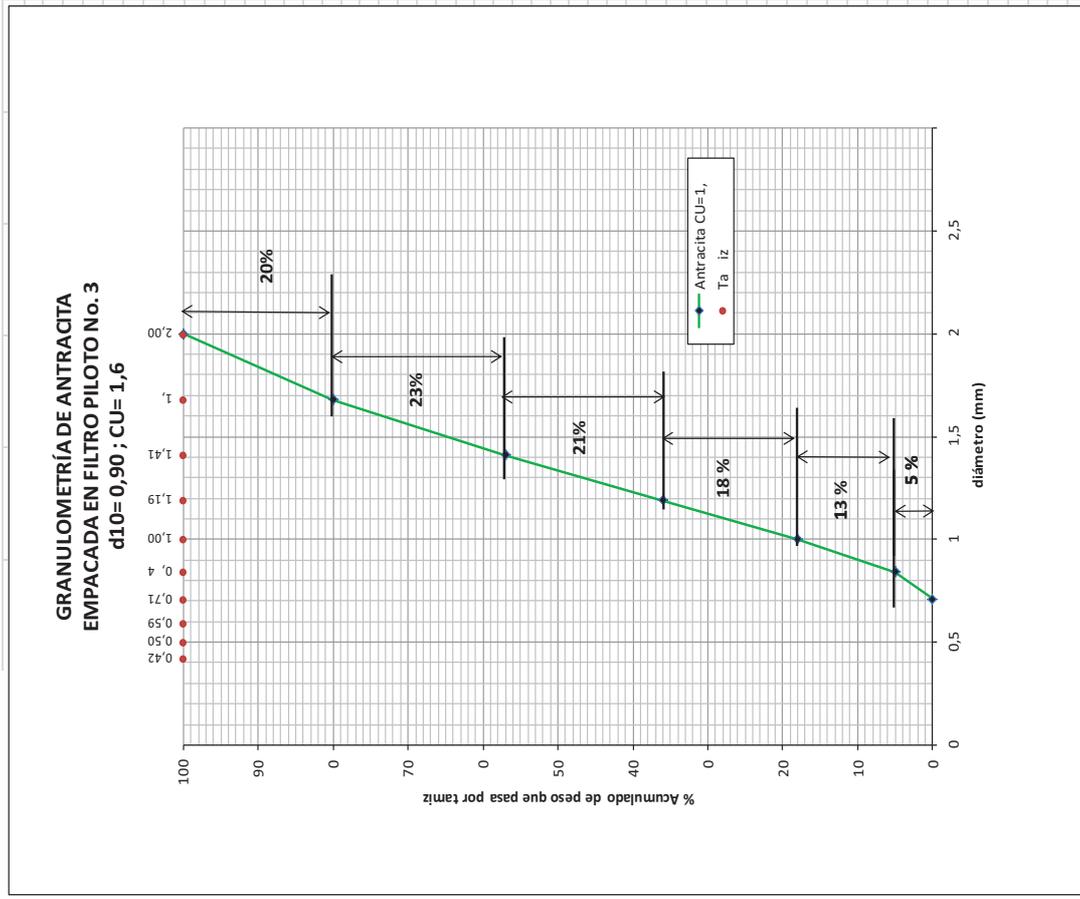
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 1



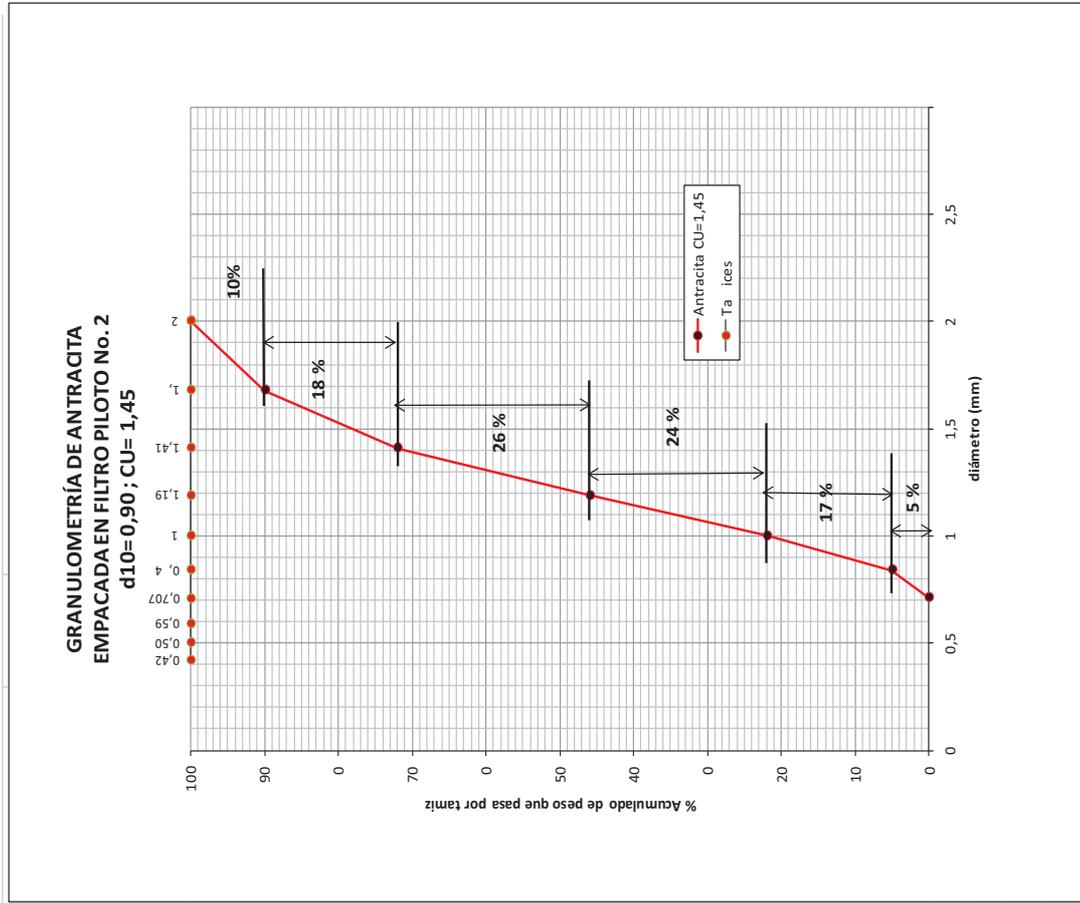
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 4



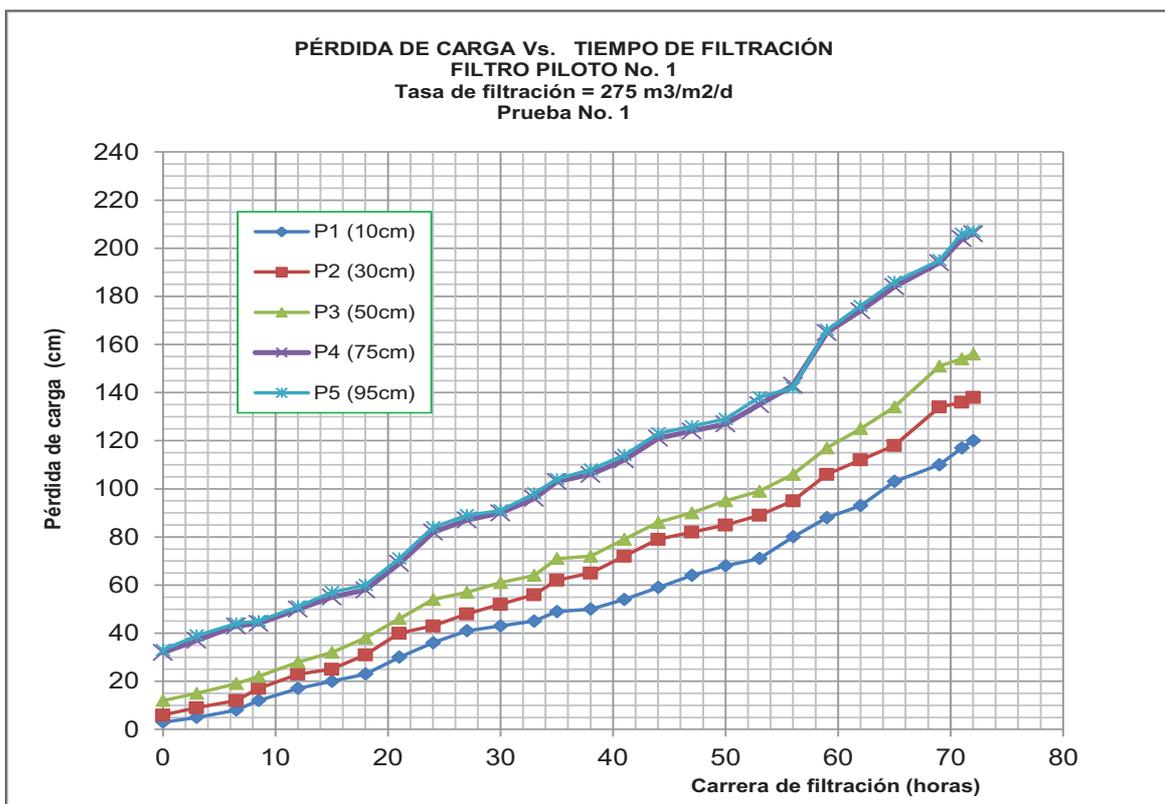
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 3



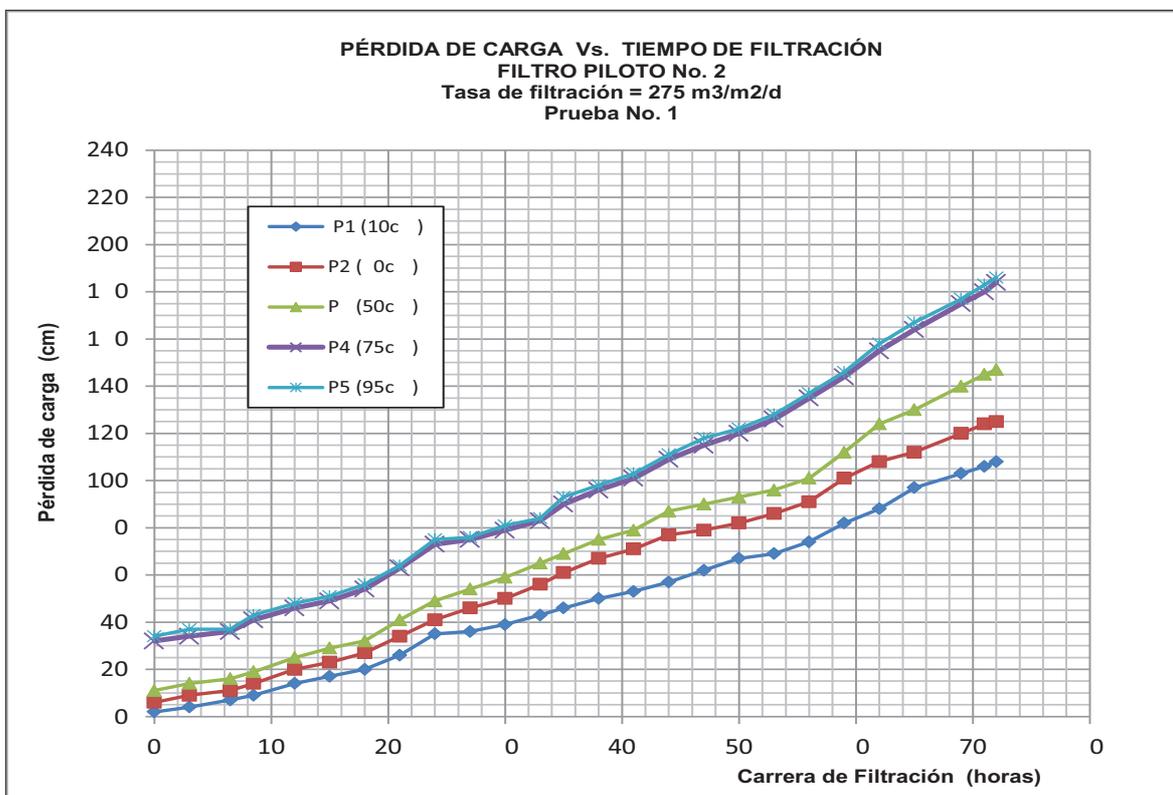
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 5



