

**DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS PARA
LA PLANTA BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S P**

**CAROLINA CACUA TIRADO
DIONISIO ORLANDO SARAVIA SAMPAYO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS PARA
LA PLANTA BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S P**

**CAROLINA CACUA TIRADO
DIONISIO ORLANDO SARA VIA SAMPAYO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico

Director

ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA
Ph.D. Ingeniería Química

Codirector

JHON JAIRO BARRENECHE MARTÍNEZ
Químico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

*A mi abuela María principal
artífice de mi logro profesional,*

A mi madre Marlene

A mis hermanos Yury y Juan Diego,

*A mis tías y tíos, A mis Primos, por
su respaldo, fuerza y apoyo incondicional.*

*A mi compañero Dionísio,
por su paciencia y entrega.*

*Y a Dios por la vida y por permitirme
culminar felizmente
una gran etapa de mi vida.*

Carolina

DEDICATORIA

*A mis padres Lucía y Dionísio
por ser mi fuerza,
a mis abuelos
por ser mis guías,
a mi tío Orlando
por ser mi consejero,
a mi familia por su respaldo,
y en especial a mi tío Edgar
por mostrarme el camino en busca
de la gran persona que Él fue.*

*A mi compañera Carolina
por luchar junto a mí
en procura de este sueño.*

*A esa Energía transformadora
a la que muchos nos asombra
con su perfecto azar.*

Dionísio

AGRACECIMIENTOS

Agradecemos al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, por la oportunidad de trabajar en este magnifico proyecto.

A los ingenieros Isidro Ardila y Jhon Barreneche por sus aportes, consejos y direccionamiento.

A la ingeniera Yolanda Arboleda, por su apoyo y confianza.

Al Dr. Álvaro Ramírez García, director de este proyecto, por su paciencia, confianza y aportes.

A todo el personal de la planta Bosconia y del laboratorio de calidad, por las enseñanzas y colaboración desinteresada.

Y a todas las personas que participaron en el desarrollo de este proyecto, por su tiempo y ayuda.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GENERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
3. MARCO TEORICO	4
3.1 UNIDADES DEL PROCESO DE POTABILIZACION	4
3.1.1 Coagulación y floculación	4
3.1.2 Sedimentación	4
3.1.3 Filtración	5
3.2 FUENTES Y TIPOS DE LODOS	5
3.3 PROCESOS UNITARIOS DEL TRATAMIENTO DE LODOS	7
3.3.1 Tanque ecualizador	7
3.3.2 Espesamiento	7
3.3.3 Acondicionamiento	9
3.3.4 Deshidratación	10
4. MEDICIONES Y ANALISIS DE RESULTADOS	13
4.1 CUANTIFICACION DE LOS LODOS	13
4.2 CARACTERIZACION DE LOS LODOS	14
4.2.1 Purga del sedimentador	14
4.2.2 Lavado de filtros	17
4.2.3 Lavado del sedimentador	20
4.3 PRUEBAS DE ACONDICIONAMIENTO	21
4.3.1 Resistencia específica y tiempo de filtración del lodo sin polímero	21
4.3.2 Selección del polímero	22
4.4 DESHIDRATACION MECANICA	23
4.4.1 Centrifuga	23
4.4.2 Filtro prensa	24

4.4.3 Selección de la tecnología de deshidratación	26
5. DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS	29
5.1 PROCESO DE TRATAMIENTO	29
5.1.1 Tanque ecualizador	31
5.1.2 Tanque espesador	31
5.1.3 Acondicionamiento	32
5.1.4 Filtro prensa	32
5.1.5 Tanque de baja concentración de sólidos	32
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
7. BIBLIOGRAFIA	35
ANEXOS	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Volúmenes de lodo generados por filtros y sedimentadores	13
Tabla 2. Caracterización de las purgas del sedimentador	15
Tabla 3. Cantidad de materia seca en la purga	17
Tabla 4. Caracterización del lavado de filtros	18
Tabla 5. Caracterización del lavado del sedimentador	20
Tabla 6. Cantidad de materia seca en el lavado del sedimentador	21
Tabla 7. Tiempo de filtración del lodo utilizando polímero	22
Tabla 8. Propiedades del agua clarificada y del lodo deshidratado utilizando centrifuga	24
Tabla 9. Propiedades para el agua clarificada y del lodo deshidratado, utilizando filtro prensa	26
Tabla 10. Matriz de decisión de la tecnología de deshidratación	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sólidos totales de las purgas	16
Figura 2. Sólidos sedimentables de las purgas	16
Figura 3. Sólidos totales del retrolavado de filtros	19
Figura 4. Sólidos sedimentables del retrolavado de filtros	19
Figura 5. Centrifuga horizontal PIERALISI	23
Figura 6. Filtro prensa Ewalk-Schatt-Wachler Hamburg 36	25
Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de lodos	30

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Descripción de las unidades generadoras de lodos	37
ANEXO 2. Metodología de muestreo de la purga del sedimentador 4	50
ANEXO 3. Metodología de muestreo del lavado de filtros	53
ANEXO 4. Metodología de muestreo del lavado del sedimentador 4	56
ANEXO 5. Calculo del caudal y volúmen de lodo generado en la purga del sedimentador	58
ANEXO 6. Calculo de los caudales y volúmenes de lodos generados en el lavado de filtros	62
ANEXO 7. Calculo de caudales y volúmenes del lavado del sedimentador	65
ANEXO 8. Tablas y graficas del lavado del sedimentador	70
ANEXO 9. Montaje para la determinación de la resistencia específica y el tiempo de filtración	73
ANEXO 10. Calculo de la resistencia específica sin polímero	75
ANEXO 11. Tablas y figuras de la caracterización de las purgas del sedimentador	80
ANEXO 12. Tablas y figuras de la caracterización del lavado de filtros	86

RESUMEN

TITULO

DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS PARA LA PLANTA BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S P*

AUTORES

CAROLINA CACUA TIRADO

DIONISIO ORLANDO SARAVIA SAMPAYO**

PALABRAS CLAVES

Tratamiento lodos, sedimentador, filtro, espesamiento, acondicionamiento deshidratación mecánica.

CONTENIDO

En el presente trabajo se cuantificaron y caracterizaron los lodos vertidos por el sedimentador 4 y los filtros 3 y 8 de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia, luego se homologaron estos resultados a las demás unidades de sedimentación y filtración debido a su semejanza, y se obtuvo un valor aproximado de la cantidad y calidad de los vertimientos de la planta que entrarían al proceso de tratamiento de lodos.

Posteriormente se realizaron las pruebas de acondicionamiento, en las cuales mediante ensayos de tiempo de filtración se seleccionó el agente floculante (Superfloc A-110 HMW), a partir de 6 muestras poliméricas de carácter aniónico suministradas por Kemira Water.

Para escoger la tecnología de deshidratación, se realizaron ensayos de planta piloto con un filtro prensa en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Química (UIS) y con una centrifuga en la planta de tratamiento de lodos de Bavaria (Bucaramanga). Por medio de una matriz de decisión se compararon estas tecnologías y se optó por el filtro prensa.

Finalmente se plantearon las etapas del proceso de tratamiento de lodos (ecualización, espesamiento, acondicionamiento, deshidratación mecánica), los balances de materia y porcentajes de remoción de sólidos, basados en los estudios y ensayos realizados y en recomendaciones referenciadas en la literatura.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Álvaro Ramírez García

SUMARY

TITLE

CONCEPTUAL DESIGN OF THE SLUDGE TREATMENT PROCESSES FOR THE “BOSCONIA” TREATMENT PLANT OWNED BY A.M.B S.A E.S.P*

AUTHORS

CAROLINA CACUA TIRADO

DIONISIO ORLANDO SARAIVA SAMPAYO**

KEY WORDS

Treatment sludge, sedimentation, filter, conditioning, thickening, mechanical dehydration

DESCRIPCION

Presently work was quantified and characterized the sludge poured by the sedimentador 4 and the filters 3 and 8 of the “Bosconia” treatment plant, then these results were homologated to the other sedimentation units and filtration due to their likeness, and was obtained an approximate value of the quantity and quality of the flows of the plant that would enter to the process of treatment of sludge.

Later they were made the tests with the flocculants polymers, these were evaluated with the filtration time and was selected the Superfloc A-110 HMW of six anionic polymers samples, given by Kemira Water.

To choose the dewatering technologies, were made tests of pilot plant with a press filter in the laboratory of Chemical Engineering (UIS), and with a centrifuge in the Bavaria’s treatment plant of sludge (Bucaramanga). These technologies were compared in a decision matrix, opting for a press filter.

Finally the stages of the sludge treatment processes (equalization, thickening, conditioning, dewatering and mechanic dehydration) were designed, specifying the mass balance and the percentage of solids removed, based on the realized tests and recommendations of the literature.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Chemical Engineerings, Chemical Engineering Studies Department, Head of the Project. Ph D. Álvaro Ramírez García

1. INTRODUCCION

El sustento de agua necesaria para el desarrollo normal de las actividades diarias de un núcleo de población es suministrado por un Acueducto, pero para llevar a cabo la prestación de este importante servicio, se necesita además de las obras civiles para su localización, instalación y distribución, una serie de tratamientos unitarios para purificar el agua de abastecimiento para una determinada población. La complejidad de estos tratamientos, se debe a las diferentes condiciones de turbiedad, compuestos metálicos y biológicos propios del agua cruda la cual llega al Acueducto para ser tratada con diferentes reactivos químicos (coagulantes), que ayudan a la desestabilización de estas partículas en suspensión o disueltas, que luego se separaran por posteriores procesos unitarios (floculación, sedimentación y filtración). El tratamiento de esta agua conlleva a la producción de un lodo residual el cual es vertido al río, cuando se realizan purgas y lavados en los sedimentadores y filtros, en caso de no darles una adecuada disposición final, se contribuye de manera importante a la contaminación del ambiente afectando suelo, agua y aire.

Este problema de contaminación no es ajeno a la planta Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga que actualmente descarga los residuos generados a el cuerpo de agua superficial mas cercano (río Suratá), debido a los costos y a la falta de políticas y leyes claras que habían cuando se puso en marcha el proyecto río Suratá, en el que no se incluyo el tratamiento de estos residuos como parte integral de la planeación y gestión del sistema de tratamiento de aguas.

Debido a esta problemática y a la legislación vigente¹ que prohíbe verter, sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseosos, que puedan contaminar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de

¹ Artículo 70 y 72 del decreto 1594 de 1984

la flora o fauna, nace la necesidad de realizar el presente trabajo en el que se propuso un diseño conceptual para el tratamiento de estos residuos.

En el capítulo tercero se describen las unidades básicas del proceso de potabilización, las fuentes y tipos de lodos y los procesos unitarios del tratamiento de lodos.

En el capítulo cuarto se muestran las mediciones y los análisis de resultados de la caracterización y cuantificación de los lodos generados en la purga y lavado del sedimentador y lavado de filtros, además las pruebas de acondicionamiento para elegir el polímero y las pruebas de deshidratación mecánica para elegir la tecnología de deshidratación.

En el capítulo cinco se muestra el diseño básico de tratamiento de lodos y un breve análisis de las capacidades y concentraciones que enfrentaría este proceso cuando se realice la descarga máxima de lodos que se presenta cuando se lava un sedimentador.

En el capítulo seis se dan las conclusiones y recomendaciones generadas por el presente trabajo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar el proceso de tratamiento de los lodos producidos durante la potabilización de agua en la planta Bosconia del A.M.B S.A., que permita la disposición final de los residuos sólidos y contribuya al saneamiento del impacto ambiental.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Cuantificar los lodos generados en las diferentes unidades (sedimentadores y filtros) del proceso de potabilización en la planta Bosconia.
- Caracterizar química y físicamente los lodos generados, determinando relación entre las diferentes variables.
- Realizar pruebas de resistencia específica y tiempo de filtrado para determinar la dosis óptima de polielectrolito, que permita la mejor deshidratabilidad del lodo.
- Seleccionar entre las tecnologías de deshidratación (filtro prensa, centrifuga), la mejor alternativa para la deshidratación del lodo.
- Diseñar el proceso de tratamiento de los lodos generados en la planta, con base en los resultados obtenidos.