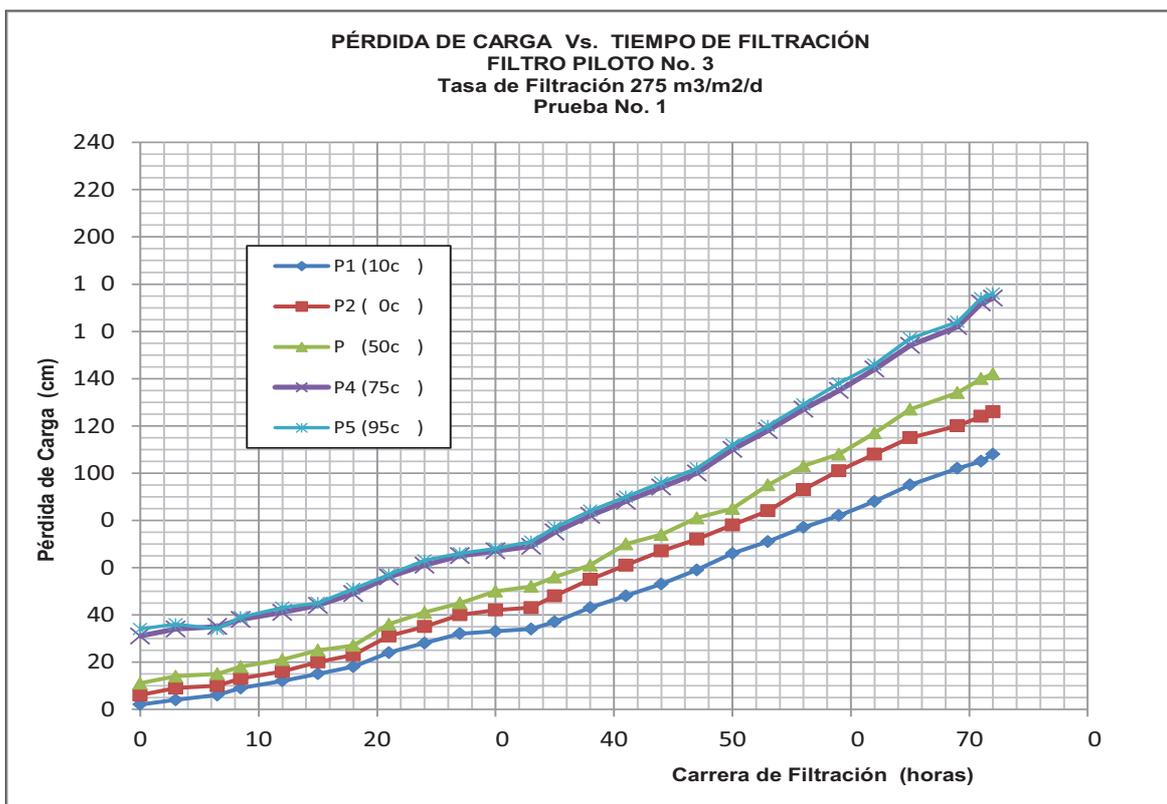
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 6



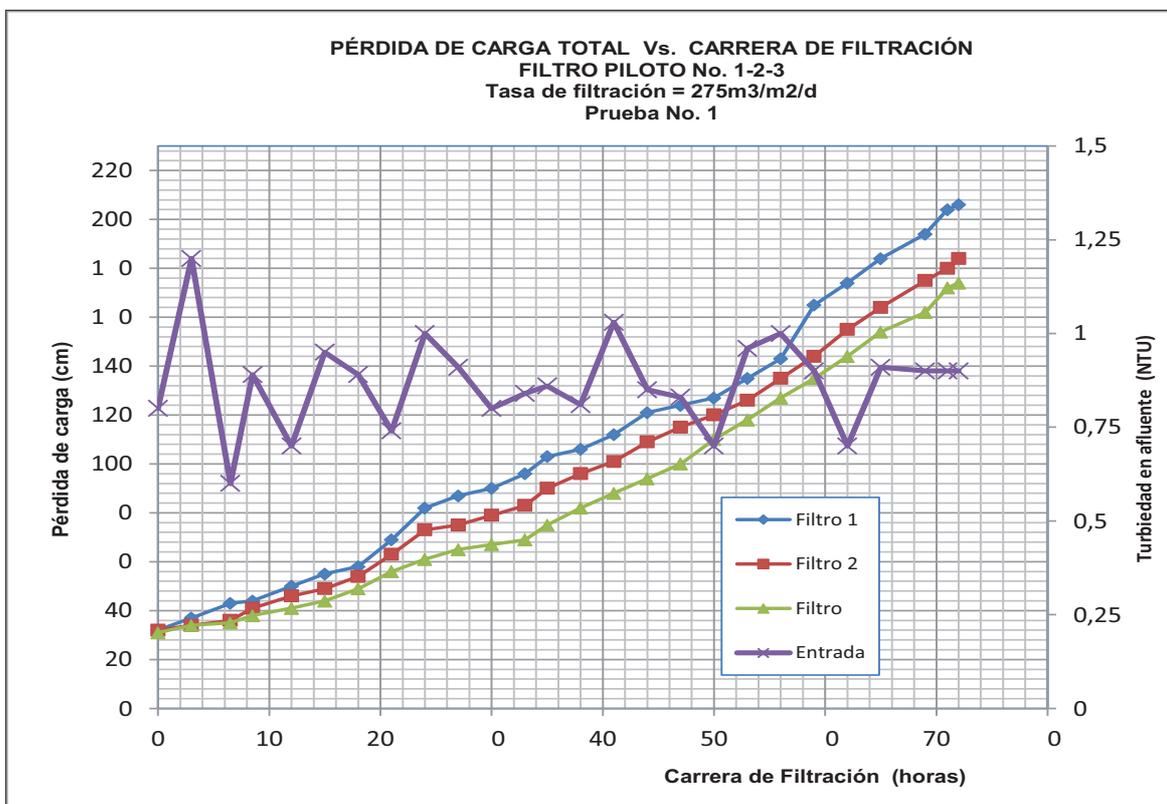
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 7



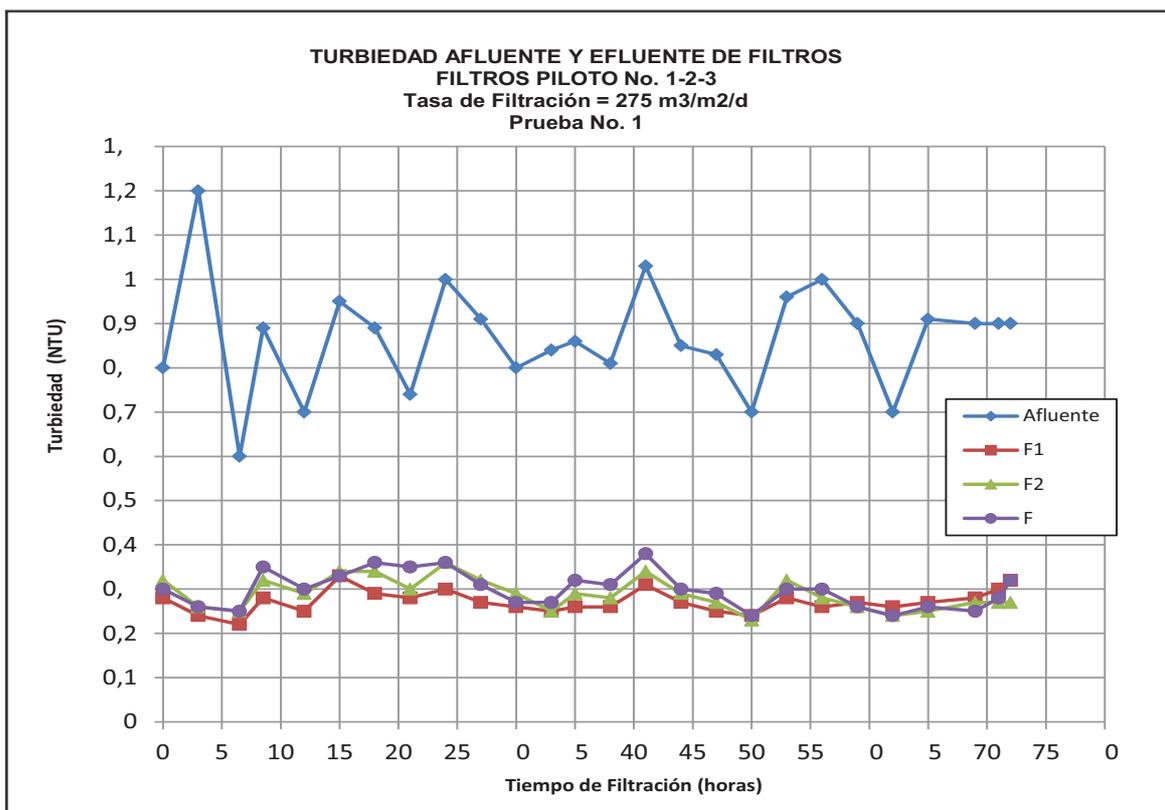
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 8



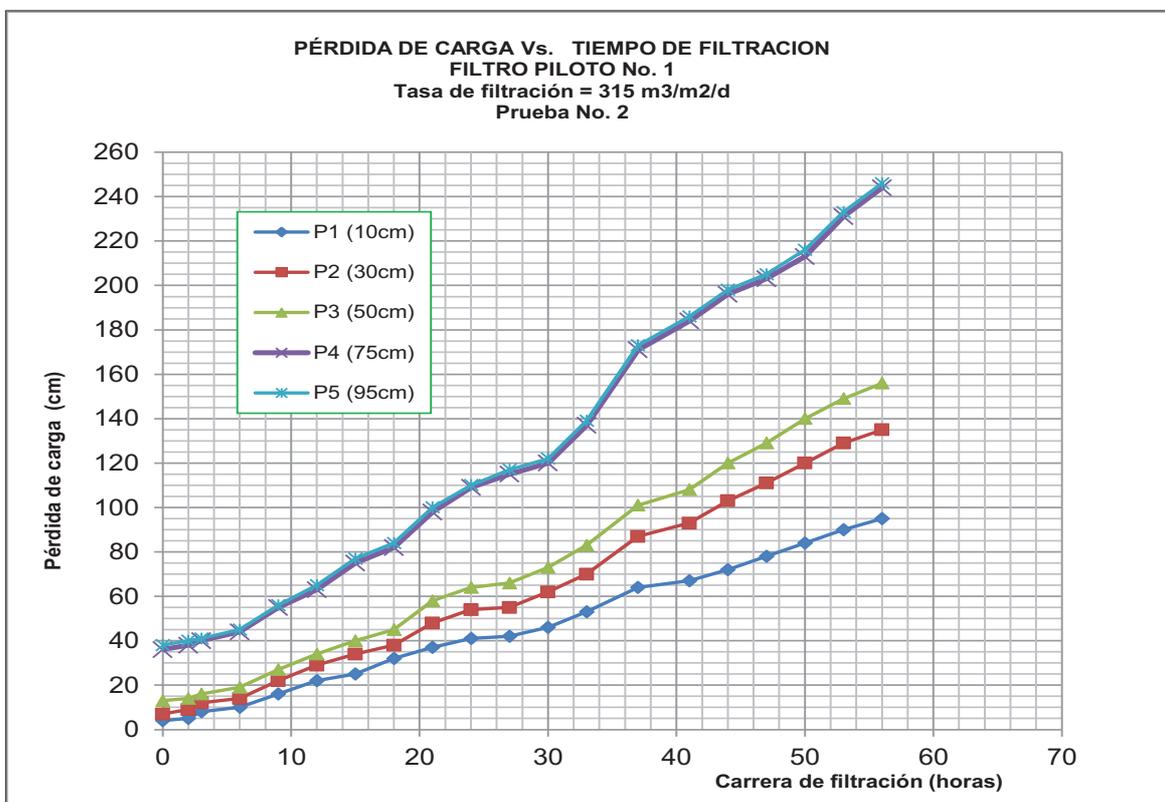
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 9



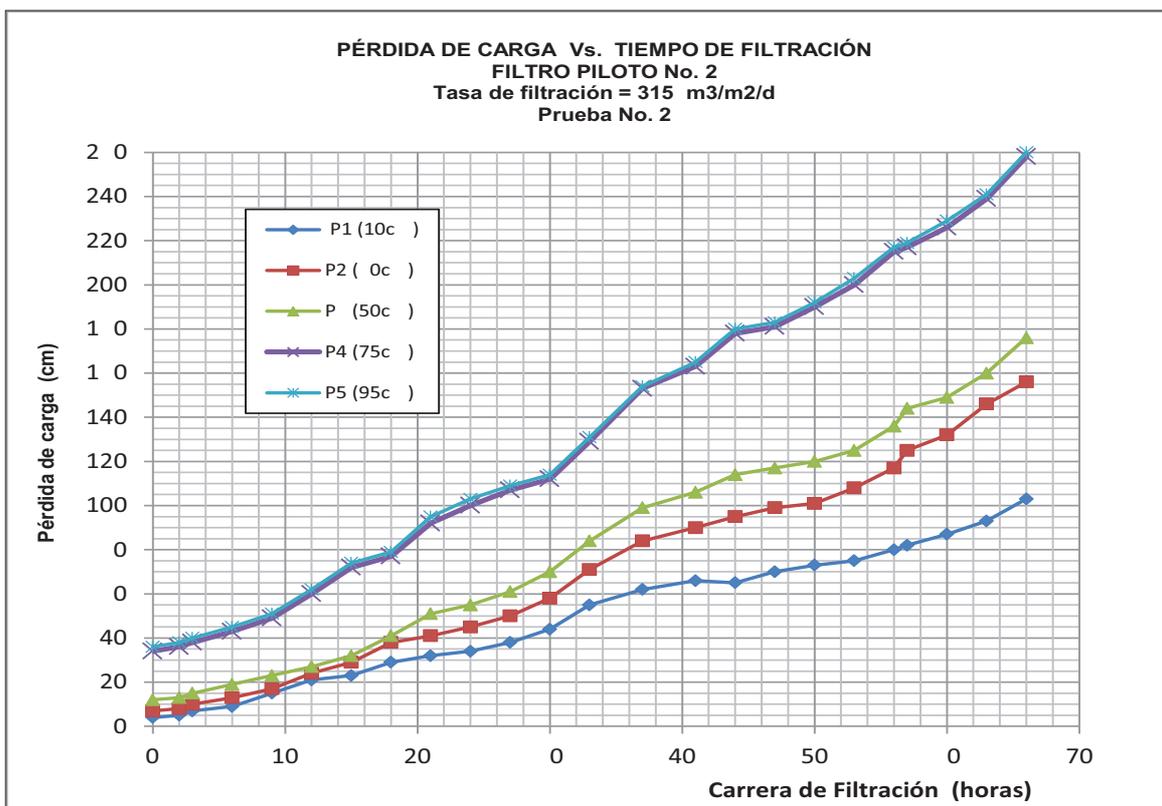
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No.10