3. MARCO TEORICO

3.1 UNIDADES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

El suministro de agua purificada para el consumo humano o para ser utilizada en las industrias es una de las dificultades más graves con que se enfrenta el hombre en la actualidad. Al aumentar la población y progresar los métodos técnicos y el nivel de vida crece la necesidad de agua volviéndose el problema cada vez más difícil de resolver.

Una de las formas de brindarle a la comunidad agua apta para su consumo, es a través del tratamiento de aguas superficiales mediante los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, los cuales dejan dependiendo del coagulante, lodos que se acumulan en los sedimentadores y en los lechos de filtración.

3.1.1 Coagulación y floculación

En la coagulación se da la aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes, que por lo general son sales de Aluminio (Sulfato de aluminio) o de Hierro. A la suspensión coagulada se le aplica una agitación lenta provocando la aglutinación de estas partículas (Floc), proceso que se llama floculación.

3.1.2 Sedimentación

Después de que ha ocurrido la floculación en el agua, el siguiente paso es separar los sólidos del líquido, es decir los flocs formados y que están suspendidos en el agua.

La sedimentación es un proceso de separación sólido-líquido utilizado en el tratamiento de agua para bajar la concentración de sólidos en el agua, aprovechando su diferencia de densidad, con una velocidad de caída tal que estos pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable².

3.1.3 Filtración

Mediante un proceso de filtración se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio filtrante. Existen dos métodos que son los más comunes:

Filtración rápida: Proceso de filtración a alta velocidad.

Filtración lenta: Proceso de filtración a baja velocidad.

3.2 FUENTES Y TIPOS DE LODOS

Los lodos generados en las diferentes unidades de potabilización representan un gran volumen, estos lodos están compuestos principalmente por agua, además de sólidos provenientes del agua cruda como arcillas, compuestos no minerales, plancton, y otros sólidos agregados durante el tratamiento como hidróxidos de aluminio y/o hierro, hidróxidos de calcio, polielectrolitos, carbón activado en polvo, y demás compuestos químicos añadidos. Estos lodos tienen propiedades tixotrópicas, es decir, son de características gelatinosas en reposo pero líquidas en movimiento. Además, son compresibles y resistentes al espesamiento y deshidratación, especialmente aquellos generados con aguas de baja turbiedad.

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40%. Sin embargo en las

² ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera ed. Bogotá: McGraw Hill, 2000. 199 p

plantas que remueven hierro y manganeso los filtros retienen la mayoría de los lodos: 50 a 90%³.

El volumen de lodo generado en los sedimentadores representa de un 0.06 a un 0.25% del volumen de agua tratada por la planta. Su DBO varía entre 30 y 300 mg/l, su DQO entre 30 y 5.000 mg/l y la razón DQO/DBO es del orden de 15:1, indicando una baja proporción de materia orgánica biodegradable. La fracción de sólidos volátiles es alrededor del 30% de los sólidos totales, guardando relación con la razón DQO/DBO. La remoción del lodo puede ser manual (intermitente) o mecanizada (continua), con accionamiento manual o automático.

En el caso de limpieza manual, la unidad se vacía, cada 30 a 120 días, dependiendo de la turbiedad del agua, por medio de un desagüe en el fondo. La concentración de los lodos varía apreciablemente durante el desagüe y arrastre de fondo, en un rango de 0.2 a 2%. Terminado el desagüe, los bancos de lodo depositados en el fondo del sedimentador (concentraciones de 4 a 13%) son removidos con maquinarias y agua a presión. Cuando la limpieza es mecanizada, esta se realiza por bombeo o sifonamiento, con concentraciones que varían entre 0.1 y 6%, dependiendo de la frecuencia de lavado, requiriendo, además, una limpieza periódica manual. En los filtros, los lodos son removidos en el lavado de las unidades filtrantes cada 12 a 24 horas, de acuerdo a turbiedad del agua cruda, con un caudal del orden del 1 al 5% del agua filtrada. La concentración de sólidos totales varía de 0.01 a 0.1%, con una DBO del orden de 10 mg/l y DQO del orden de 100 mg/l⁴.

³ Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. SECCION II. Título C. Sistemas de potabilización. 2000.

⁴ Garcés, Díaz, Dellepiane. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Santiago de Chile, Chile

3.3 PROCESOS UNITARIOS DEL TRATAMIENTO DE LODOS

3.3.1 Tanque ecualizador

Este tiene por objeto recibir el agua proveniente de los desagües de la planta, y almacenarla para poder extraer de allí el caudal continuo con que se va a alimentar los espesadores. Debido a que los desagües se producen por pulsos de pocos minutos, cada vez que se lava un filtro o que se abre una de las válvulas de lavado de los sedimentadores, se requiere un tanque grande para manejar dichos caudales variables y de este ser bombeado continuamente a los espesadores.

Cuando se conoce la secuencia probable de lavado de los filtros y apertura de válvulas, es fácil calcular el volumen del tanque ecualizador de acuerdo con el diagrama de masas. De lo contrario puede asumirse la hipótesis de que su capacidad debe ser, como mínimo, la suficiente para almacenar el producido de dos lavados continuos de los filtros cada uno de 15 minutos, ósea 30 minutos de lavado a la rata máxima, simultáneamente con la descarga programada de las válvulas de los sedimentadores durante esa media hora, sin rebosarse, menos el flujo continuo que trasiegan las bombas a los espesadores en ese mismo tiempo, y que es el promedio del volumen total de desagües durante un día⁵.

3.3.2 Espesamiento

Entre los procesos de tratamiento de lodos se tiene el espesamiento que consiste en una reducción del volumen de aproximadamente un 30 – 80 % antes de cualquier otro tratamiento. En plantas de tratamiento de menor tamaño, con alimentación regular de lodo, el espesamiento tiene lugar generalmente directamente en el tanque de almacenamiento de los lodos. El lodo es comprimido

⁵ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera ed. Bogota: McGraw Hill, 2000. 294 p

en la base del tanque mediante gravedad, mientras en la parte superior se produce una capa de agua que se extrae y recircula nuevamente. En las plantas de tratamiento de mayor tamaño, existen tanques especiales de espesamiento de lodos. Estos tanques están equipados con rodillos de rotación vertical, que crea micro canales en el lodo para un mejor escurrido. La importancia de las maquinas de espesamiento tiene lugar en aquellos lodos no estabilizados, que pueden pudrirse durante el almacenamiento.

Frecuentemente se utilizan dos clases de espesamiento, gravedad y por flotación. El espesamiento por gravedad suele realizarse en decantadores estáticos circulares o rectangulares provistos de rasquetas que arrastran el fango precipitado hacia las arquetas de recogida y el agua decantada clarificada se extrae por los vertederos situados en la parte superior. A veces, los decantadores por gravedad, pueden disponer de lámelas que al aumentar la superficie de decantación permiten reducir el volumen del decantador, obteniendo los mismos o mejores resultados en el espesamiento.

El espesamiento por flotación, aprovecha la flotabilidad de las partículas (flóculos) cuando se les adhieren pequeñas burbujas de aire. Para la adherencia de estas burbujas de aire, basta con presurizar directamente la mezcla de fangos con aire, a una presión de 6 bares y descomprimir después a la entrada del flotador o también se puede presurizar directamente agua clarificada que se inyecta después en el propio fango. El fango flotado y espesado es retirado de la superficie mediante rasquetas superficiales. La concentración del fango en materia seca tras esta fase de espesamiento suele estar en el entorno del 3 - 4 % (30 - 40 gr/l).

3.3.3 Acondicionamiento

El lodo de plantas de tratamiento de agua potable requiere de algún tipo de acondicionamiento químico para producir una efectiva separación líquido / sólido. Los polímeros son eficientes como acondicionadores químicos y son ampliamente utilizados en la deshidratación con centrifugas. Los polímeros tienen dos funciones en el acondicionamiento del lodo para deshidratación. La primera es desestabilizar las cargas de las partículas sólidas, para favorecer la aglomeración. La segunda función es aglomerar esas partículas en flocs, por medio de mecanismos de adsorción y formación de puentes entre las partículas y el polímero.

Un exceso de polímero puede causar reestabilización de las partículas y bajas concentraciones serán insuficientes para el fortalecimiento de los puntos de cohesión de los flocs, tornándolos incapaces de resistir las altas fuerzas cortantes existentes dentro de la centrifuga (Hagstrom, 1996). Sin embargo, procedimientos para la optimización de la dosis de polímero, en aplicaciones de deshidratación mediante el uso de centrifugas no son ampliamente conocidos. En otras aplicaciones de deshidratación como la filtración al vacío, procedimientos como el ensayo del embudo de Buchner es usado para determinar la dosis óptima de polímero (Hagstrom, 1996). Estudios a escala de laboratorio permiten determinar qué tan eficiente es un polímero como acondicionador y determinar la dosis aproximada necesaria para deshidratar un lodo en particular⁶.

Generalmente la dosis de polímero se encuentra entre 0.5 y 1 kg de polímero por tonelada de solidos suspendidos totales (RAS – 2000).

⁶ ESCOBAR R., Juan Carlos. Selección de la dosis óptima de polímero para el acondicionamiento y deshidratación de lodos de plantas de agua potable mediante centrifugas de laboratorio. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún: México. 2002. 2 p

3.3.4 Deshidratación

El proceso de los lodos en la deshidratación puede producirse de manera natural (mediante camas secas, secado solar), durante un largo periodo de tiempo pero presenta inconvenientes, tanto en espacio como medioambientales. Los sistemas de secado natural tienen como principal ventaja el costo de su implementación, siempre que se disponga del área suficiente a bajo precio. Tienen un bajo consumo de energía y de productos químicos, una baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo y simplicidad de operación. Son apropiados para plantas pequeñas o aisladas dadas sus altas exigencias de superficie. Otras desventajas son una alta dependencia de las condiciones climáticas y un alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo.

En las lagunas, el secado de los lodos se realiza por la separación del sobrenadante y aguas lluvias y, principalmente, por la evaporación. La carga óptima de aplicación de sólidos (kg/m^2) en función de la concentración de sólidos y profundidad óptima de aplicación del lodo en el lecho, depende de la resistencia específica a la filtración del lodo a una presión diferencial de 0.5 bar ($r_{0.5}$), es decir, para los lodos difíciles de deshidratar, $r_{0.5}$ mayor a 50 Tm/kg, se recomienda menos de 0.46 m. y para lodos fáciles de deshidratar, acondicionados químicamente, $r_{0.5}$ menor a 0.1 Tm/kg, hasta 0.61 m. La carga de aplicación típica es de 40 kg/m^2 , para zonas lluviosas y 80 kg/m^2 en regiones secas.

En los lechos de secado, la remoción de agua se realiza por los mismos mecanismos que en las lagunas, agregándose el drenaje gravitacional a través de arena, grava y tubería de recolección. Para lodos sin acondicionar, se han aplicado cargas, en Europa Mediterránea, de 15 a 20 lt de lodo/ m^2 /día, con un ciclo de secado de 3 a 4 días⁷.

⁷ Garcés, Díaz, Dellepiane. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Santiago de Chile, Chile

Mas rápidamente, aunque en mas pequeñas cantidades (y también mas costoso) son las maquinas de proceso como las prensas (filtros de prensa), filtración al vacío y centrifugación. En esencia el filtro prensa consta de una serie de placas de fundición o de algún material moldeado, con caras acanaladas sobre las que se intercalan unas telas filtrantes, el fango previamente acondicionado generalmente con cal, se introduce en las cámaras que forman cada dos placas contiguas y se somete el conjunto a una elevada presión, del orden de 300 Kg/cm^2 , por medio de un dispositivo hidráulico. El funcionamiento es discontinuo, y muy laborioso, obteniéndose un fango bastante seco, próximo al 30% en materia seca.

La centrifugación, en definitiva es una decantación que tiene lugar en un decantador cilíndrico que gira a gran velocidad, esta rotación origina un campo centrífugo equivalente a varios miles de veces la fuerza de la gravedad precipitándose por tanto el lodo deshidratado en las paredes interiores del cilindro giratorio.

Las centrifugas industriales convencionales están formadas por un cuerpo cilíndrico rotatorio o rotor en cuyo interior gira en el mismo sentido y también a gran velocidad, aunque algo menor que el rotor, un tornillo helicoidal que va arrastrando hacia el exterior los sólidos que se han ido acumulando en las paredes interiores del rotor. La entrada del fango al rotor de la centrifuga tiene lugar por un tubo central. El tornillo helicoidal arrastra el fango retirado de las paredes internas del rotor hacia el exterior por un extremo, mientras que el agua clarificada sale por el extremo opuesto

La regulación de la velocidad diferencial entre el rotor y el tornillo helicoidal proporciona un medio de regulación de la centrifuga para extraer un residuo sólido más uniforme y seco. La centrifuga puede trabajar en continuo, siendo igualmente muy importante el empleo de un agente floculante o polielectrolito adecuado, a la entrada del rotor, para una mejor separación. En la deshidratación de estos fangos

en las centrifugas, se puede obtener unos lodos con una concentración en materia seca próxima al 20%.

Para una buena deshidratación, el tamaño y firmeza de los aglomerados del lodo son un factor importante, de manera que el lodo permanezca poroso durante la compresión. En la opción del proceso más apropiado de deshidratación es importante la consideración de las condiciones limitantes como: cantidad, estructura del lodo, disposición, regulaciones, disponibilidad, personal, etc.

El destino final de este tipo de lodos por ahora suele ser a vertedero controlado, como relleno de terrenos y canteras ya explotadas en determinadas zonas, o incluso compostaje junto con el fango de depuración de agua residual. Algunos fangos dado su elevado contenido en arcilla podrían emplearse en la fabricación de determinados productos cerámicos, tales como ladrillos, bases para baldosas y azulejos, etc., siempre que el contenido en materia orgánica sea bajo.

Generalmente estos fangos no están caracterizados como residuo tóxico o peligroso, por lo que generalmente pueden considerarse como vertido inerte de cara a su destino final en los vertederos controlados o para el relleno de terrenos, aunque periódicamente debe hacerse una prueba de peligrosidad y toxicidad.

El mayor coste en la gestión de estos lodos, es su retirada y vertido. El agua clarificada de todo el proceso de tratamiento de fangos puede ser recirculada al proceso de tratamiento de agua potable.

4. MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CUANTIFICACION DE LOS LODOS

Para la cuantificación de los lodos generados en las diferentes unidades descritas en el anexo 1, se analizaron 5 purgas, 5 lavados de filtro y un lavado de sedimentador. Los tiempos utilizados normalmente por la planta Bosconia para estas descargas son de 2 minutos para la purga y 6 minutos para el retrolavado.

FUENTE		Caudal Promedio Entrada (m ³ /s)	Caudal Promedio Vaciado (m ³ /s)	Caudal Promedio Salida (m ³ /s)	Tiempo (s)	Volumen (m ³)	
Purga de Sedimentador	Floculador	0,2	0,5	0,7	120	84 [*]	
	Sedimentador						
Lavado de Filtro	Vaciado	-----	0,80	0,80	126	100	215 ^{**}
	Agua sobre lecho	-----	0,80	0,80	59	47	
	Retrolavado	0,19	-----	0,19	360	68	
Lavado de Sedimentador	Floculador	0,05	0,40	0,45	3600	1620	2413 ^{***}
	Sedimentador					408	
	Lodo	-----	-----	0,026	15400	385	
	Agua manguera	0,025	-----	0,025	15400	385	

Tabla 1. Volúmenes de lodo generados por filtros y sedimentadores

En la tabla 1 se observan los caudales y volúmenes generados durante las diferentes descargas de lodo. Para la purga del sedimentador el volumen es de 84 m³ y el volumen del lavado de filtro de 215 m³, hay que tener en cuenta que estos valores deben ser multiplicados por las veces que se purga un sedimentador o se lava un filtro, para la planta Bosconia en promedio se lavan los filtros cada tres días que multiplicados por los 12 filtros existentes, da como resultado 120 lavados

^{*} Anexo 5. Calculo de caudales y volúmenes de la purga del sedimentador

^{**} Anexo 6. Calculo de caudales y volúmenes del lavado de filtros

^{***} Anexo 7. Calculo de caudales y volúmenes del lavado del sedimentador

de filtros mensuales, que equivaldría a un volumen de 25800 m³. El número de purgas realizadas entre el periodo de lavado del sedimentador está en el rango de 2 a 4 mensualmente; dependiendo de la época del año, el tiempo desde que se realizó el último lavado o su grado de colmatación y la cantidad de agua tratada. El volumen generado por el lavado del sedimentador fue de 2413 m³ que es casi ocho veces la suma de los volúmenes de una purga y un lavado de filtro, este volumen varía con la cantidad de agua de manguera que se requiera para remover el lodo de las canaletas y pasillos.

4.2 CARACTERIZACION DE LOS LODOS

Para la caracterización de los lodos se realizaron pruebas de: Sólidos sedimentables (SS), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad, pH. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de la planta Bosconia.

4.2.1 Purga del sedimentador

Para la caracterización de las purgas del sedimentador N. 4, se tomó como partida el lavado del sedimentador realizado el día 8 de marzo de 2007. Las purgas se realizaron en abril 13, mayo 3, mayo 17, mayo 31 y junio 21, la metodología empleada para la toma de las muestras se da en el anexo 2.

En la Tabla 2 se muestra los resultados de la caracterización de las muestras compuestas. Los rangos de turbiedad de las purgas están entre 3100 y 11000 NTU, para el pH el rango está entre 6,91 y 7,25. Los sólidos totales para estas purgas están en el intervalo de 8 mg/ml a 27 mg/ml, siendo este intervalo menor al 2% de sólidos, el intervalo de sólidos sedimentables es de 100 a 300 ml/l, que corresponde a un porcentaje de 10 a 30%. Además se puede observar que los sólidos suspendidos totales son casi el 99% de los sólidos totales.

PRUEBA		PURGA				
		Abril 13	Mayo 3	Mayo 17	Mayo 31	Junio 21
Turbiedad (NTU)		10700	11000	5500	10600	3100
pH		6,91	6,96	7,16	7,01	7,25
Sólidos Sedimentables (ml/l)	Tiempo de muestreo para homogenización (minutos)	7,67	6,33	6,33	6,33	6,33
	Compuesta	260	249	125	189	93
	Máximo	365 (minuto 4,67)	400 (minuto 3)	195 (minuto 3)	262 (minuto 3,67)	177 (minuto 0,67)
Sólidos Totales (mg/ml)	Compuesta	16,6502	12,8	6,52	11,5767	4,54
	Máximo	21,8722 (minuto 4,67)	22,086 (minuto 3)	9,7660 (minuto 2,67)	16,8080 (minuto 3)	8,9920 (minuto 0,67)
Sólidos suspendidos (mg/ml)		16,3200	12,6095	6,2860	11,1955	4,2320

Tabla 2. Caracterización de las purgas del sedimentador 4

En la Figura 1 se muestran los perfiles de las cinco purgas, estos perfiles se construyeron con las muestra puntuales de cada purga, además se muestra con una línea horizontal el valor de los sólidos totales de de cada muestra compuesta.

También se observa que la concentración máxima de sólidos totales para las muestras puntuales de las cuatro primeras purgas está en el intervalo de 3 a 5 minutos y para la última purga el valor máximo se alcanza a los 0,67 minutos.

Para casi todas las purgas el tiempo en que empieza a disminuir la concentración de sólidos totales es de 3 minutos, excepto para la primera purga, debido al largo periodo dejado entre el lavado del sedimentador y la purga, que hace que el lodo se compacte y necesite mayor arrastre para ser removido.