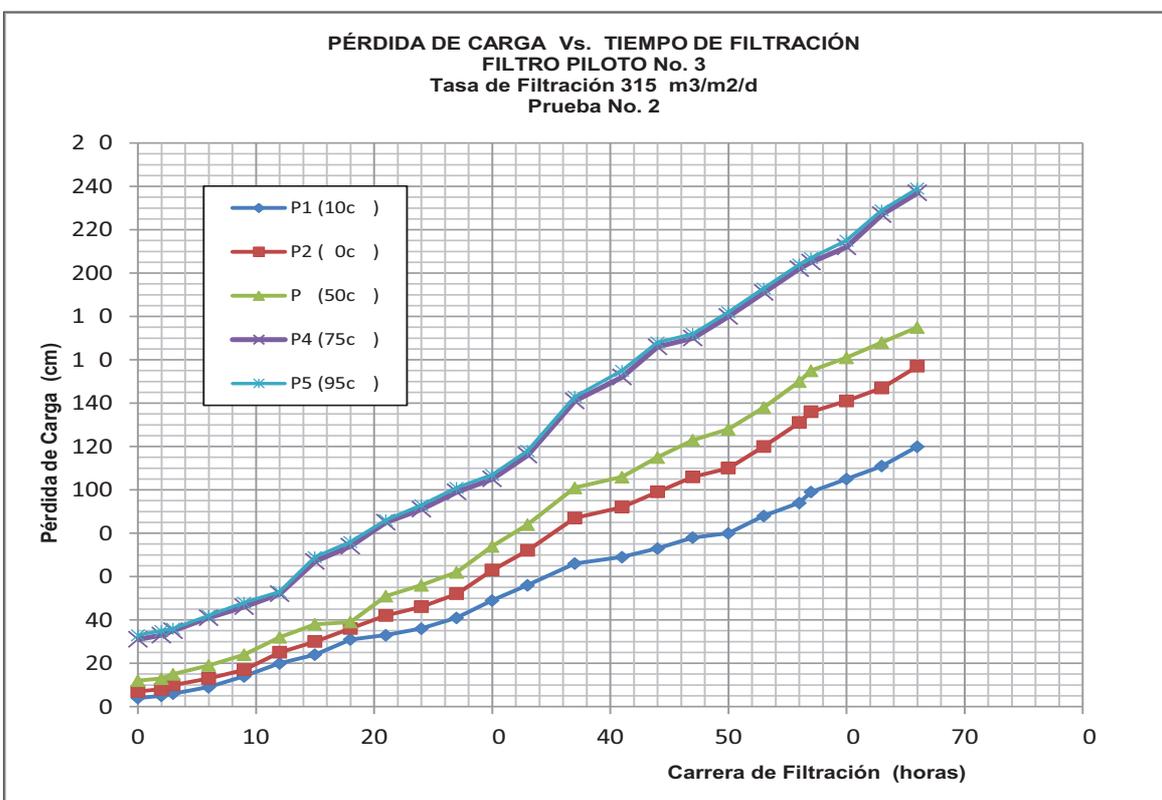
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No.11



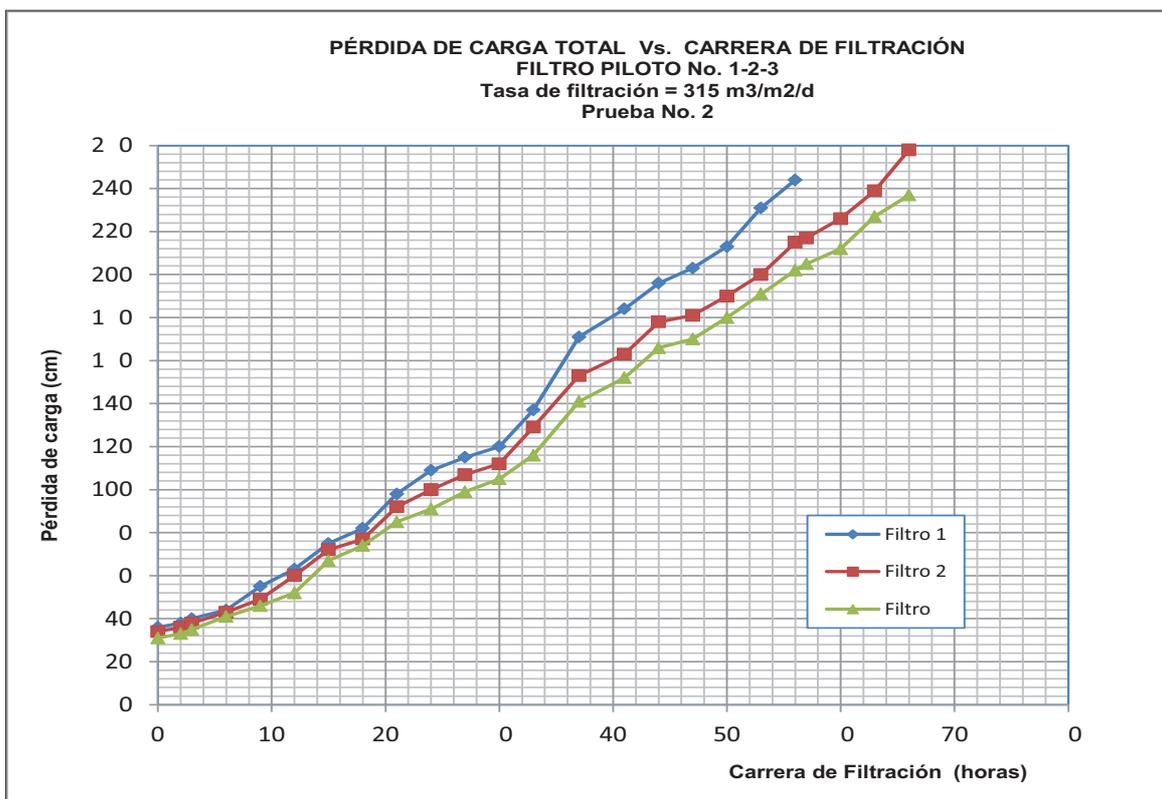
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 12



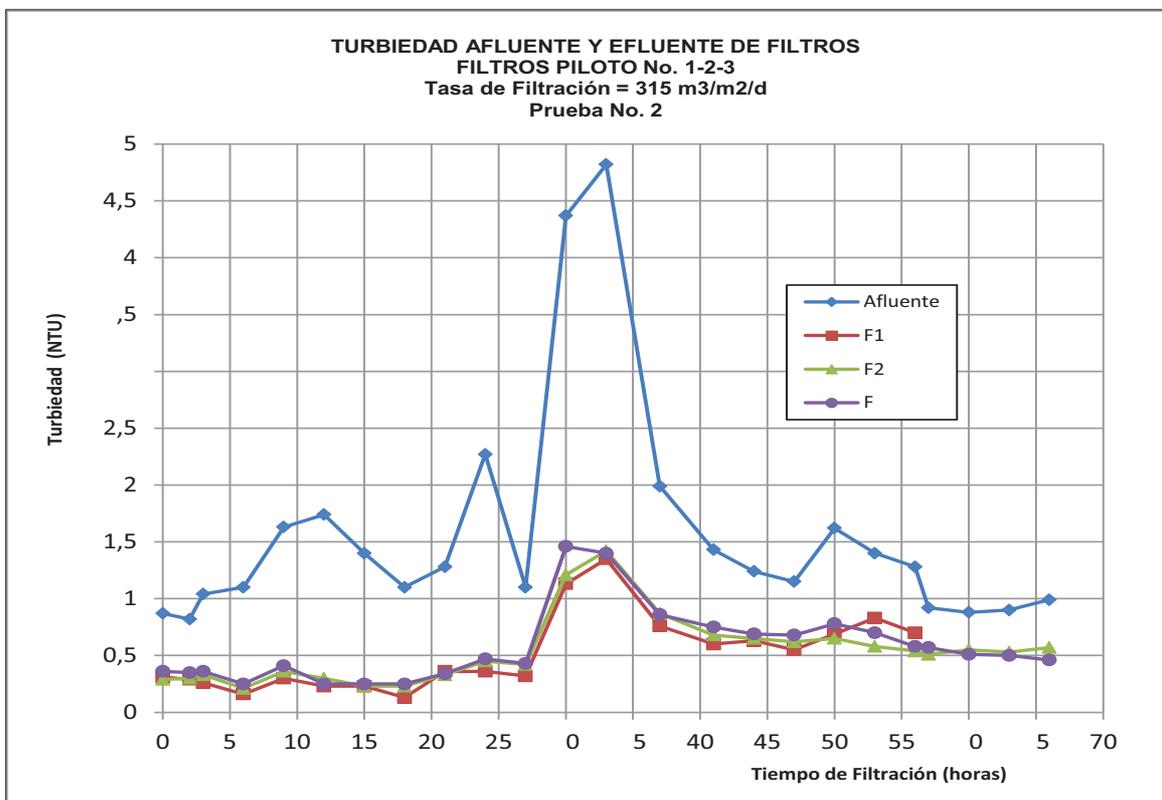
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 13



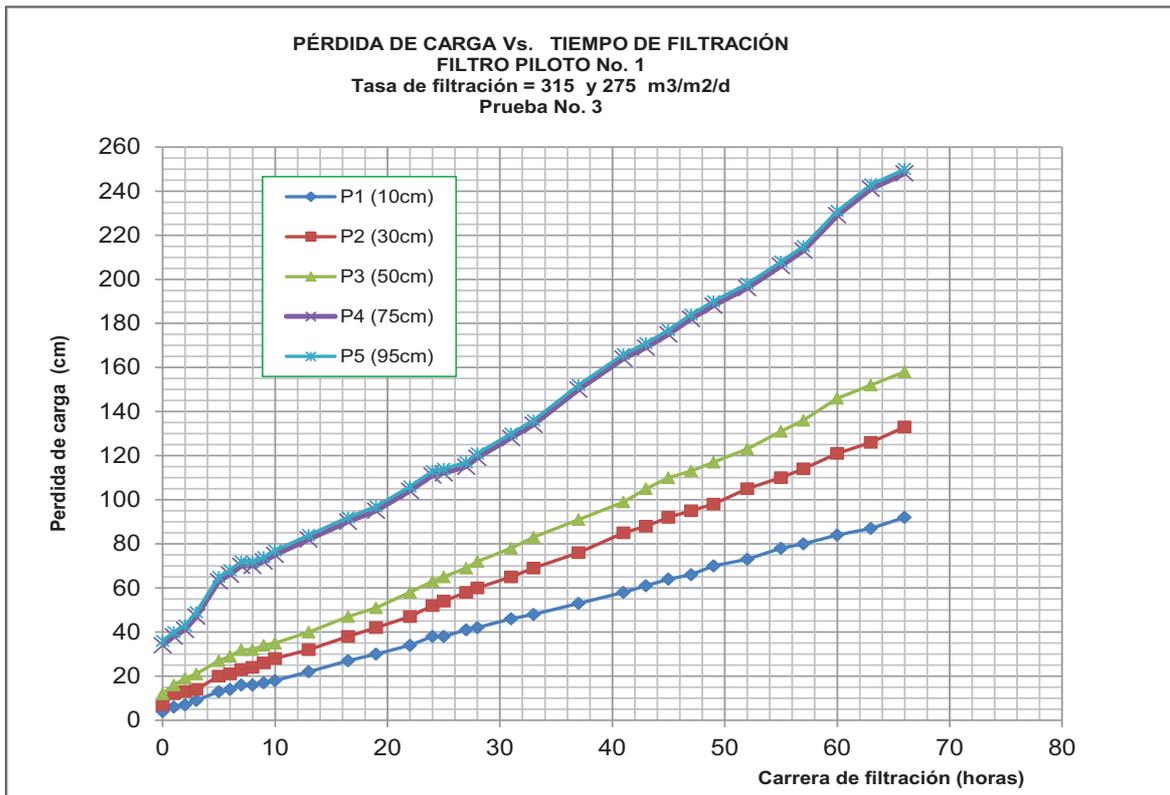
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 14



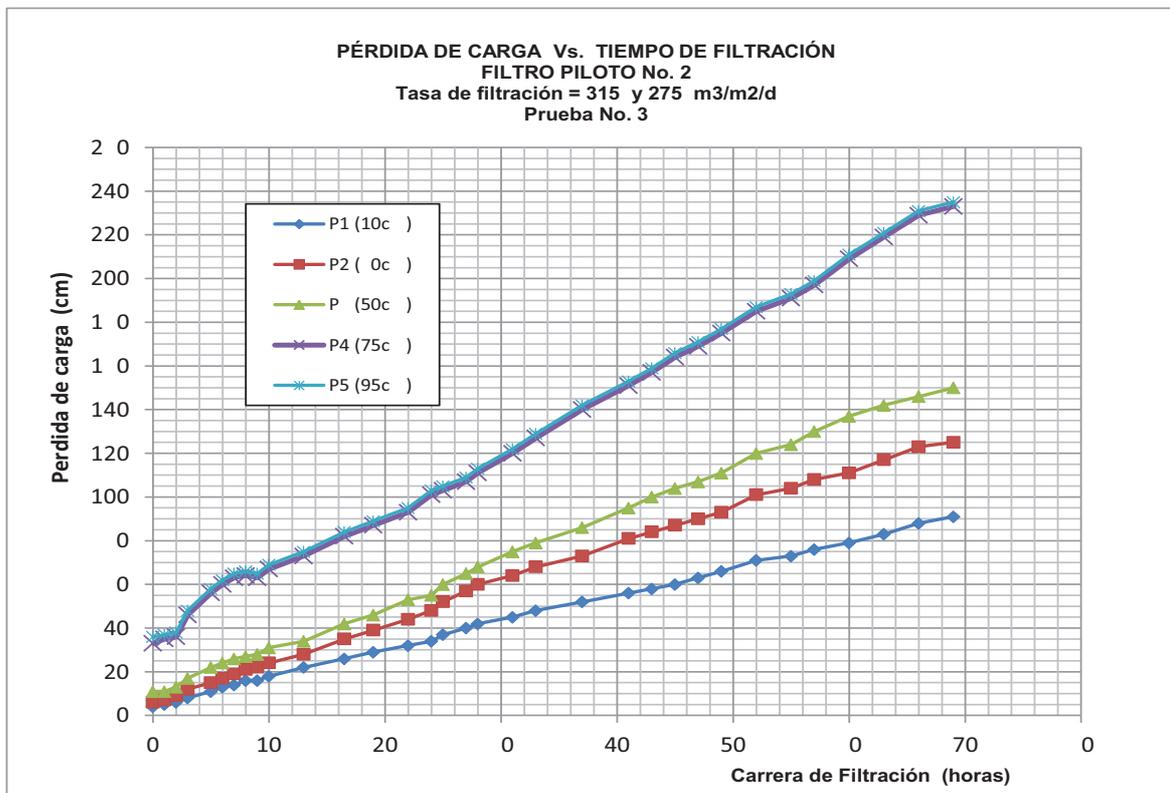
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 15