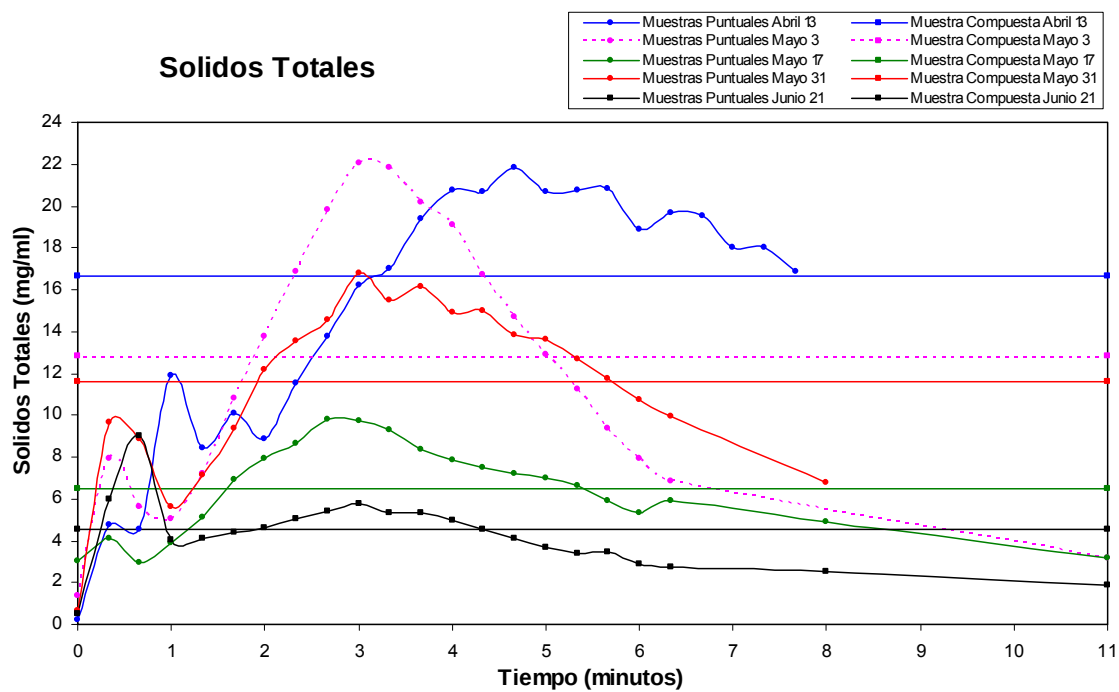


Figura 1. Sólidos totales de las purgas

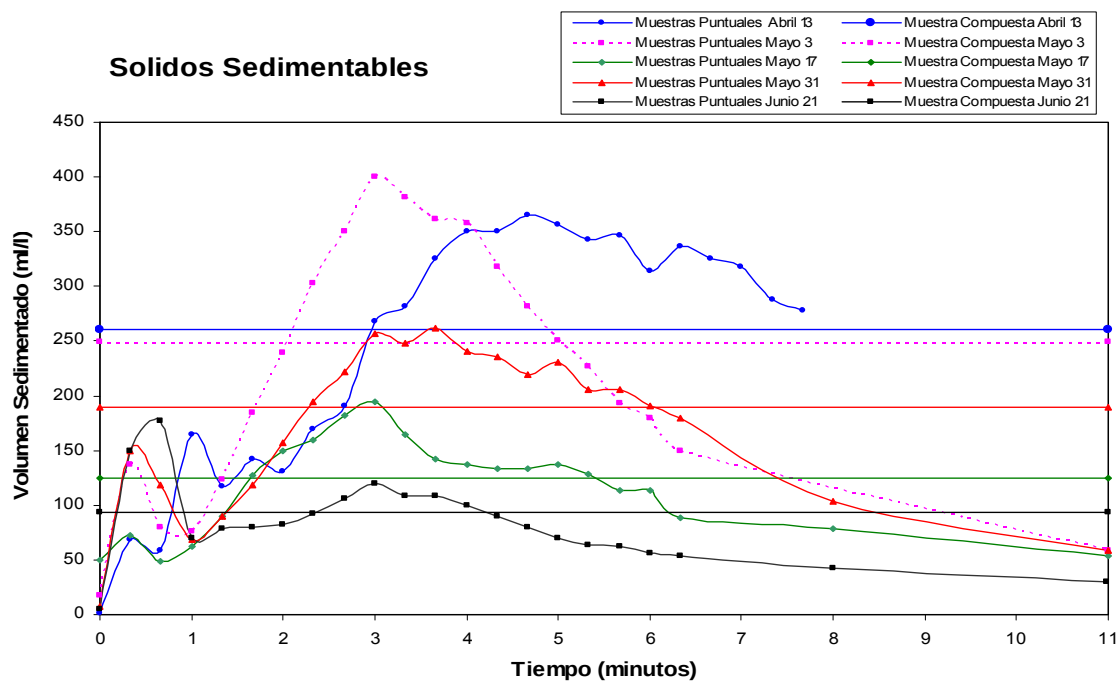


Figura 2. Sólidos sedimentables de las purgas

Los perfiles de los sólidos sedimentables de las purgas mostrados en la figura 2 muestran una gran correspondencia con respecto a los perfiles de los sólidos totales mostrados en la figura 1, notándose una proporcionalidad entre los sólidos totales y los sólidos sedimentables

En la tabla 3 se muestra los valores de materia seca que generan cada una de las purgas, que sumadas da un valor de 4254 kg.

No.	Purga	ST (Kg/m ³)	Volumen de Lodo (m ³)	Masa de lodo seco (Kg)
1	Marzo 8-Abril 26	16,3200	84	1370,88
2	Abril 27-Mayo 2	12,6095	84	1059,198
3	Mayo 3-Mayo 16	6,2860	84	528,024
4	Mayo 17-Mayo 30	11,1955	84	940,422
5	Mayo 31-Junio 21	4,2320	84	355,488

Tabla 3. Cantidad de materia seca en la purga

4.2.2 Lavado de filtros

Para la caracterización de los filtros se lavaron 5 filtros, tres veces el numero ocho y 2 veces el numero tres. La metodología del muestreo se puede ver en el anexo 3.

En la Tabla 4 se muestra los resultados de la caracterización de las muestras compuestas, tanto para el vaciado como para el retrolavado. Para el vaciado el pH esta entre 7 y 8, las turbiedades son menores a 10 NTU, la concentración de sólidos totales es menor a 0.01% (0.1 mg/ml) y los sólidos sedimentables son menores a 1 ml/l, para el retrolavado el pH esta entre 7 y 8, los valores de la turbiedad están entre 200 y 300 NTU, los sólidos totales no pasan de 0,05% (0,5 mg/ml) y los sólidos sedimentables son menores a 25 ml/l. Los sólidos suspendidos totales son el 60% de los sólidos totales, este valor deja ver que este

tipo de lodo presenta un mayor porcentaje de sólidos disueltos, que por su menor tamaño de partícula no se sedimentan y pasan al filtro.

PRUEBA		FILTROS				
		Abril 27 Filtro 8	Mayo 10 Filtro 3	Mayo 25 Filtro 8	Junio 6 Filtro 8	Junio 15 Filtro 3
Turbiedad (NTU)	Vaciado	5,3	4,7	7,9	4	6,6
	Retrolavado	230	261	295	275	239
pH	Vaciado	7,49	7,42	7,2	7,6	7,43
	Retrolavado	7,45	7,41	7,18	7,57	7,42
Sólidos Sedimentables (ml/l)	Tiempo de muestreo (minutos)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
	Compuesta Vaciado	0,01	0,02	0,04	0,03	0,02
	Compuesta Retrolavado	8	20	10	15	18
	Máximo (minuto 1)	26	88	42	60	94
Sólidos Totales (mg/ml)	Compuesta Vaciado	0,086	0,0244	0,0895	0,0234	0,0235
	Compuesta Retrolavado	0,414	0,4553	0,4636	0,4347	0,4793
	Máximo (minuto 1)	0,75	1,36	1,038	1,054	1,522
Sólidos suspendidos (mg/ml)		-----	0,3055	0,2875	0,2595	0,3135

Tabla 4. Caracterización del lavado de filtros

En la figura 3 se muestran los perfiles de los cinco retrolavados de filtro, estos perfiles se construyeron con las concentraciones de sólidos totales de cada muestra puntuales del retrolavado y las líneas horizontales corresponden al valor de las muestras compuestas para cada una de las purgas.

Se observa además que al minuto uno se alcanza la mayor concentración de lodo, al minuto 4 baja la concentración hasta un valor menor a 4 mg/ml, después de este tiempo la concentración no varía apreciablemente por lo que seguir retrolavando sería innecesario.

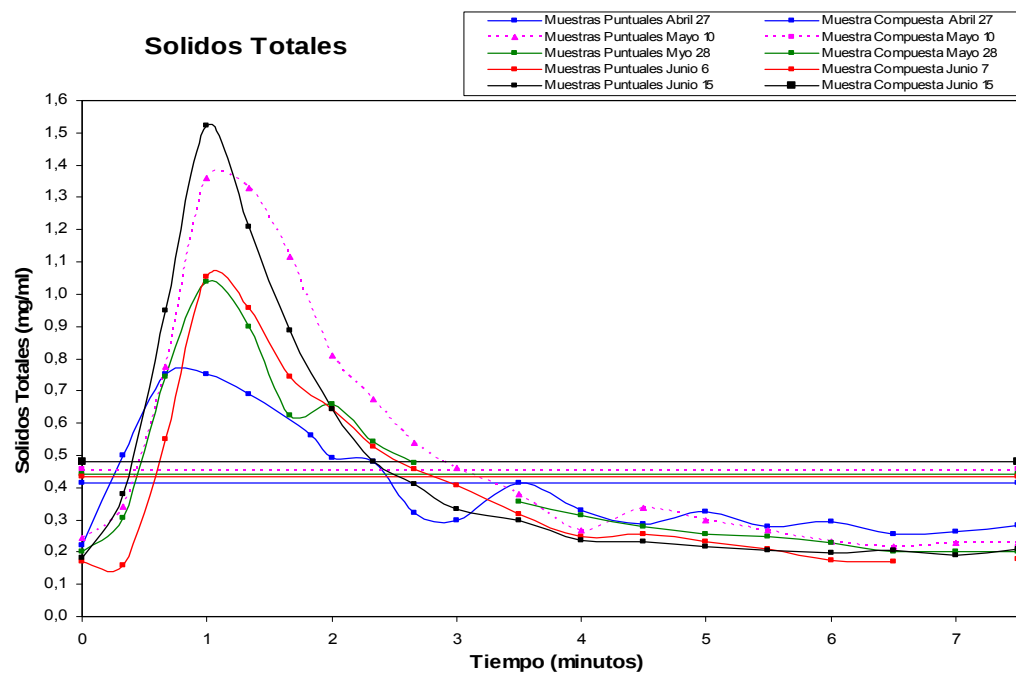


Figura 3. Sólidos totales del retrolavado de filtros

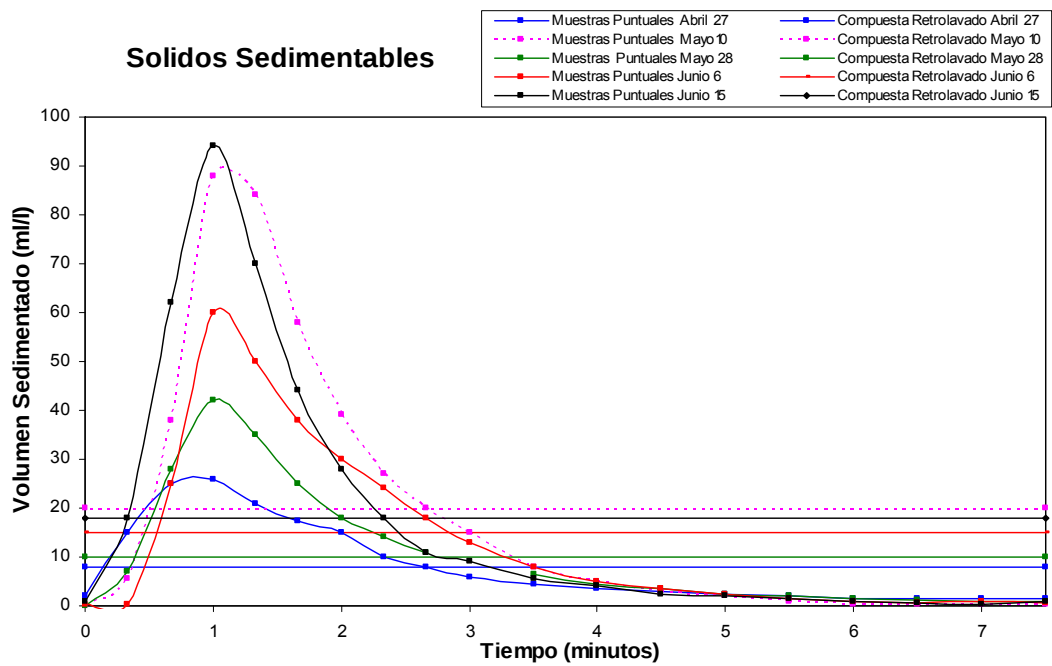


Figura 4. Sólidos sedimentables del retrolavado de filtros

En la figura 4 se muestra el perfil de las purgas con respecto a los sólidos sedimentables de las muestras puntuales. Los sólidos sedimentables al igual que los sólidos totales alcanzan la máxima concentración al minuto de retrolavado y se estabilizan en el minuto cuatro.

Los lodos del filtro también presentan una proporcionalidad entre los sólidos totales y los sólidos sedimentables.

4.2.3 Lavado del sedimentador

En la tabla 5 se observan los resultados de la caracterización de las muestras compuestas del vaciado y lavado del sedimentador, y la mezcla de estas.

La toma de muestras para estas pruebas se llevo a cabo el día 2 de julio de 2007 y la metodología de muestreo se describe en el anexo 4.

PRUEBA	Vaciado	Lavado con Manguera	Mezcla
Turbiedad Purga (NTU)	55000	52000	53000
pH	6,87	6,91	6,9
Sólidos Sedimentables (ml/l)	850	626	708
Sólidos Totales (mg/ml)	68,4020	60,1240	63,3500
Sólidos suspendidos (mg/ml)	68,3190	59,8050	62,7730

Tabla 5. Caracterización del lavado del sedimentador

En esta tabla también se puede observar que las concentraciones de sólidos para el vaciado y para el lavado con manguera son muy similares del orden de 6 a 7%, los sólidos sedimentables son mayores al 60% del volumen total y los sólidos suspendidos son casi el 99% de los sólidos totales.

El perfil de sólidos totales y sólidos sedimentables durante el vaciado se puede ver en el anexo 8, es importante destacar que los perfiles para el lavado del sedimentador se hicieron con las muestras puntuales del vaciado.

En la tabla 6 se puede observar que la cantidad de materia seca generada por un lavado de sedimentador es igual a 158098 kg, hay que tener en cuenta el valor del volumen que sale del sedimentador cuando se esta lavando con manguera es la suma del volumen gastado por las motobombas y el volumen del lodo que hay en las canaletas.

Fuente	ST (Kg/m ³)	Volumen de Lodo (m ³)	Masa de lodo seco (Kg)
Vaciado	68,3190	1620	110677
Lavado con manguera	59,8	793	47421

Tabla 6. Cantidad de materia seca en el lavado del sedimentador

4.3 PRUEBAS DE ACONDICIONAMIENTO

4.3.1 Resistencia especifica y tiempo de filtrado del lodo sin polímero

Para determinar la resistencia específica a la filtración del lodo sin polímero (anexo 10) se realizó una prueba por triplicado con el lodo de la mezcla de las muestras compuestas del vaciado y lavado con manguera de la tabla 5, que presenta una concentración de 63.35 mg/ml, la resistencia hallada fue de 6.6949×10^{12} m/Kg, esta resistencia es de un lodo con características de fácil deshidratación⁸ y el tiempo promedio de filtración fue de 270 s.

El método que se empleo para la determinación de la resistencia específica y el tiempo de filtración se explica en el anexo 9.

⁸ Los lodos con resistencia específica superior a 10^{13} m/kg son considerados de difícil deshidratación, mientras que los lodos con resistencia inferior a 10^{12} m/kg son considerados de fácil deshidratación. (AWWA, 1996)

4.3.2 Selección del polímero

Se utilizaron seis tipos de polímero suministrados por la empresa Kemira Water, de tipo iónico ya que el lodo tiene un pH relativamente alto⁹, estos polímeros fueron preparados¹⁰ en el montaje de prueba de jarrar de la planta Bosconia.

El lodo con el cual se hizo las pruebas tenía una concentración de sólidos totales de 49.251 mg/ml, este lodo se obtuvo del espesamiento de una purga del sedimentador cuatro el día 8 de octubre de 2007.

Inicialmente la variable para la selección del polímero fue la resistencia específica pero debido a la dificultad para tomar los datos, se tomo el tiempo de filtración (anexo 9) para la selección.

Tiempo de Filtracion (s)			
g de Polimero /kg de SST	0,2	0,4	0,6
Polimero			
SUPERFLOC A-100	26	17	41
SUPERFLOC A-110	45	19	22
SUPERFLOC A-120	46	15	24
SUPERFLOC A-130	54	15	18
SUPERFLOC A-110 HMW	40	14	22
SUPERFLOC A-115 HMW	45	21	22

Tabla 7. Tiempo de filtración del lodo utilizando polímero

En la tabla 7 se puede observar que los tiempos de filtrado se reducen hasta 18 veces, como en el caso del polímero SUPERFLOC A-110 HMW, quien presento el menor tiempo de filtrado con una dosis de 0.4 g de polímero por Kg de SST.

⁹ Monteagudo Maria, Durán Antonio. Guión de Practicad de diseño de procesos en ingeniería ambiental. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Ciudad Real, España.

¹⁰ Barreneche Martinez, John. Optimización de los procesos de clarificación mediante uso de polielectrolitos sintéticos del amb. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2003. Numeral 2.5.1.

4.4 DESHIDRATACION MECANICA

4.4.1 Centrifuga

Esta prueba se realizo en las instalaciones de la empresa Bavaria, con la centrifuga marca PIERALISI mostrada en la figura 5. La dosis de polímero utilizada para acondicionar el lodo fue de .4 g de polímero SUPERFLOC A-100 HWM por kg de sólidos suspendidos totales.



Figura 5. Centrifuga horizontal PIERALISI

Para esta prueba se purgo el sedimentador y se espeso hasta una concentración de 60 mg/ml, el volumen total de lodo espesado fue de 350 litros; este volumen se dividió en dos, 150 litros para la prueba de lodo sin polímero y 200 litros para la prueba de lodo con polímero, el tiempo de operación de deshidratación fue de 3 y 14 minutos respectivamente, por lo que la capacidad de la centrifuga fue de 0.53 l/s para el lodo sin polímero y de 0.2380 l/s para el lodo con polímero; con estos resultados se podría concluir que el polímero no mejora la eficiencia de la centrifuga y que por el contrario la desmejora, esto pudo haber ocurrido debido a la falta de homogenización del lodo acondicionado, desafortunadamente el único

medio de agitación que se utilizó fue el de burbujeo con una manguera que se le introdujo al tanque, pero no fue suficiente, pues en el lodo se formaron dos fases una clarificada y otra concentrada que quedó en el fondo e hizo difícil el bombeo a la centrifuga.

Las propiedades del agua filtrada mostradas en la tabla 8 dejan ver que el proceso de deshidratación con centrifuga tiene un porcentaje de remoción de sólidos de 95%, aunque la presencia de sólidos finos hacen que la turbiedad y el color sean bastante elevados.

Propiedades	Sin polímero	Con polímero
Agua filtrada		
pH	7,57	7,44
Turbiedad (NTU)	3240	2753
Conductividad (us/cm)	875	484
Color Verdadero (UPC)	533	467
Color Aparente (UPC)	34267	21000
Sólidos Totales (mg/ml)	2,84	2,436
Lodo deshidratado		
% Humedad	63,2	67,1

Tabla 8. Propiedades del agua clarificada y del lodo deshidratado utilizando la centrifuga

4.4.2 Filtro prensa

Estas pruebas se realizaron con el filtro prensa marca Ewalk-Schatt-Wachler Hamburg 36 de la escuela de Ingeniería Química, situado en el laboratorio de procesos. La capacidad del filtro prensa es de 20 litros y cuenta con 5 placas de

16 cm de lado entre las que se colocó una lona filtrante¹¹ y la presión utilizada fue de 17,2413 N/cm².



Figura 6. Filtro prensa

Se trabajó con el lodo producido en el lavado del sedimentador, cuya concentración inicial era de 63.35 mg/ml mostrada en la tabla 5, se hicieron tres pruebas con el mismo lodo; para la primera muestra se utilizó un volumen de 20 litros pero solo se filtró 8,8 litros en 1 hora, así que se disminuyó el volumen de lodo inicial para la segunda y tercera prueba en donde se utilizó un volumen de 8 litros y el agua filtrada fue de 7 litros en 40 minutos.

Con el área total de filtrado de las cinco placas y la cantidad de sólidos retenidos en la torta por unidad de volumen se calculó la capacidad de filtración que equivale a 5,39 Kg de sólidos/m²h.

¹¹ El tipo de tejido no afecta la tasa de filtrado después de los primeros minutos, y puede ignorarse desde el punto de vista teórico. (AWWA,2002)

En la tabla 9 se puede observar que la presencia de sólidos en el agua filtrada es casi nula y que la turbiedad y color tienen valores bastante bajos, además que el porcentaje de humedad del lodo deshidratado es baja.

Propiedades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Agua Filtrada			
pH	6,38	7	7,11
Turbiedad (NTU)	21,7	9,38	6,65
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	123,6	130,4	128
Mercurio (µm/L)	0,22	0,17	0,09
Conductividad (us/cm)	390	386	373
Color aparente (UPC)	363	112	81
Solidos Sedimentables (ml)	<1		
Sólidos Totales (mg/ml)	<0,5		
Sólidos Suspendidos (mg/ml)	<0,5		
Lodo deshidratado			
% Humedad	53.5	57	55.5

Tabla 9. Propiedades para el agua clarificada y del lodo deshidratado, utilizando filtro prensa

4.4.3 Selección de la tecnología de deshidratación

La elección de la tecnología de deshidratación del lodo se realizó por medio de una matriz de decisión para la cual se tuvo en cuenta las variables que se muestran en la tabla 10, a estas se les dio un valor de importancia de acuerdo al impacto que tienen en el proceso de tratamiento de lodos.

Variables de Decisión	Valor de Importancia	Filtro prensa	Centrifuga
Mano de obra	2	1	2
Eficiencia de separación de sólidos	4	4	3
Volumen del equipo	3	1	2
Confiabilidad en la operación	3	3	1
Calidad del agua tratada	4	4	1
Costos de inversión	4	2	3
Capacidad	4	3	4
Mantenimiento y limpieza	2	1	2
% Humedad de la pasta	3	3	2
Total	29	21	20
% de decisión	100%	76%	69%

Tabla 10. Matriz de decisión de la tecnología de deshidratación

Se hicieron algunas consideraciones tales como: La mano de obra del proceso de deshidratación con el filtro prensa es alta con relación a la centrifuga, ya que el filtro prensa necesita de la limpieza de las placas donde se lleva a cabo la filtración; la diferencia entre la eficiencia de separación de sólidos entre las dos tecnologías es poca ya que las dos tecnologías remueven mas del 95% de sólidos totales; del volumen del equipo se puede decir que la centrifuga no necesita un gran volumen comparado con el del filtro prensa que requiere de un gran numero de placas para el manejo de la misma cantidad de lodo; en la confiabilidad y calidad del agua se tuvo en cuenta que el filtro prensa pueden aceptar lodo con distinta capacidad de filtración, que incluye lodo con condiciones poco precisas para su filtrado, mientras que la separación con centrifuga depende del tipo de lodo, pues si el lodo tiene una concentración alta de sólidos insolubles la calidad del agua clarificada presentara alta turbiedad y color; la capacidad de las centrifugas en el mercado están en el rango de 2 a 180 m³/h, para el filtro prensa se encuentran filtros con gran variedad de tamaño de placa (hasta 2x2m) y la posibilidad de usar hasta 150 placas o más, lo que equivale a 150m³/h; en el filtro

prensa la limpieza de las membranas puede llevarse a cabo entre 15-30 operaciones del proceso, para unidades largas o medias esto tienen lugar en prensados usando spray de agua a altas presiones (80-100 bar), usualmente la limpieza esta sincronizada con la separación de las placas¹².

Finalmente se opto por el filtro prensa que tiene mejores valoraciones con respecto a la eficiencia de separación de sólidos, confiabilidad en la operación, calidad del agua tratada y bajo porcentaje de humedad en la torta de lodo deshidratado, además se puede emplear un filtro prensa semiautomático que reduciría el tiempo de operación y la mano de obra necesaria para su limpieza.

¹² www.lenntech.com

5. DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS

El diseño del proceso de tratamiento de lodos para la planta Bosconia esta basado en el análisis de resultados de la caracterización, cuantificación, selección del polímero y las pruebas de deshidratación.

5.1 PROCESO DE TRATAMIENTO

En la figura 6 se puede observar el diagrama de bloques del proceso de tratamiento de lodos, en donde se muestran los flujos y las respectivas concentraciones. La operación critica se presenta cuando se lavan los sedimentadores debido a que se genera un gran volumen de lodo en poco tiempo, por lo que las capacidades de las unidades de tratamiento de lodos se diseñaron para poder enfrentar esta operación, además se sumo la necesidad de tener que lavar la mitad de las baterías de filtros para no correr riesgos de subdimensionamiento.