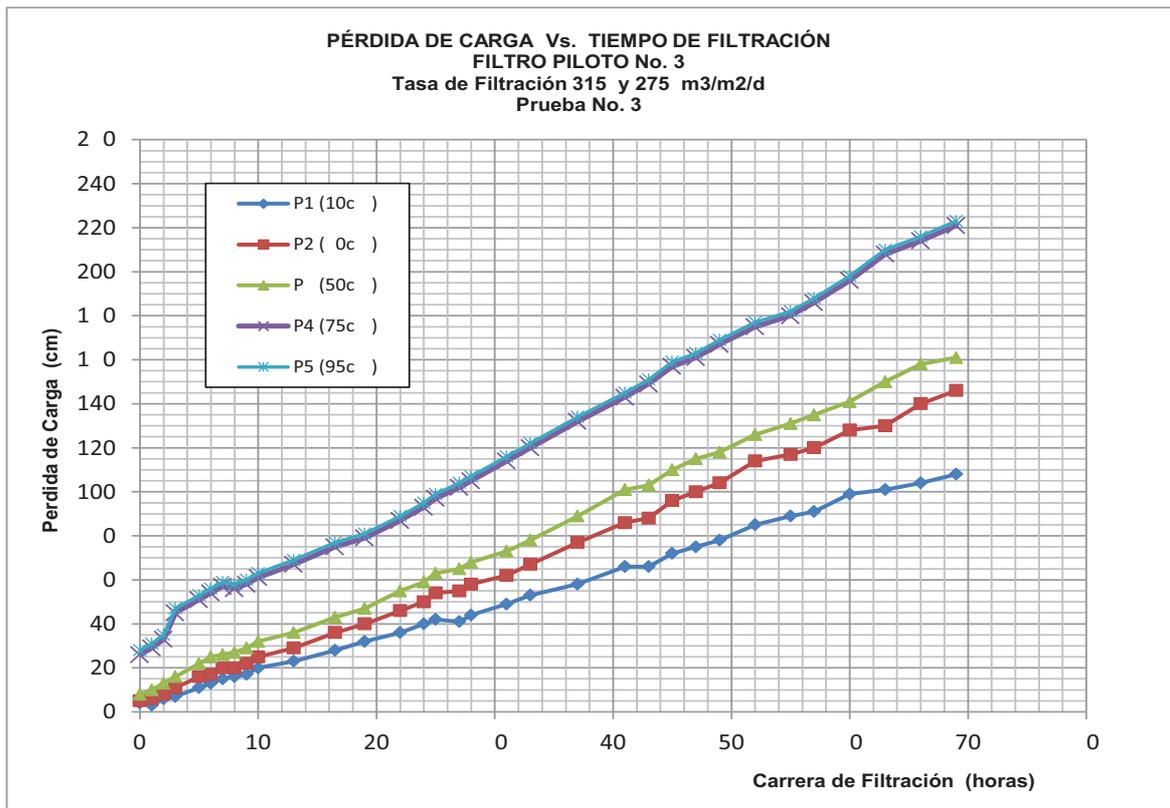
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 16



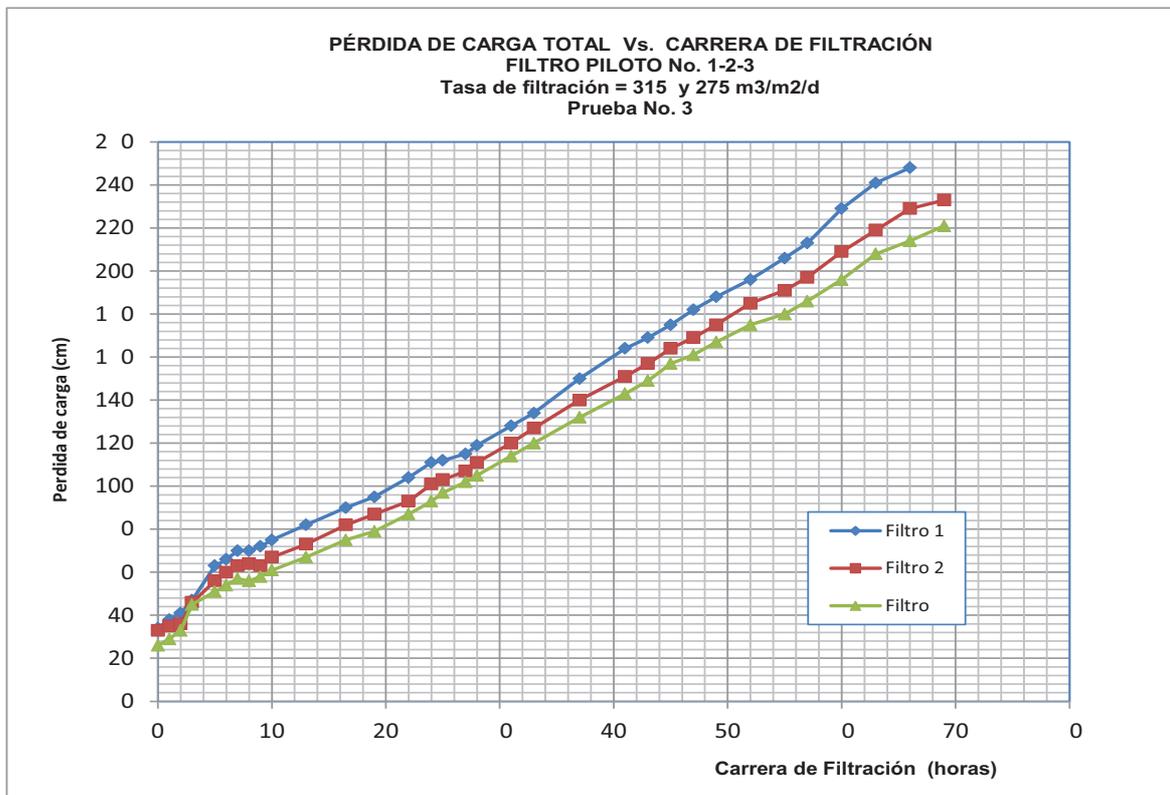
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 17



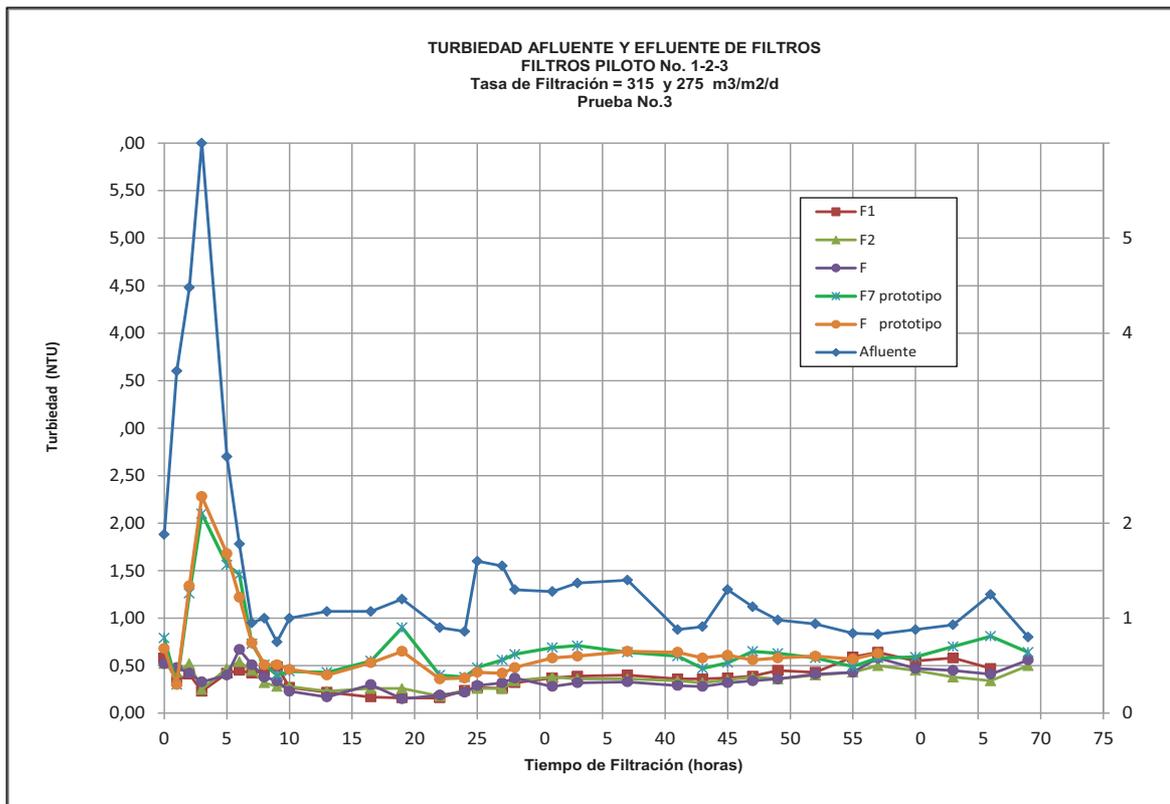
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 18



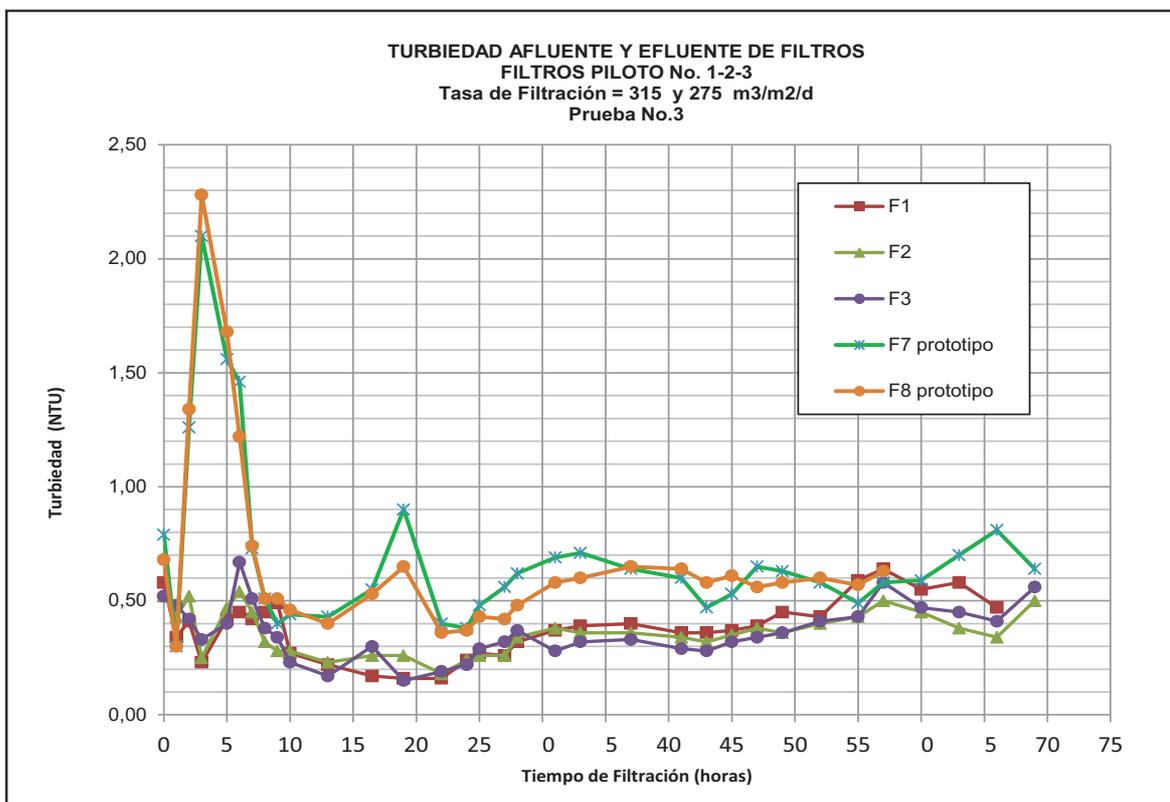
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 19



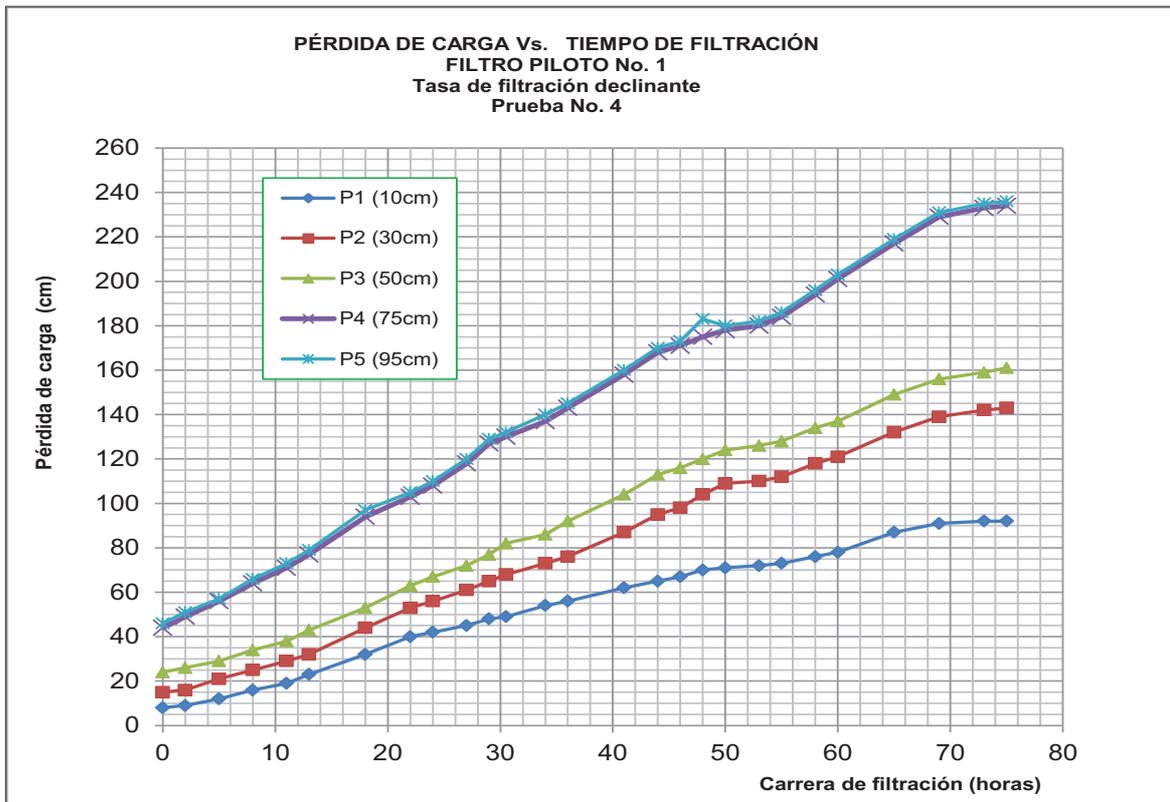
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 20



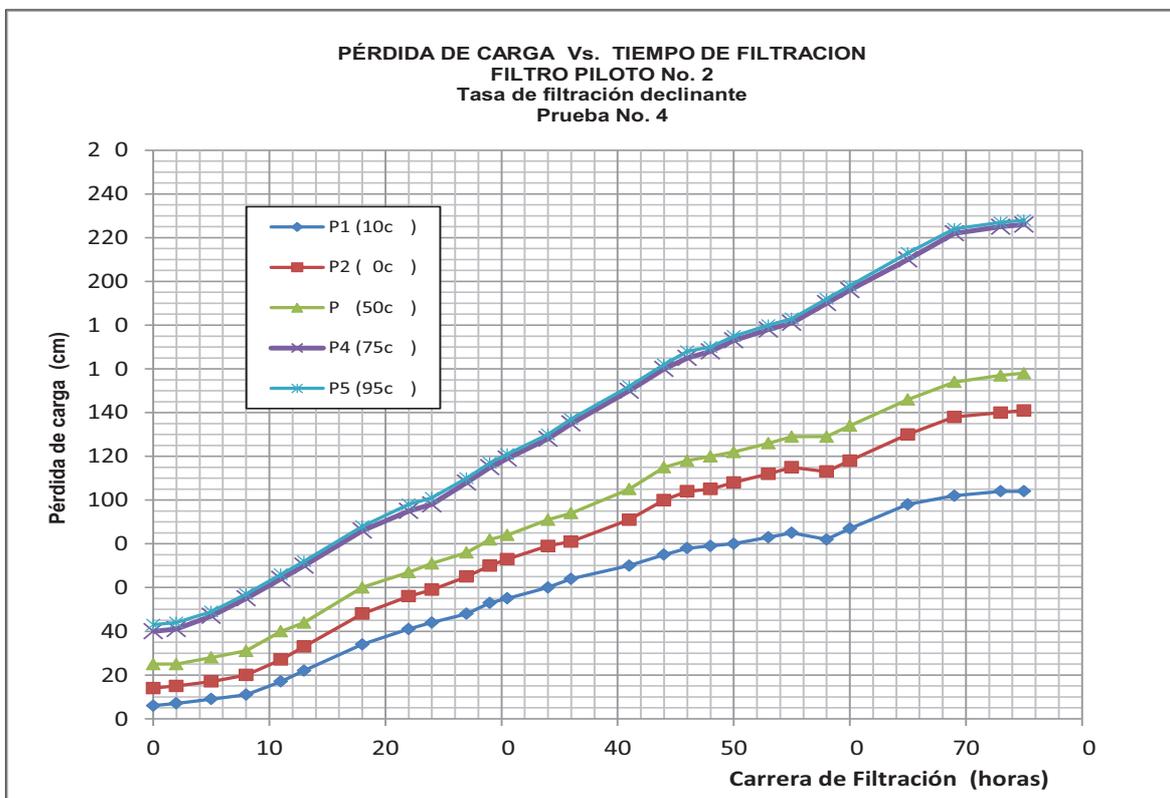
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 21



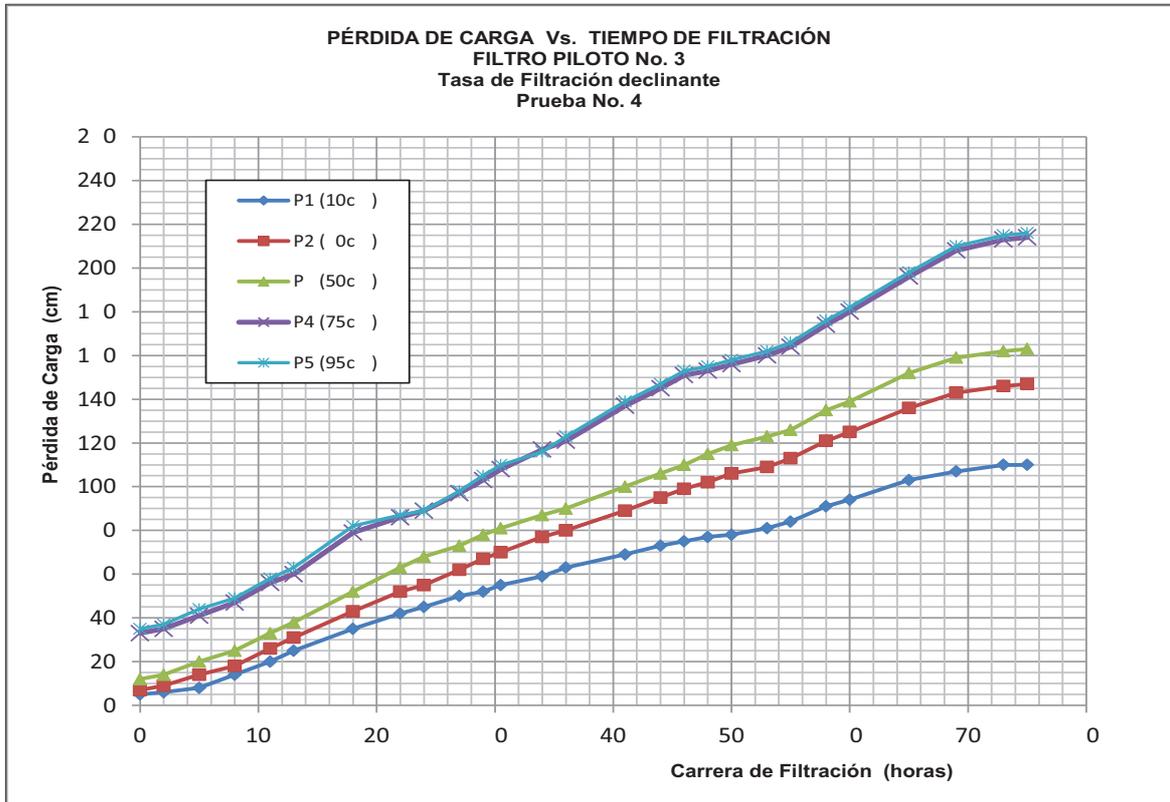
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 22



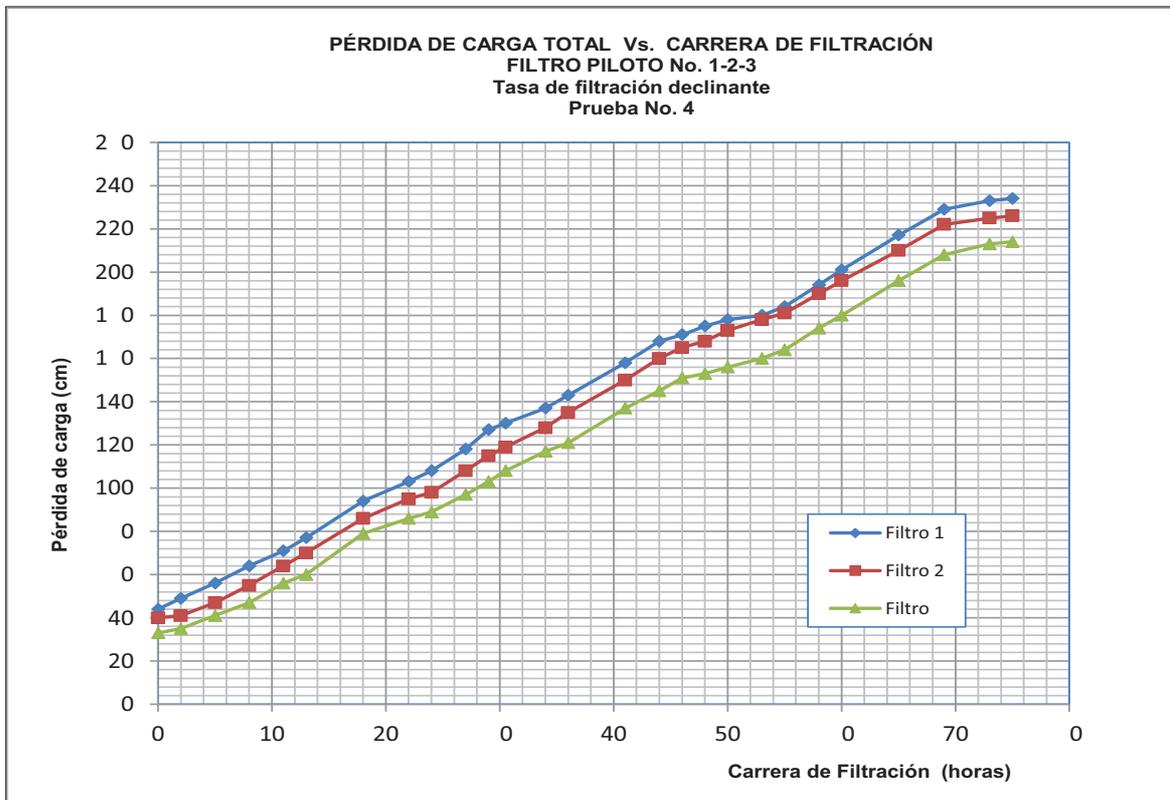
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 23



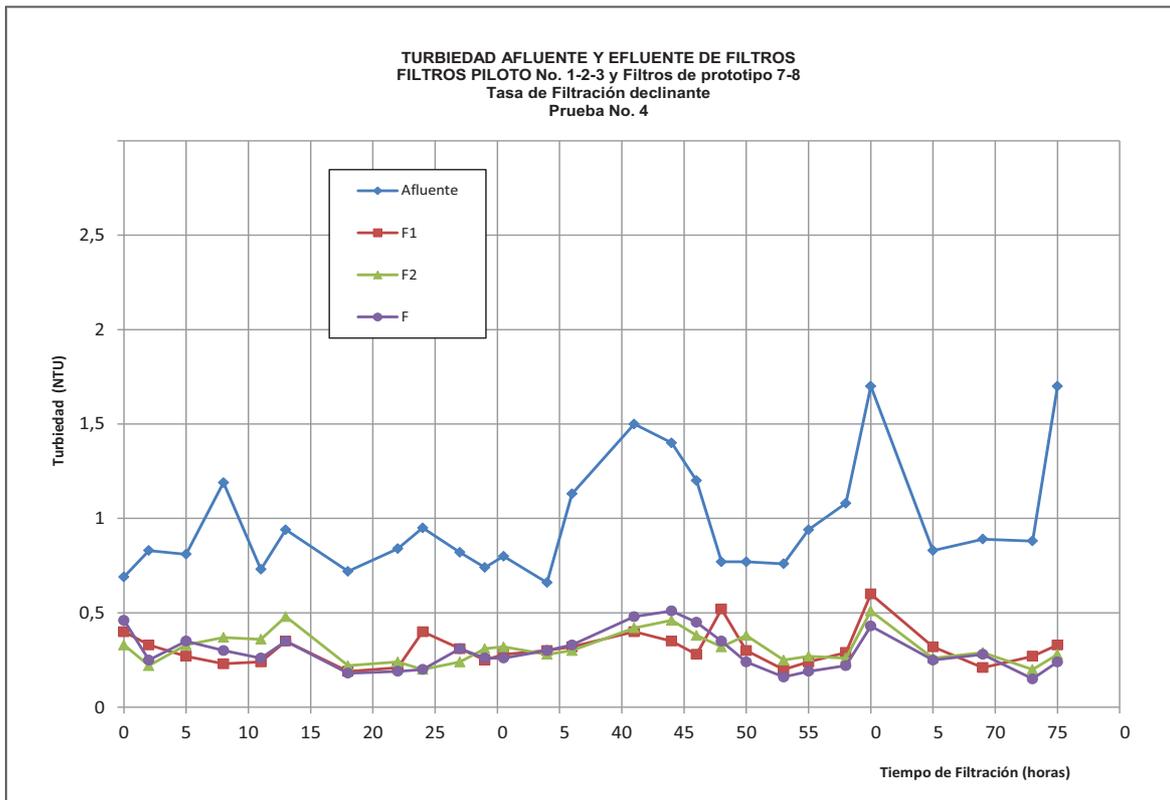
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 24