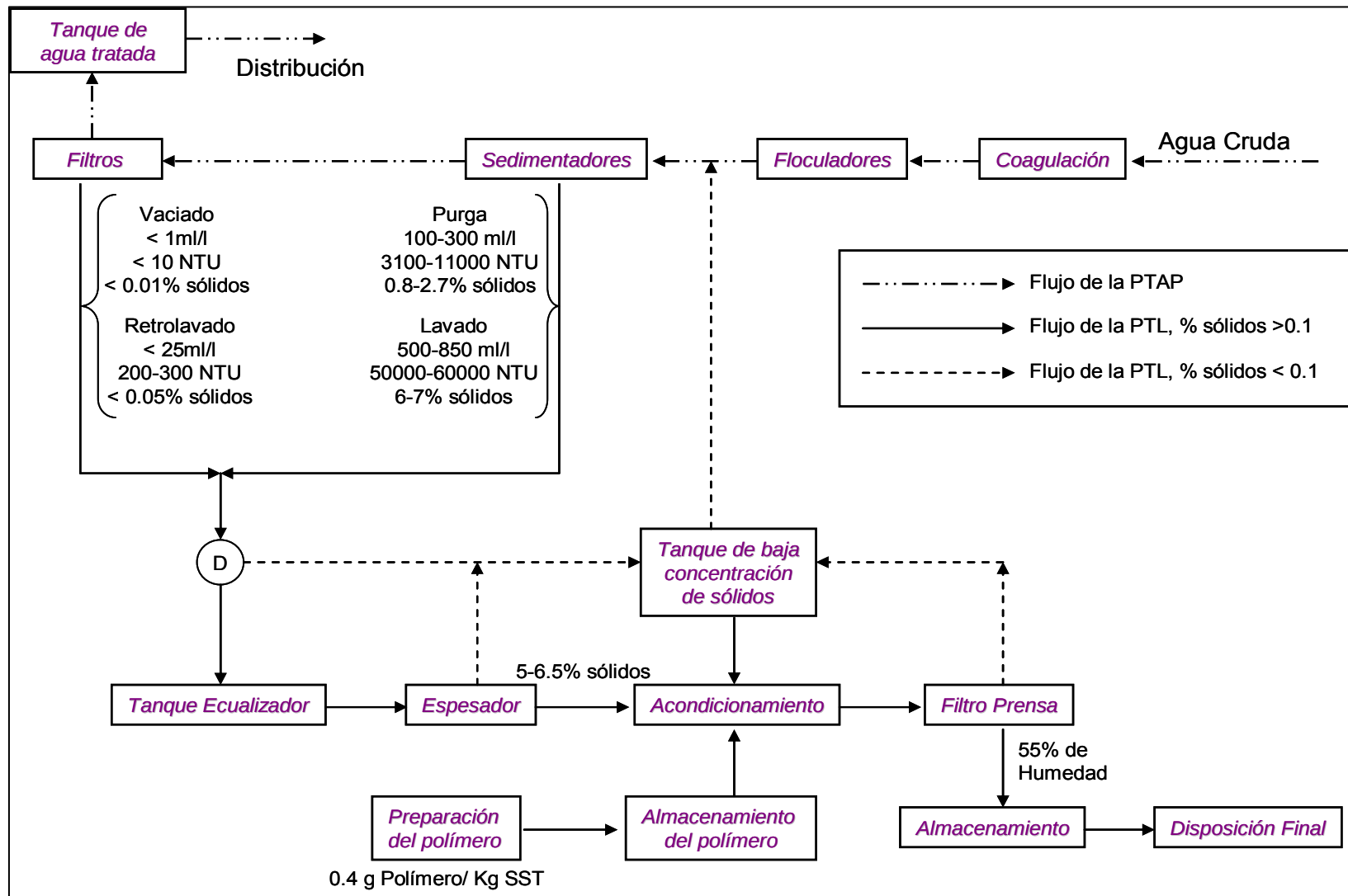


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de lodos

5.1.1 Tanque ecualizador

En este tanque se alimentan los lodos de las purgas y lavados de los sedimentadores, también parte del retrolavado del filtro que tenga una concertación mayor 0.05% de sólidos. El volumen mínimo de este tanque, corresponde a la suma de los volúmenes del vaciado de un lavado de sedimentador y el retrolavado de 3 filtros; este volumen se genera en una hora, y sería aproximadamente 1824 m^3 , que multiplicado por un factor de seguridad de 1.1 sería igual a 2000 m^3 ; las concentraciones de las corrientes alimentadas a este tanque oscilan entre 0.05 y 15% de sólidos. Este tanque alimentara al espesador un caudal que oscilaría entre los 200 a $250 \text{ m}^3/\text{h}$ que dependerá de las condiciones de operación.

5.1.2 Tanque espesador

Regulado el caudal de entrada a esta unidad por medio del tanque ecualizador, el volumen de este tanque estará sujeto al tiempo de retención que oscila entre de 30 a 40 minutos, tiempo estimado mediante observaciones al momento de realizar la determinación de los sólidos sedimentables; por lo que el volumen del tanque espesador será aproximadamente 500 m^3 , debido a que además de soportar el caudal critico de $250 \text{ m}^3/\text{h}$, este tanque normalmente se encontraría parcialmente lleno.

El caudal de salida será de 80 a $100 \text{ m}^3/\text{h}$ y tendrá una concentración de sólidos entre 5 y 6.5%, además este tanque debe tener una agitación muy lenta con rasquetas en el fondo para evitar la compactación del lodo y tener que realizar una remoción manual.

5.1.3 Acondicionamiento

El acondicionamiento se hará con un polímero tipo aniónico, que tendrá una concentración de 1g/l, este se dosificara en la corriente de lodo que sale del espesador, con una relación de 0.4 g de polímero por Kg de sólidos suspendidos en el lodo, en esta etapa es importante que haya una agitación mediante tortuosidad o flujo turbulento en la tubería, antes de entrar al filtro prensa, para evitar la separación de las fases.

5.1.4 Filtro prensa

Los flujos del proceso de tratamiento depende en gran parte de la capacidad del filtro prensa; comercialmente se encuentran filtros prensa con capacidades de hasta 150m³/h, para el presente diseño se escogió una capacidad estimada de 100 m³/h; hay que tener en cuenta que la altura de ubicación del filtro prensa debe ser tal que se pueda recoger por gravedad la torta que queda entre las placas al abrirlas.

La humedad del lodo que cae de las placas será de 50 a 60%, pero si se utiliza polímero se podrá reducir este porcentaje y la capacidad de filtración.

5.1.5 Tanque de baja concentración de sólidos

En este tanque se alimentara el agua de vaciado de los filtros que para la operación crítica planteada será de 420 m³/h, que corresponde al vaciado de tres filtros, además debe soportar el caudal del agua clarificad del filtro que esta entre 80 y 90% del caudal alimentado al filtro prensa, para este caso el caudal estaría entre 80 y 90 m³/h. El volumen de este tanque será de 500 m³.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Según la caracterización que se hizo a la purga, el tiempo en que se alcanza la concentración máxima de sólidos esta alrededor de 3 minutos, por lo que se recomienda purgar en un tiempo no menor a este; en la caracterización hecha a los filtros en la etapa de retrolavado se observo que después del minuto 4 la concentración de sólidos no varia apreciablemente.
- ✓ El lodo generado cuando se lava un sedimentador es de 2413 m^3 , este valor es la suma de los volúmenes del vaciado, lavado con manguera y lodo en las canaletas; para el caso del vaciado el volumen es de 1620 m^3 que se descarga en una hora, lo que hace que el tanque ecualizador no sea menor a este volumen.
- ✓ Si se purga con mayor frecuencia el sedimentador se evitara la compactación, y se disminuiría el tiempo y el volumen gastado en el lavado con manguera (385 m^3).
- ✓ Para las pruebas de acondicionamiento se tuvo en cuenta que el pH de los diferentes lodos es por lo general mayor a 7 y se utilizo un polímero de tipo iónico; este polímero redujo en casi 18 veces el tiempo de filtración.
- ✓ Con una resistencia específica a la filtración menor a 10^{12} m/Kg el lodo de la planta Bosconia se puede catalogar como un lodo de fácil deshidratación.

- ✓ Las propiedades del agua clarificada con el filtro prensa y las de vaciado de filtros, tienen concentraciones menores a 0.05% de sólidos, estas dos corrientes son alimentadas al tanque de baja concentración de sólidos, según el diseño propuesto, esto disminuiría la cantidad de agua a tratar, pues sería recirculada al sedimentador.
- ✓ Es recomendable hacer un manual de operación que indique la dinámica del lavado y purga del sedimentador, para estimar de una mejor forma los volúmenes que manejaría las diferentes unidades del diseño.
- ✓ Se recomienda hacer pruebas de toxicidad y peligrosidad al lodo, con el fin de disponerlos de la mejor manera.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera ed. Bogota: McGraw Hill, 2000.
2. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. SECCION II. Título C. Sistemas de potabilización. 2000.
3. AMERICAN WATER WORKS ASOCIATON (AWWA). Calidad y tratamiento del agua. 5 ed. Madrid. McGraw Hill. 2002.
4. APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastemer. 20 ed 1998.
5. GARCÉS, DÍAZ, DELLEPIANE. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Santiago de Chile, Chile
6. ESCOBAR R., Juan Carlos. Selección de la dosis óptima de polímero para el acondicionamiento y deshidratación de lodos de plantas de agua potable mediante centrífugas de laboratorio. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún: México. 2002. 2 p
7. MONTEAGUDO Maria, DURÁN Antonio. Guión de Practicas de diseño de procesos en ingeniería ambiental. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Ciudad Real, España.
8. BARRENECHE MARTINEZ, John. Optimización de los procesos de clarificación mediante uso de polielectrolitos sintéticos del a.m.b. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2003. Numeral 2.5.1.
9. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 1594 de 1984. Artículos 70, 71, 72.
10. ROLIM MENDOZA, Sergio. Sistema de lagunas de estabilización. McGraw Hill. Colombia. 2000
11. www.lenntech.com

ANEXOS

Anexo 1

Descripción de las unidades generadoras de lodos

GENERALIDADES

La planta de tratamiento de Bosconia hace parte del proyecto Suratá, cuyos estudios fueron realizados en el año de 1980, y el cual se realizó con el objeto de ampliar el suministro de agua potable al Área Metropolitana de Bucaramanga, con un horizonte de diseño al año 2000, el cual comprendió la construcción de la captación del río Suratá, las obras de pretratamiento (tanques desarenadores y presedimentadores), la planta de tratamiento de Bosconia, estación de Bombeo de agua tratada, subestación eléctrica, línea de impulsión y el sistema de redes y Tanques para la distribución del agua a la ciudad.

El proyecto río Suratá inició operaciones en agosto de 1984 aumentando en 2000 l/s la capacidad de producción mínima confiable del sistema completando una capacidad total de producción de 3840 l/s, que servirían para atender la población del Área Metropolitana del año 2003.

La planta de Bosconia está localizada en la vía que conduce de Bucaramanga, al municipio de Matanza, al Nororiente de la ciudad, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm. La planta tiene una capacidad de 2000 l/s, y es del tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación y filtración, desinfección y corrección de pH.

UNIDAD DE SEDIMENTACION

FLOCULADORES

Localización

Los floculadores están localizados entre las estructuras de llegada a la planta y los Sedimentadores.

Componentes

- Dos (2) tanques de floculación No.1 y No.2 (primera etapa) cada uno dividido en cuatro (4) cámaras de 6.00 metros de lado por 5.40 metros de profundidad, que funcionan en serie con un tiempo total de retención de 24 minutos (para 500 litros por segundo de capacidad).
El flujo entre las cámaras se establece a través de un orificio rectangular debidamente dispuesto en los tabiques divisores de concreto.
- Cuatro (4) conjuntos de agitadores de paletas de eje vertical en cada tanque Floculador (uno por cámara). Cada conjunto consta de cuatro (4) juegos de paletas y es accionado por un moto – reductor de 3 velocidades instalado sobre la pasarela del Floculador.
- Canales de conducción de agua floculada a los sedimentadores, de 1.10 metros de ancho y 3.25 metros de profundidad, que corren paralelos a las unidades sedimentadoras.
- Válvulas diámetro 10” (24), de desagüe de los tanques al canal de lodos.

El agua una vez floculada, es conducida a los sedimentadores por canales especialmente diseñados para evitar la rotura de los flocs.

Para el desagüe y limpieza de los tanques Floculadores, se abre la válvula de diámetro 10" que se encuentra en el fondo de la última cámara y que descarga directamente en el canal de lodos (que corre por debajo del canal de agua floculada).

SEDIMENTADORES

Localización

El sistema de sedimentación se compone de cuatro (4) unidades, dos de ellas (No.1 y No.2) correspondientes a la primera etapa y las otras dos (No.3 y No.4), a la segunda etapa. Están localizadas entre los Floculadores y la batería de filtros.

Componentes

El grupo de sedimentadores de la primera etapa se compone de:

- Dos (2) tanques sedimentadores de alta rata, cada uno de 24 metros de largo por 12 metros de ancho, divididos en cuatro (4) módulos trasversales independientes.

Los módulos tienen cada uno capacidad para 125 litros por segundo, y constan de los siguientes elementos:

- Canal longitudinal central de 0.80 metros de ancho y 3.50 metros de profundidad, por donde ingresa el agua floculada. Su fondo está formado de plaquetas separadas 10 cm unas de otras, dejando espacios por los cuales pasa el agua a las dos zonas de placas localizadas a lado y lado del canal central.

- Dos (2) filas de 169 placas inclinadas de asbesto – cemento de 2.40 x 1.20 metros y 1 centímetro de espesor, espaciadas 5 centímetros entre sí.
 - Cada sedimentador dispone de un conjunto de canales de sección triangular situados en el fondo en sentido longitudinal, unos en el centro de cada módulo y otros entre cada dos módulos adyacentes, destinados a recoger los lodos extraídos de las tolvas por tubos de diámetro 1 1/2".
- Cinco (5) canaletas colectoras de agua sedimentada en cada sedimentador, colocadas transversalmente a los módulos, encargadas de recoger el agua que asciende por entre las placas y conducirla hasta el canal de agua sedimentada.
En el sedimentador No.2, la tercera canaleta evacua también el agua recogida por las dos primeras mediante un pequeño tramo de canal dispuesto longitudinalmente en el último módulo. De esta manera, dada la distribución de la planta, se consigue que toda el agua de los dos sedimentadores llegue a la batería de filtros No.1.
 - Canal de agua sedimentada, que recibe el agua de las canaletas y la conducen hasta la batería de filtros.
 - Canales de recolección de lodos que salen por las canaletas triangulares. Están situados por debajo de los canales de agua floculada. La evacuación de los lodos se regula por medio de las compuertas (25) y (26) de diámetro 24" de accionamiento neumático, localizadas en los extremos de los canales de agua floculada.
 - Mesa de comando de las compuertas de desagüe de las cuatro (4) unidades de sedimentación.

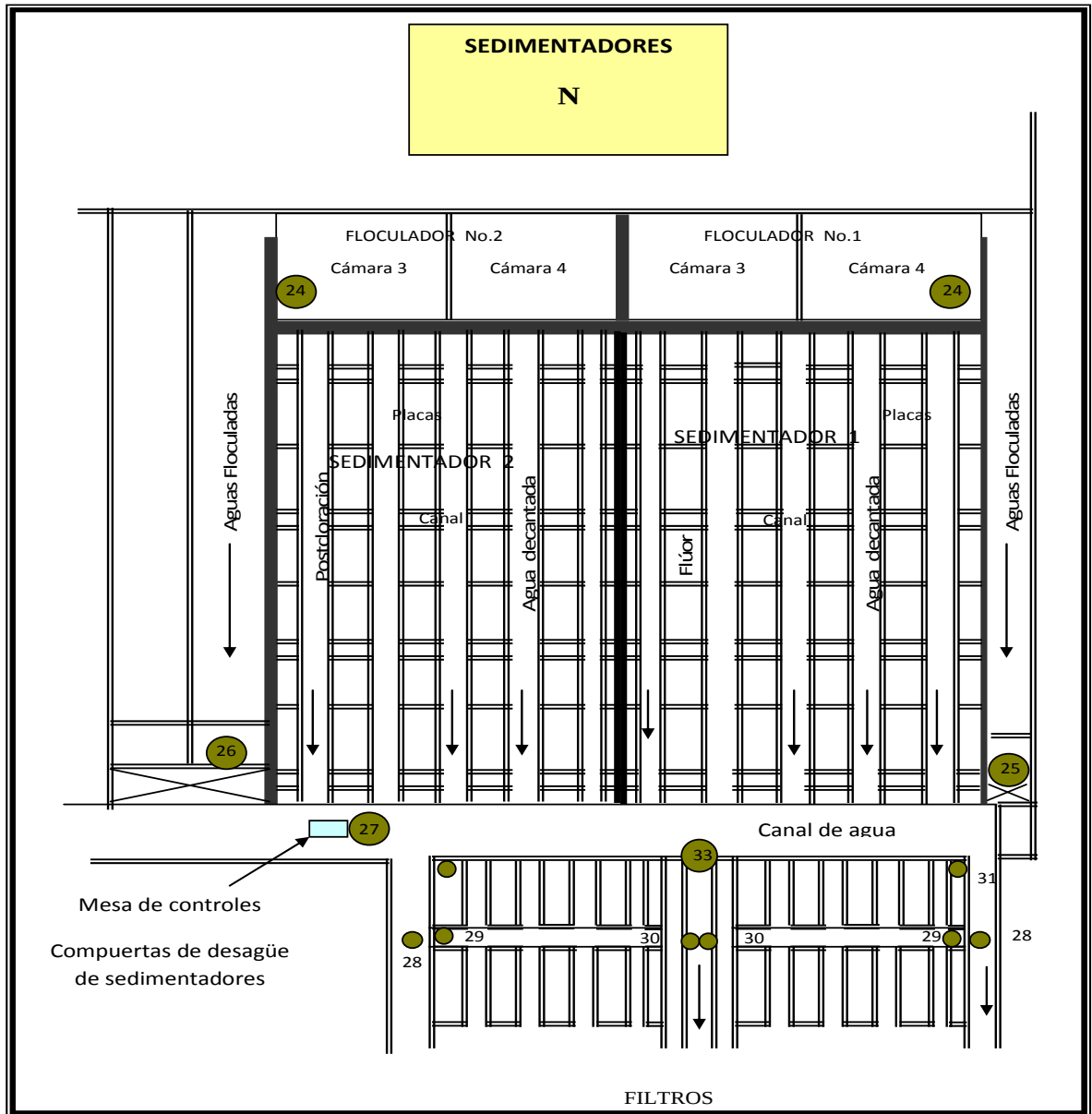
- Compuerta de diámetro 20" (27), para interconexión de los canales de agua sedimentada de la primera y segunda etapa.
- Compuerta 0.80 x 0.90 m (33) para control del paso directo del canal de agua sedimentada a la cámara de interconexión.

Funcionamiento

El agua floculada ingresa por el canal central longitudinal de los módulos y pasa por el fondo, a través de los espacios entre plaquetas, a la parte inferior de las zonas de placas; asciende por los espacios entre placas y es recogida en las canaletas recolectoras que la conducen hasta el canal de aguas sedimentadas.

En el acceso por entre las placas se efectúa la separación de los flocs, que se decantan por gravedad en las tolvas del fondo del sedimentador.

Los lodos decantados se extraen por acción hidráulica, al abrir las compuertas (25) y (26) de los sedimentadores No.1 Y No.2 por un periodo corto de tiempo. Al abrir esas compuertas, los tubos de 1 ½" succionan el lodo y lo sacan a los canales triangulares, de donde van a los canales principales de desagüe.



UNIDAD DE FILTRACION

FILTROS

Localización

El sistema de filtración está constituido por dos (2) baterías de 6 filtros rápidos, cada una correspondiente a los sedimentadores No.1 y No.2 de la primera etapa, y la otra a los sedimentadores No. 3 y No. 4 de la segunda etapa, ambas localizadas entre los sedimentadores y el tanque de almacenamiento de agua tratada.

Componentes

La batería No. 1 (primera etapa) se compone de los siguientes elementos:

- Seis (6) unidades filtrantes, cada una compuesta de dos (2) celdas de 6.70 metros de largo por 3.65 metros de ancho y un área filtrante total de 48.91m².
 - Tiene lecho filtrante formado por 2 capas: una superior de 0.45 metros de antracita y una inferior de 0.20 metros de arena, colocadas sobre una capa de 0.06 metros de arena torpedo la cual, a su vez, va sobre capas de gravas que le sirven de sostén y para distribución del agua para lavado.
 - El agua filtrada a través del lecho filtrante se drena por el falso fondo, constituido por viguetas triangulares prefabricadas con orificios de descarga de diámetro $\frac{3}{4}$ "espaciados cada 0.20 m.
 - Cada filtro tiene una cámara de salida del agua filtrada, provista de un vertedero de 2.00 metros de longitud, por el cual pasa el agua a

la cámara de interconexión, y mide el caudal de agua filtrada por la unidad.

- El caudal es medido por la altura de la lámina de agua en el vertedero, la cual es captada y convertida en litros por segundo por un dispositivo de medición, que transmite e indica el caudal en la mesa de comando.
 - Cada filtro está dividido longitudinalmente en 2 compartimiento por un canal central de 0.70 metros de ancho, al cual le llegan 8 canaletas recolectoras de agua del lavado (4 por cada lado del canal).
 - Válvula de diámetro 6" (31) de accionamiento manual desde el canal de desagüe de los filtros, para vaciado total del agua del filtro.
- Cámara de interconexión o canal de agua filtrada, que divide la batería longitudinalmente en 2 hileras de 3 filtros cada una. Tiene 1.30 metros de ancho y 3.65 metros de profundidad. Recibe el agua de los filtros por los vertederos de las cámaras de salida y suministra el agua para lavado de las válvulas (30) de mariposa.
 - Cámara de control del nivel, de 8.90 metros de largo y 3.00 metros de ancho, localizada al final de la cámara de interconexión, frente a la batería de filtros y dentro del tanque de agua tratada. Está provista de un vertedero de control de 3.00 metros de ancho, por el cual se vierte el agua filtrada por la batería a la cámara de recepción del tanque de almacenamiento y determina el caudal total producido por la batería de filtros.

El caudal es medido por la altura de la lámina de agua en el vertedero la cual es captada y convertida en litros por segundo por un dispositivo de medición, que transmite e indica el caudal en la mesa de comando de los filtros 5 y 6.

- Sistema de control de entrada y salida de agua de los filtros de accionamiento por cilindro neumático desde la mesa de comando, consistente en:
 - Compuertas (28) de 20" x 20", con posicionador de admisión de agua sedimentada (1 en cada filtro).
 - Compuertas (29) de 20" x 20", de desagüe del lavado (1 en cada filtro).

- Sistema neumático de accionamiento de las válvulas y compuertas y de regulación de los flujos de agua (filtrada y de lavado de los sedimentadores), consistente en:
 - Dos (2) compresores de suministro de aire a presión para accionamiento de las válvulas y compuertas. El sistema de aire está provisto de humificador y de trampas para extracción de agua de condensación en las tuberías conductoras.
 - Cilindros de accionamiento de cada una de las compuertas y válvulas.

- Consolas o mesas de comando de la operación de los filtros, localizadas en la galería de operación, sobre la cubierta de la cámara de interconexión.