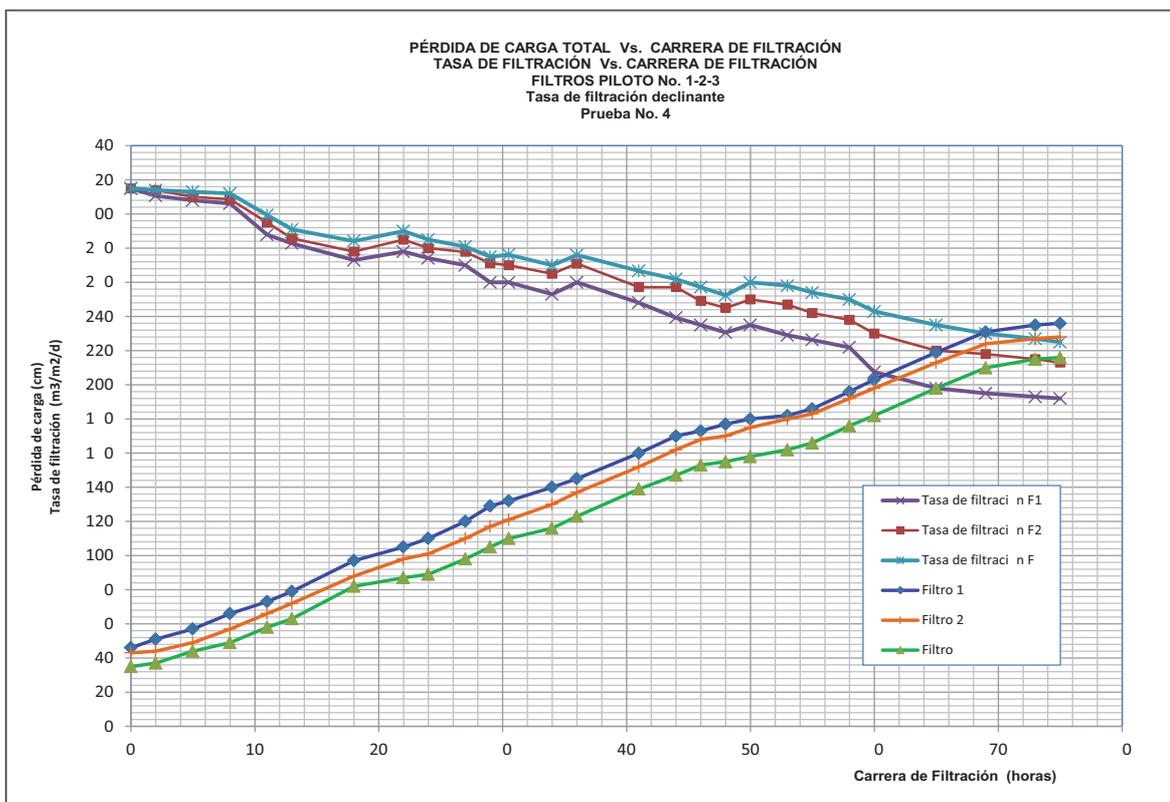
Elaborado por: Fernando Ojeda N

GRAFICO No. 25



Elaborado por: Fernando Ojeda N

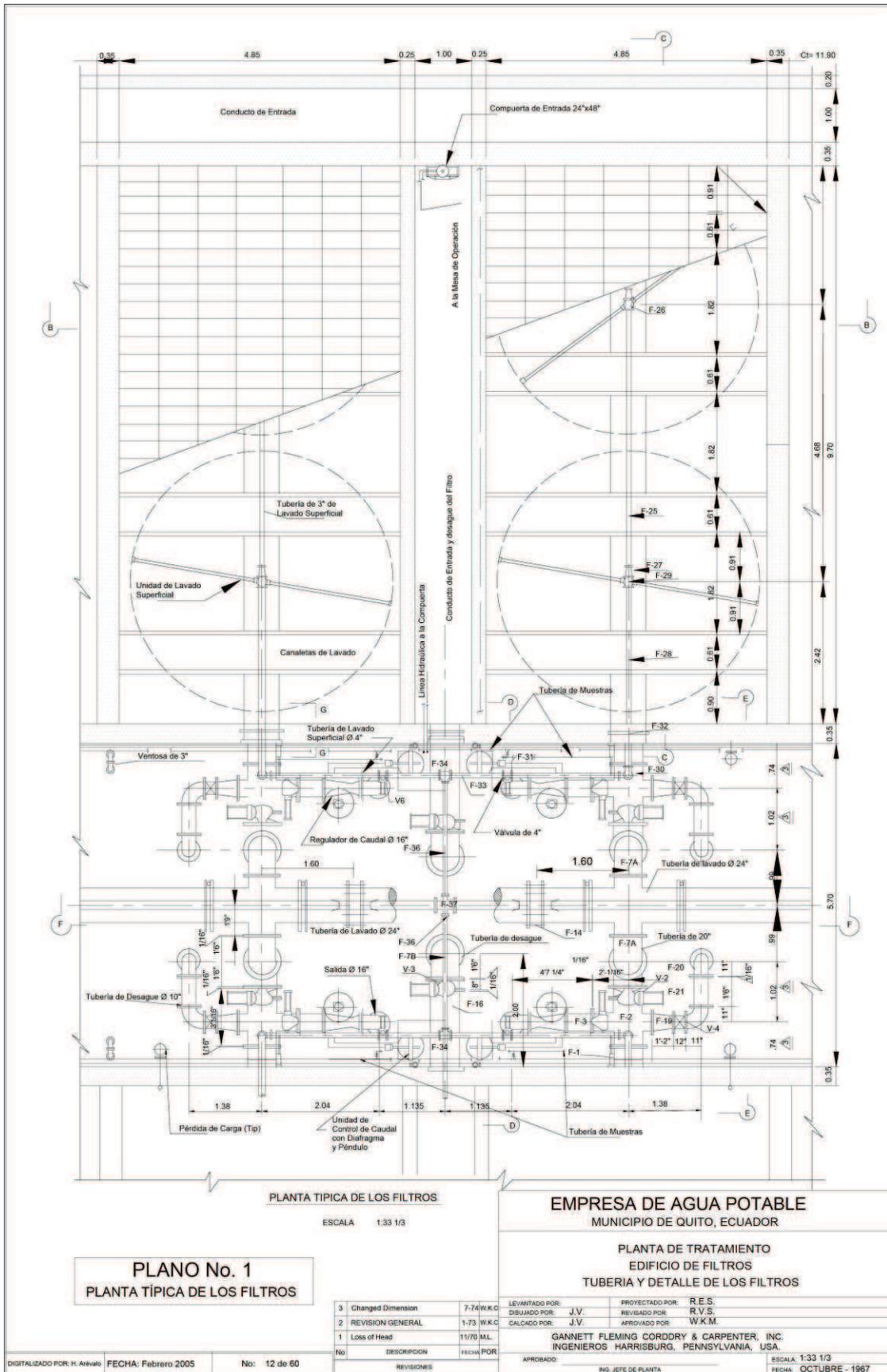
GRAFICO No. 26



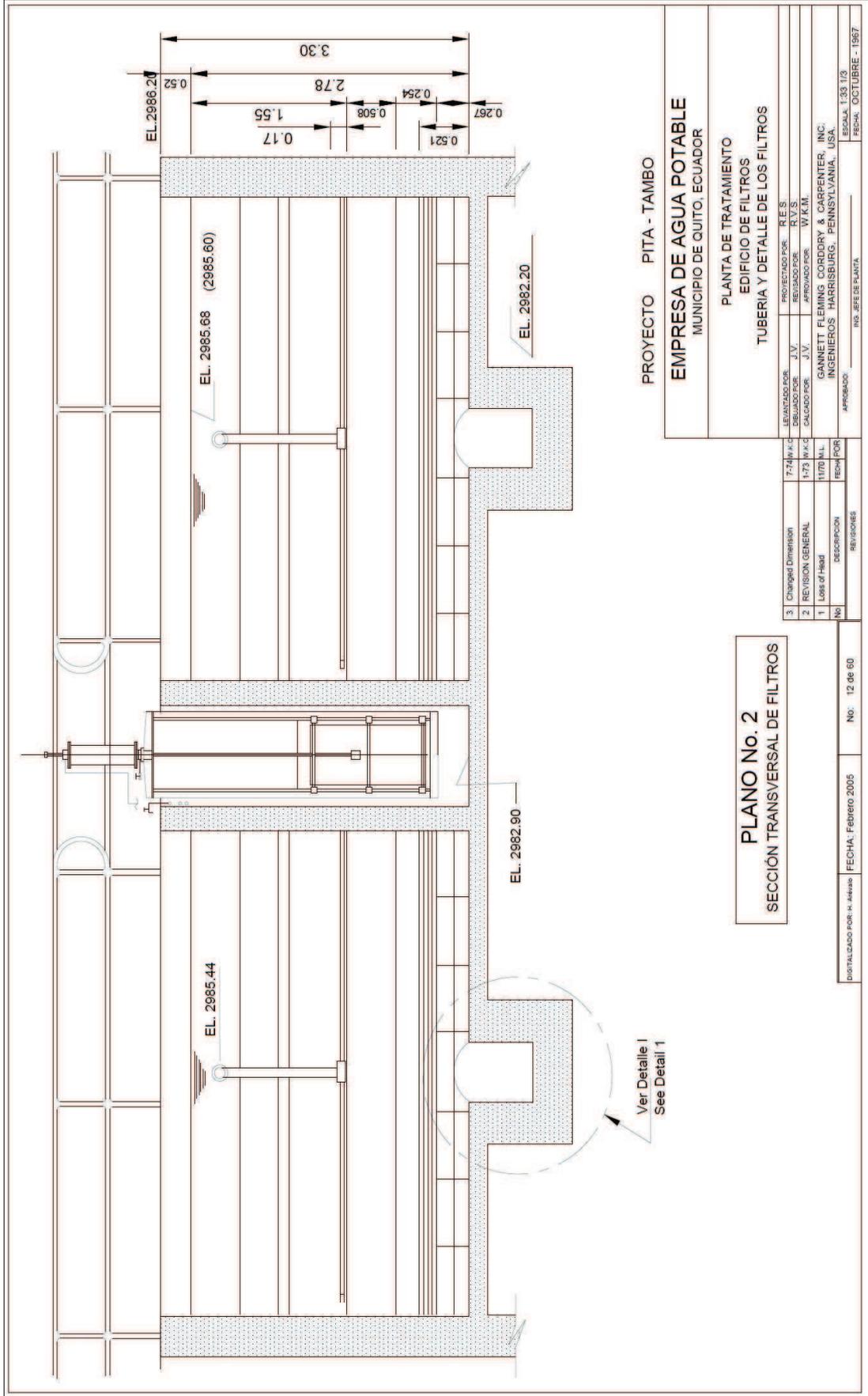
Elaborado por: Fernando Ojeda N

ANEXO No. 5
PLANOS

PLANO 1



PLANO 2



PROYECTO PITA - TAMBO
EMPRESA DE AGUA POTABLE
 MUNICIPIO DE QUITO, ECUADOR

PLANTA DE TRATAMIENTO
 EDIFICIO DE FILTROS
 TUBERIA Y DETALLE DE LOS FILTROS

LEVANTADO POR: J.V. PROYECTADO POR: R.E.S.
 DIBUJADO POR: J.V. REVISADO POR: R.V.S.
 CALCADO POR: J.V. APROBADO POR: W.K.M.

GANNETT FLEMING CORDROY & CARPENTER, INC.
 INGENIEROS HARRISBURG, PENNSYLVANIA, USA.

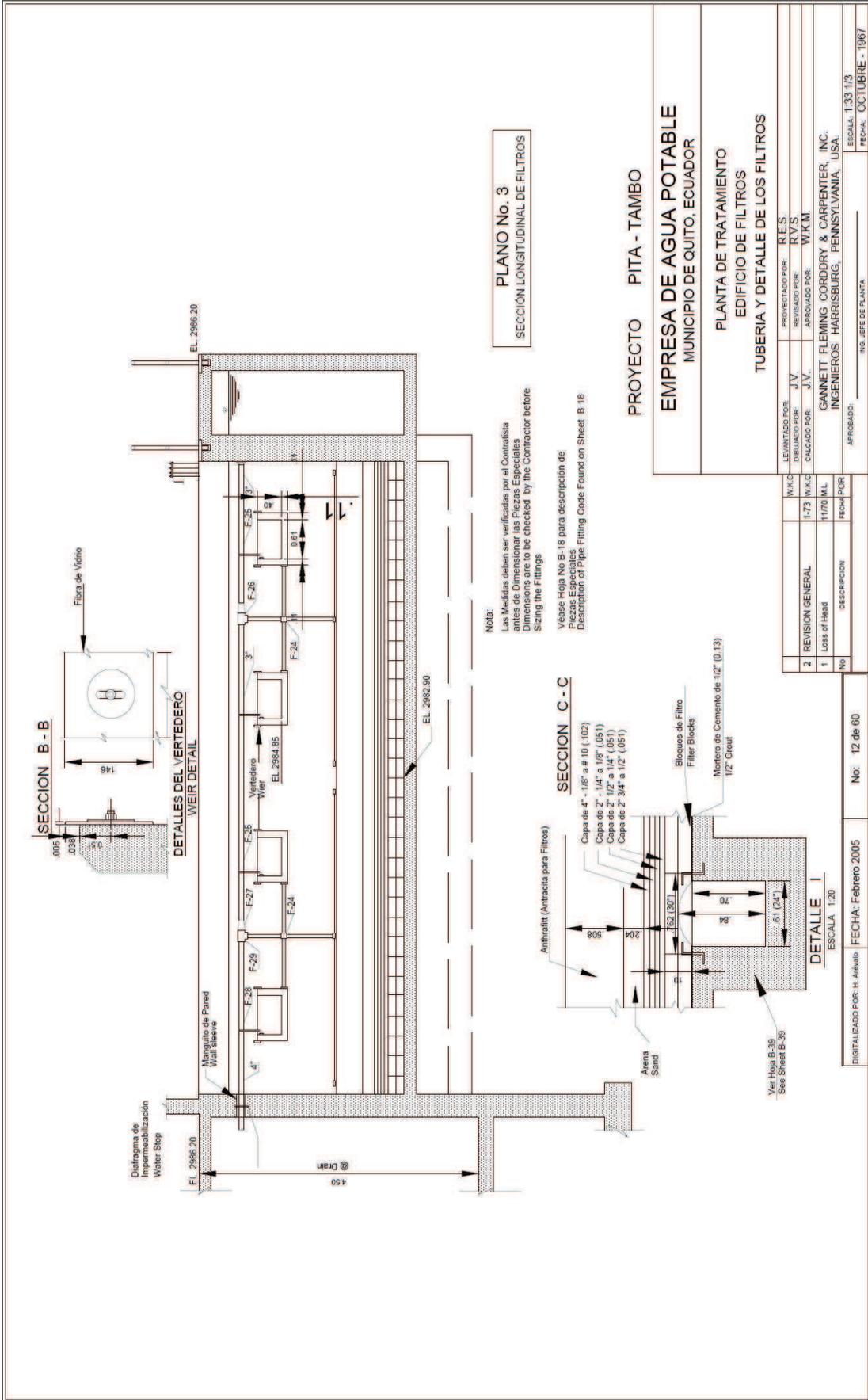
APROBADO: _____ INGENIERO DE PLANTA: _____
 ESCALA: 1/33 1/3
 FECHA: OCTUBRE - 1967

PLANO No. 2
 SECCIÓN TRANSVERSAL DE FILTROS

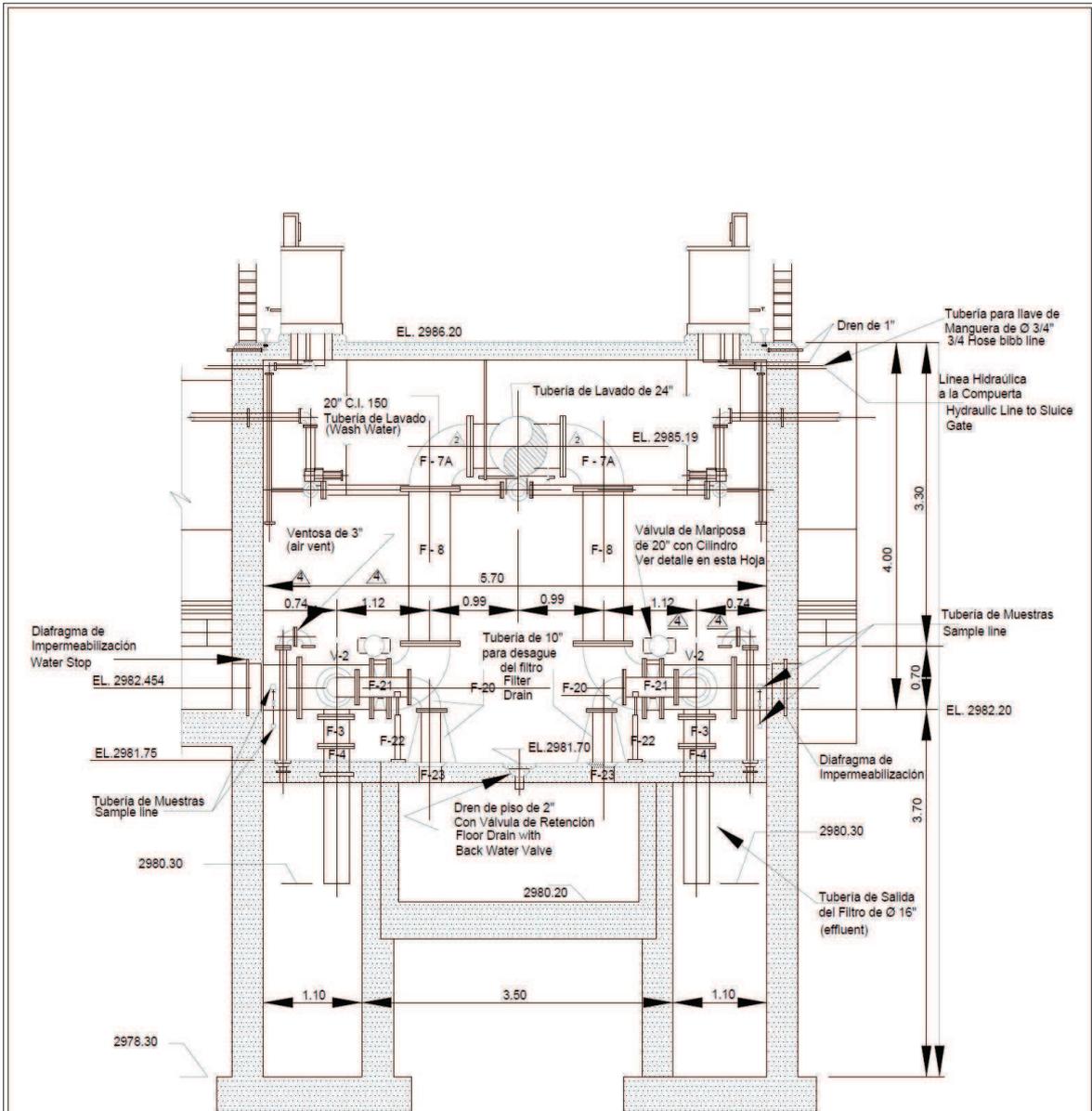
Changed Dimension	7-74 W.K.C.	PROYECTADO POR:	R.E.S.
3	REVISION GENERAL	J.V.	REVISADO POR: R.V.S.
2	REVISION GENERAL	J.V.	APROBADO POR: W.K.M.
1	Loss of Head	J.V.	
N/A	DESCRIPCION		
	REVISIONES		

DIGITALIZADO POR: H. Infante | FECHA: Febrero 2005 | NO: 12 de 60

PLANO 3



PLANO 4



PROYECTO PITA - TAMBO

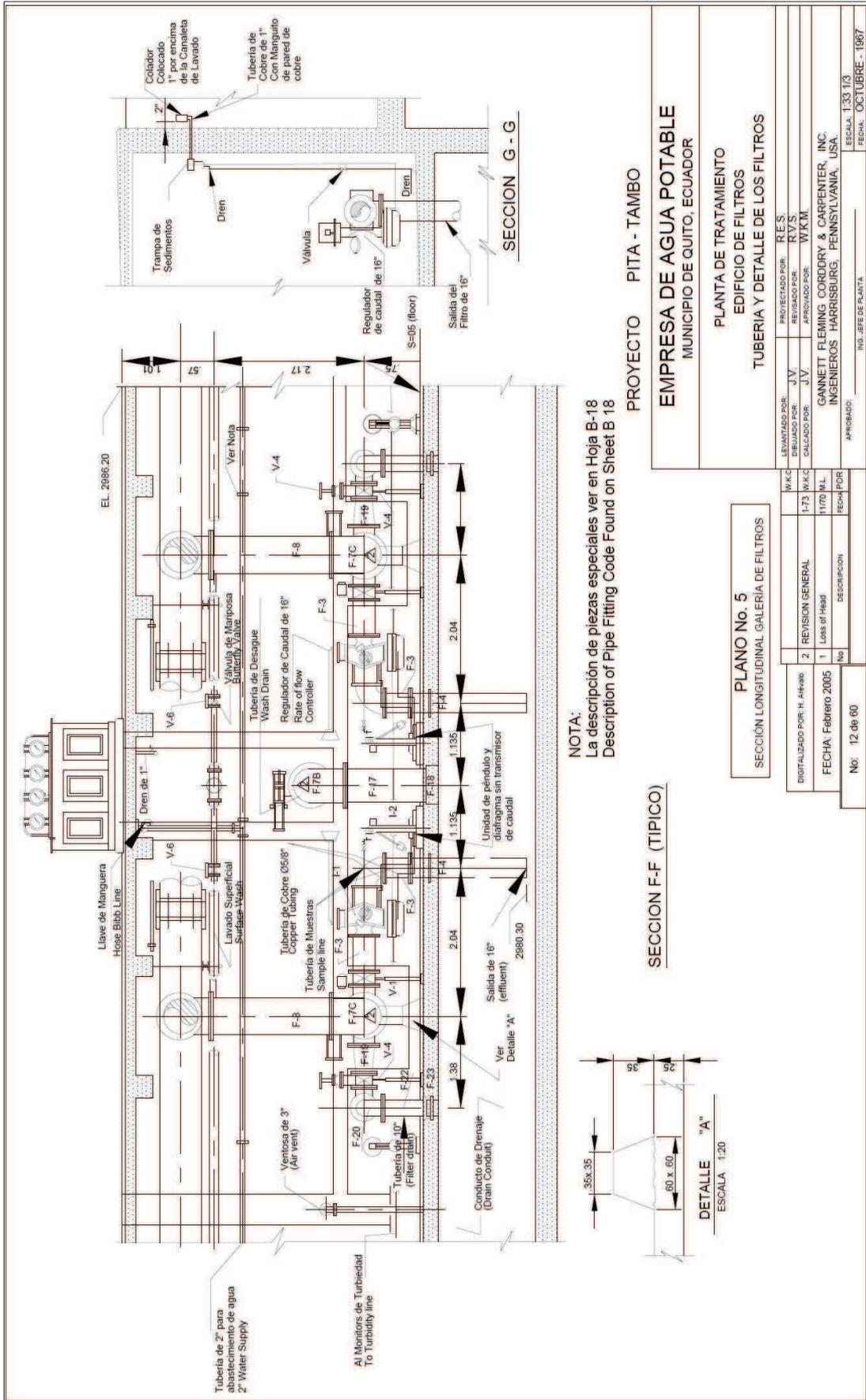
EMPRESA DE AGUA POTABLE
MUNICIPIO DE QUITO, ECUADOR

PLANTA DE TRATAMIENTO
EDIFICIO DE FILTROS
TUBERIA Y DETALLE DE LOS FILTROS

PLANO No. 4
SECCIÓN TRANSVERSAL GALERÍA DE FILTROS

DIGITALIZADO POR: H. Arévalo	2	REVISION GENERAL	1-73	W.K.C	LEVANTADO POR:	PROYECTADO POR: R.E.S.
FECHA: Febrero 2005	1	Loss of Head	11/70	M.L.	DIBUJADO POR: J.V.	REVISADO POR: R.V.S.
No: 12 de 60		DESCRIPCION	FECHA	POR	CALCADO POR: J.V.	APROBADO POR: W.K.M.
					GANNETT FLEMING CORDDRY & CARPENTER, INC. INGENIEROS HARRISBURG, PENNSYLVANIA, USA.	
					APROBADO:	ESCALA: 1:33 1/3
					INS. JEFE DE PLANTA	FECHA: OCTUBRE - 1967

PLANO 5



ANEXO No. 6
FOTOGRAFÍAS FASES DE: EVALUACIÓN E
INVESTIGACIÓN PILOTO

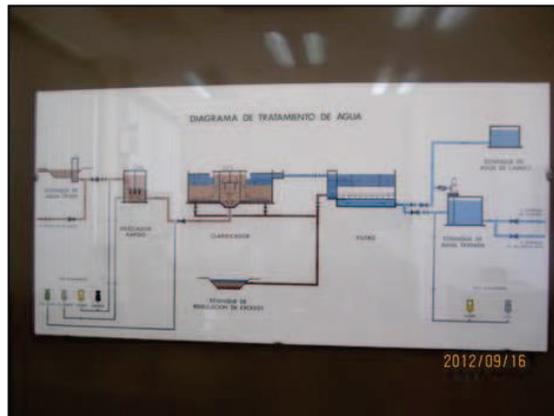
ARCHIVO FOTOGRÁFICO PTAP

FOTOGRAFÍA No. 1 MAQUETA DE PTAP



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 2 DIAGRAMA DE PROCESOS DE PTAP



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 3 INGRESO Y TANQUE DE AGUA CRUDA



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 4
CLARIFICADORES CIRCULARES



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 5
CLARIFICADORES CUADRADOS Y FILTROS



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 6
SALA DE CONSOLAS DE FILTROS



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 7
CANALETAS DE LAVADO Y SISTEMA DE LAVADO SUPERFICIAL



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 8
FILTRO No. 6, FONDO FALSO AVERIADO



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 9
GALERÍA DE FILTROS



Fuente: PTAP

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EVALUACIÓN DE FILTROS

FOTOGRAFÍA No. 10

EQUIPO PARA MEDIR EXPANSIÓN, VELOCIDAD DE LAVADO Y FILTRACIÓN



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 11

VÁLVULA DE SALIDA, PIEZÓMETRO Y PESA DE REGULACIÓN



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 12

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 13
MEDICIÓN DE FLUCTUACIÓN DE PERDIDA DE CARGA



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 14
DETERMINACIÓN DE ALTURA DE ANTRACITA Y ARENA



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 15
MUESTREO DE ANTRACITA Y ARENA



Fuente: PTAP

FOTOGRAFÍA No. 16
EVALUACIÓN DE CAPA SOPORTE



Fuente: PTAP

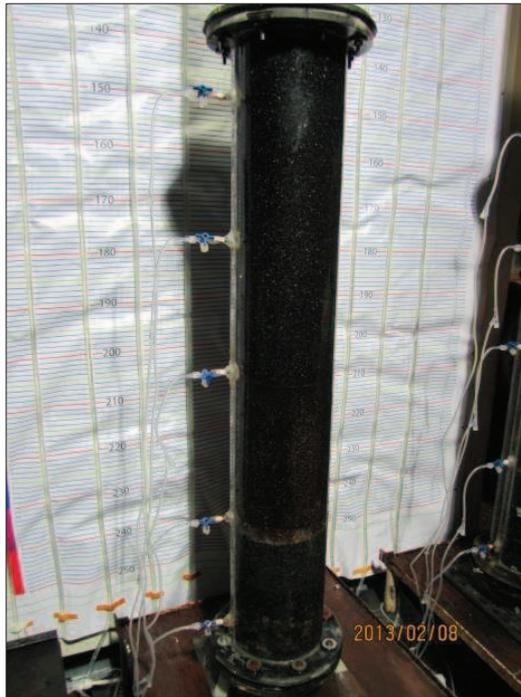
FOTOGRAFÍA No. 17
INTERMEZCLA GRAVA, ARENA Y ANTRACITA



Fuente: PTAP

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE INVESTIGACIÓN PILOTO

FOTOGRAFÍA No. 18 UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No.19 FILTRO PILOTO, CAPA SOPORTE DE GRAVA.



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 20
MONTAJE DE FILTROS PILOTO



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 21
CAJÓN REPARTIDOR DE CAUDAL AFLUENTE



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 22
AFLUENTE, SALIDA DE LAVADO Y DESBORDE



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 23
SISTEMA PILOTO, VISTA LATERAL.



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 24
SISTEMA PILOTO, VISTA POSTERIOR.



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 25
VÁLVULAS, MEDIDORES Y TUBERÍAS.



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 26
TAMIZADO DE MEDIOS FILTRANTES.



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 27
PESAJE DE MATERIAL FILTRANTE



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 28
ARMADO DE PIEZÓMETROS



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 29
AFORO DE CAUDAL EFLUENTE



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 30
MUESTREO EN EFLUENTE



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 31
MEDICIÓN DE TURBIEDAD



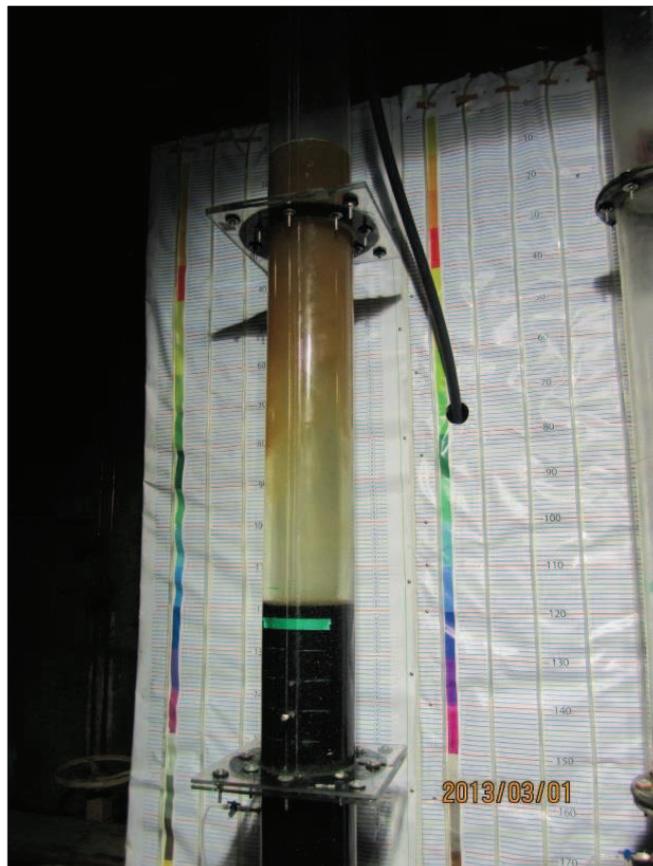
Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 32
FILTRO PILOTO AL INICIO DE LAVADO



Fuente: Filtro piloto, PTAP

FOTOGRAFÍA No. 33
FILTRO PILOTO EN PROCESO DE LAVADO



Fuente: Filtro piloto, PTAP

ANEXO No. 7
PROCEDIMIENTO DE FILTRACION

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento ISO 9001	PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ INSTRUCCIONES DE TRABAJO PARA FILTRACIÓN DEL AGUA	REVISIÓN	No. 06
		FECHA	2012- MAYO
	CÓDIGO: IGAP-34		HOJA

1. OBJETO:

Ejecutar y controlar la operación de los filtros de la Planta de tratamiento de Puengasí

2.- ALCANCE:

Aplicar para las actividades de operación de uno solo de los filtros en vista de que los ocho filtros tienen las mismas características.

3.- DEFINICIONES:

- **Flóculos:** Hidróxido de aluminio resultante de la reacción del coagulante con el agua
- **Pérdida de carga:** Resistencia a fluir el agua clarificada a través del lecho filtrante

4.- DOCUMENTOS DE REFERENCIA:

Norma ISO 9001

5.- RESPONSABILIDAD Y AUTORIDAD:

Estas instrucciones pertenecen al proceso de producción
 El Jefe de Producción es el responsable de la aprobación del presente documento
 El Jefe de Planta es el responsable de la revisión del presente documento
 El Funcionario de Laboratorio y el Funcionario de Gestión de procesos y calidad son responsables de la elaboración y modificación del presente documento
 El Supervisor de Operación es el responsable de su cumplimiento, el grupo de operación es el responsable de ejecutar las actividades detalladas en este documento y de registrar los datos en los formularios correspondientes
 El Funcionario de laboratorio es el responsable de controlar las actividades pertinentes al control de calidad detalladas en el presente documento durante días y horas laborables.
 El control de la documentación se lo hará en función del procedimiento "Procedimiento para el control de la documentación" PHAS-03-427/445-01.

6.- INSTRUCCIONES:

6.1 Puesta en operación de un filtro previamente lavado:

- Verificar la presión del tanque hidroneumático la cual debe estar de 60 a 120 psi
 Verificar que las válvulas de drenaje estén cerradas

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento ISO 9001	PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ INSTRUCCIONES DE TRABAJO PARA FILTRACIÓN DEL AGUA	REVISIÓN	N.- 06
		FECHA	2012- MAYO
	CÓDIGO: IGAP-34		HOJA

- Establecer la rata de filtración (Pesas en los filtros)
- Abrir lentamente la compuerta de ingreso de agua clarificada y llenar hasta el nivel establecido.
- Abrir lentamente las válvulas de filtración
- Anotar la hora de iniciación de la puesta en operación del filtro, pérdida de carga y rata de filtración. Además anotar cada 3 horas, la pérdida de carga, rata de filtración y el caudal en proceso de agua tratada para la distribución en el “Formulario para control de operación de filtros en la planta de tratamiento de Puengasí”.

6.2 Parámetros tomados en cuenta para la salida de operación de un filtro:

- Un filtro puede salir de operación por:
- Que la pérdida de carga haya llegado a 1.70 m
- Que la turbiedad del agua filtrada pase de 2.0 NTU
- Que se hayan cumplido alrededor de 70 horas de funcionamiento

6.3 Salida de operación de un filtro:

- Verificar la presión del tanque hidroneumático la cual debe estar de 60 a 120 psi
- Cerrar lentamente las válvulas de agua filtrada hasta que se encuentre alrededor de 40 cm por debajo del desborde de la canaleta y comprobar que no exista aire en el filtro, observando la presencia de burbujas en el agua. Si es así, esperar unos minutos hasta su desaparición. Abrir las válvulas de agua filtrada para bajar el nivel de agua hasta aproximadamente 2 cm sobre las flautas de lavado superficial. Abrir lentamente la válvula del dren.

6.4 Medidas de cuidado para el lavado de filtros:

- Todas las válvulas de los filtros son controladas manualmente desde la mesa de operación, razón por la cual el operador previamente debe verificar que la presión en el tanque hidroneumático esté entre 60 y 120 psi antes de operar las válvulas.
- Toda apertura o cierre de válvula debe hacerse lentamente
- Comprobar que el nivel de agua en el tanque de retrolavado de 1470 m³ de capacidad, no sea menor a 3,10 m de altura. Tomar en cuenta que para el lavado se necesitan alrededor de 800 m³ de agua tratada.
- El caudal de agua de retrolavado debe ser de 480 a 500 l/s para evitar la pérdida de material filtrante.

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento ISO 9001	PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ INSTRUCCIONES DE TRABAJO PARA FILTRACIÓN DEL AGUA	REVISIÓN	N.- 06
		FECHA	2012- MAYO
	CÓDIGO: IGAP-34		HOJA

Medidas de cuidado para el lavado de filtros:

- Todas las válvulas de los filtros son controladas manualmente desde la mesa de operación, razón por la cual el operador previamente debe verificar que la presión en el tanque hidroneumático esté entre 60 y 120 psi antes de operar las válvulas.
- Toda apertura o cierre de válvula debe hacerse lentamente
- Comprobar que el nivel de agua en el tanque de retrolavado de 1470 m³ de capacidad, no sea menor a 3,10 m de altura. Tomar en cuenta que para el lavado se necesitan alrededor de 800 m³ de agua tratada.
- El caudal de agua de retrolavado debe ser de 480 a 500 l/s para evitar la pérdida de material filtrante.

6.5 Lavado del filtro:

- Verificar que la pérdida de carga sea de máximo 1.70 m y revisar que la turbiedad del agua del efluente del filtro no sobrepase de 2.0 NTU, lo cual se produce aproximadamente en 70 horas de funcionamiento. En el caso que se sobrepasen las condiciones antes mencionadas se procederá a lavar el filtro.
- Verificar la presión del tanque hidroneumático la cual debe estar de 60 a 120 psi
- Cerrar la compuerta de ingreso del agua clarificada
- Abrir el dren del filtro para evacuar el agua clarificada
- Cerrar lentamente las válvulas de agua filtrada hasta que se encuentre alrededor de 40 cm. por debajo del desborde de las canaletas y comprobar que no exista aire en el filtro. Si es así esperar unos minutos hasta su desaparición.
- Abrir las válvulas de agua filtrada para bajar el nivel del agua hasta aproximadamente 2 cm. Sobre las flautas de lavado superficial.
- Anotar los datos totalizados de las lecturas iniciales de lavado superficial y retrolavado en el "Formulario para control de operación de filtros en la planta de tratamiento de Puengasí".
- Abrir la manija de lavado superficial y luego prender la bomba de presión durante 5 minutos.
- A los cuatro minutos se abre lentamente la manija del retrolavado hasta que el marcador de caudal indique alrededor de 500 l/s este lavado se realiza durante 10 minutos (se inicia el conteo del tiempo desde que el agua desborda hacia las canaletas).
- Cuando el nivel del agua en el filtro sea de 20 centímetros del desborde superior de las canaletas, se apaga la bomba de presión. A 10 centímetros del desborde se cierra la manija de lavado superficial.

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento ISO 9001	PLANTA DE TRATAMIENTO DE PUENGASÍ INSTRUCCIONES DE TRABAJO PARA FILTRACIÓN DEL AGUA	REVISIÓN	N.- 06
		FECHA	2012- MAYO
	CÓDIGO: IGAP-34		HOJA

- Lavar las paredes y tubería mediante chorro de agua con manguera
- El tiempo total de lavado de un filtro (lavado superficial y retrolavado) es alrededor de 15 minutos. (Previa verificación visual del lecho y turbiedad del agua en el filtro).
- Cerrar la manija del retrolavado, posición C y se puede proceder en la misma forma al lavado de la otra unidad del filtro (se continúa con los mismos pasos anteriores), cerrando previamente el dren, aproximadamente 1 minuto antes de la parte final del lavado.
- Se verifica que todas las manijas estén cerradas y la bomba de presión apagada
- Registrar las lecturas finales del volumen de agua de lavado superficial y retrolavado para saber el volumen de agua gastado durante el lavado del filtro, (restando de las lecturas iniciales) y que son registrados en el "Formulario para control de operación de filtros en la planta de tratamiento de Puengasí". Se registra la hora de salida del filtro, hora de lavado, horas de operación y hora de ingreso del filtro lavado.

7.- ANEXOS:

- Formulario de control diario de operación de la planta de tratamiento de Puengasí
- Formulario para control de operación de filtros en la planta de tratamiento de Puengasí