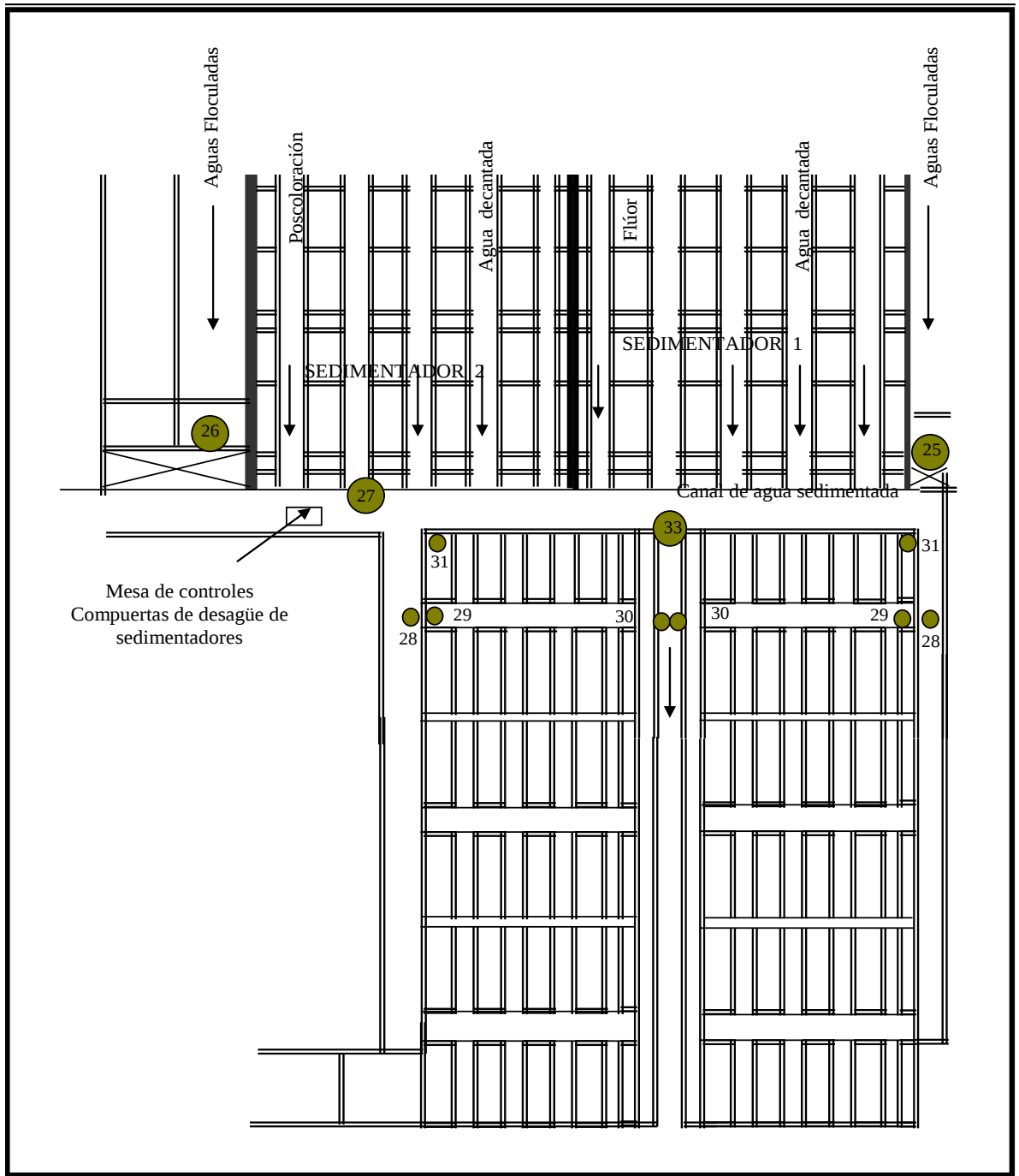
Funcionamiento

El caudal de agua sedimentada ingresa a los filtros regulado por las compuertas (28) de accionamiento neumático, desciende a través del lecho filtrante y el falso fondo, pasa a la cámara de salida del filtro y de allí a la cámara de interconexión o canal de agua filtrada, por el cual va a la cámara de control de nivel en el tanque de almacenamiento de agua tratada.

La rata de filtración se controla en cada unidad con la compuerta (28) de admisión de agua al filtro, fijándola en el posicionador de la mesa de comando. El caudal filtrado es medido en el vertedero de paso del agua de la cámara de salida a la interconexión.

Cuando se inicia el proceso de filtrado, el nivel del agua en los filtros se establece un poco por encima de la lámina de agua en el vertedero de la cámara de control de nivel. A medida que el agua va pasando por los filtros, estos se van colmatando y la pérdida de carga va aumentándose, lo cual causa subida del nivel del agua en los filtros y decrecimiento de la rata de filtración, hasta llegarse a la máxima altura de agua permisible. En ese momento se requiere lavar una unidad, que será aquella con mayor tiempo de operación continua o la que este con menor rata de filtración. El lavado se efectúa con flujo ascendente, con agua proveniente de las otras unidades de batería. Al cerrar la admisión de agua al filtro y abrir el desagüe, el nivel del agua en el filtro desciende hasta el borde de las canaletas de lavado, con lo que se establece una carga negativa con respecto al vertedero de control de nivel, que hace, al abrir la válvula de interconexión, que el flujo de los otros filtros penetre al filtro que se lava, ascienda por el lecho filtrante y salga por las canaletas y el conducto de desagüe.

La operación de las compuertas y válvulas se hace desde tres mesas de comando: una para los filtros 1 y 2, otra para los filtros 3 y 4 y una tercera para los filtros 5 y 6.



Anexo 2

Metodología de muestreo de la purga del sedimentador 4

En condiciones normales de operación la purga de los sedimentadores tiene una duración de 2 minutos, en este tiempo se deja salir una corriente de purga la cual es mayor al flujo de entrada a la unidad de sedimentación, debido a que los niveles del floculador y sedimentador se bajan, como se había mencionado anteriormente el floculador esta interconectado con el sedimentador por este motivo mientras estén llenos de agua las canaletas y pirámides del sedimentador, el nivel de agua para el sedimentador y el floculador subirá o bajara al mismo tiempo.

Toma de muestras puntuales

Para poder observar los máximos y mininos de la curva de sólidos totales y sólidos sedimentables, se definió un tiempo de purga superior al de operación, el cual para la primera purga (abril 13) era de 7.67 minutos, durante ese tiempo se tomaron muestras puntuales cada 20 segundos desde un tiempo 0 hasta 7.67 minutos..

Se decidió aumentar el tiempo de muestreo luego de graficar los datos de la primera purga, debido a que no alcanzaban a disminuir suficientes lo valores, el nuevo tiempo de muestreo se definió en 11 minutos divididos de la siguiente manera; muestras puntuales cada 20 segundos hasta los 6.33 minutos, y otras dos muestras puntuales, una los 8 y otra a los 11 minutos. A las muestras puntuales solo se le determinaron los parámetros de sólidos totales y sólidos sedimentables

Muestra compuesta

A las muestras compuestas de la purga del sedimentador se estableció que se le medirían los parámetros de; turbiedad, pH, sólidos totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.

La muestra compuesta para la primera purga se obtuvo agregando y homogenizando 1000 ml de cada muestra puntual en un tanque, pero las siguientes muestras compuestas se obtuvieron de las muestras puntuales recogidas hasta el minuto 6.33 sacando 1000 ml de cada una y agregándolas en un tanque.

Anexo 3

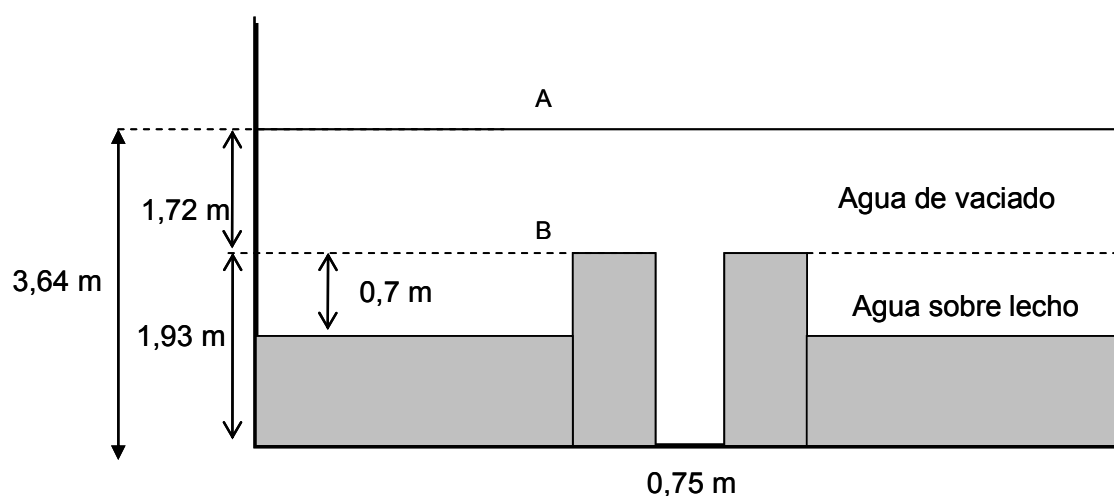
Metodología de muestreo del lavado de filtros

Aunque la cantidad de lodos que puede retener un filtro no difiera mucho pese a estar en diferentes baterías, de todas maneras se escogieron dos filtros de tal manera que estuvieran en diferentes batería, por lo que se estudiaron los filtros #3 #8, a los cuales se les realizó un seguimiento de manera intercalada y con tiempos de retrolavado iguales.

El lavado de filtros consta de dos etapas; la primera es el vaciado de la unidad y la otra es el retrolavado con agua.

Vaciado del filtro

Para este estudio se decidió que el volumen de vaciado se dividiría en dos partes debido a las diferencias entre la cantidad de ST y SS. El agua del punto A al B, se denominó agua de vaciado, y la otra parte se denominó agua sobre el lecho que va desde el punto B hasta los lechos filtrantes.



Para el agua de vaciado se tomaron 2 muestra puntuales y se homogenizaron, a la cual se le determinó, turbiedad, pH, sólidos totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.

Retrolavado del filtro

El tiempo del retrolavado se fijo en 7.5 minutos, tiempo en el cual se tomaron muestra puntuales de la siguiente manera; hasta el minuto 3, una muestra puntual cada 20 segundos, luego del minuto 3 hasta los 7.5 minutos una muestra puntual cada 30 segundos.



La muestra compuesta para el retrolavado se obtuvo sacando 1000 ml de cada muestra puntual y mezclándolas en un tanque.

Anexo 4

Metodología de muestreo del lavado del sedimentador 4.

Vaciado de la unidad de sedimentación

Para realizar el lavado de los sedimentadores primero tiene que estar completamente desocupado, debido que la remoción de los lodos compactados presentes en los pasillos, canaletas y pirámides se realiza de manera manual con mangueras a presión. El estudio se realizó para el sedimentador #4 el cual por su diseño puede retener mayor cantidad de lodos que los sedimentador #1, #2 y #3.

Se tomaron muestras puntuales cada 4 minutos, desde que se abrió la compuerta para desocupar la unidad hasta completar una hora cuando el lodo empezó a salir con dificultad, por lo que se procedió a empezar el lavado con mangueras. A estas muestras puntuales se les realizó un curva de sólidos de totales y sólidos sedimentables.

De cada muestra puntual se sacaron 1000 ml y se mezclaron en un tanque para obtener una muestra compuesta del vaciado del sedimentador.

Lavado con mangueras

Para el lavado con mangueras se utilizan dos motobombas las cuales le suministran agua a presión a dos mangueras, este lavado suele durar de 4 a 5 horas con las dos motobombas funcionando casi al mismo tiempo.

Para etapa del lavado se tomaron muestras puntuales cada 10 minutos hasta completar dos horas de lavado y de cada una se sacaron 1000 ml y se mezclaron en un tanque, para obtener una muestra compuesta del lavado con manguera.

Obtenidas las dos muestras compuestas se procedió sacar 20 l de cada una y mezclarlas para obtener la una muestra compuesta de todo el proceso de lavado del sedimentador # 4, muestra a la cual se le determino, turbiedad, pH, sólidos totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.

Anexo 5

Calculo de caudales y volúmenes generados en la purga del sedimentador

Para calcular el caudal de purga se realizo el siguiente balance de masa suponiendo que el volumen que se desocupa del floculador y del sedimentador (eliminando el volumen ocupado por las paredes y canales) es un tanque rectangular de area:

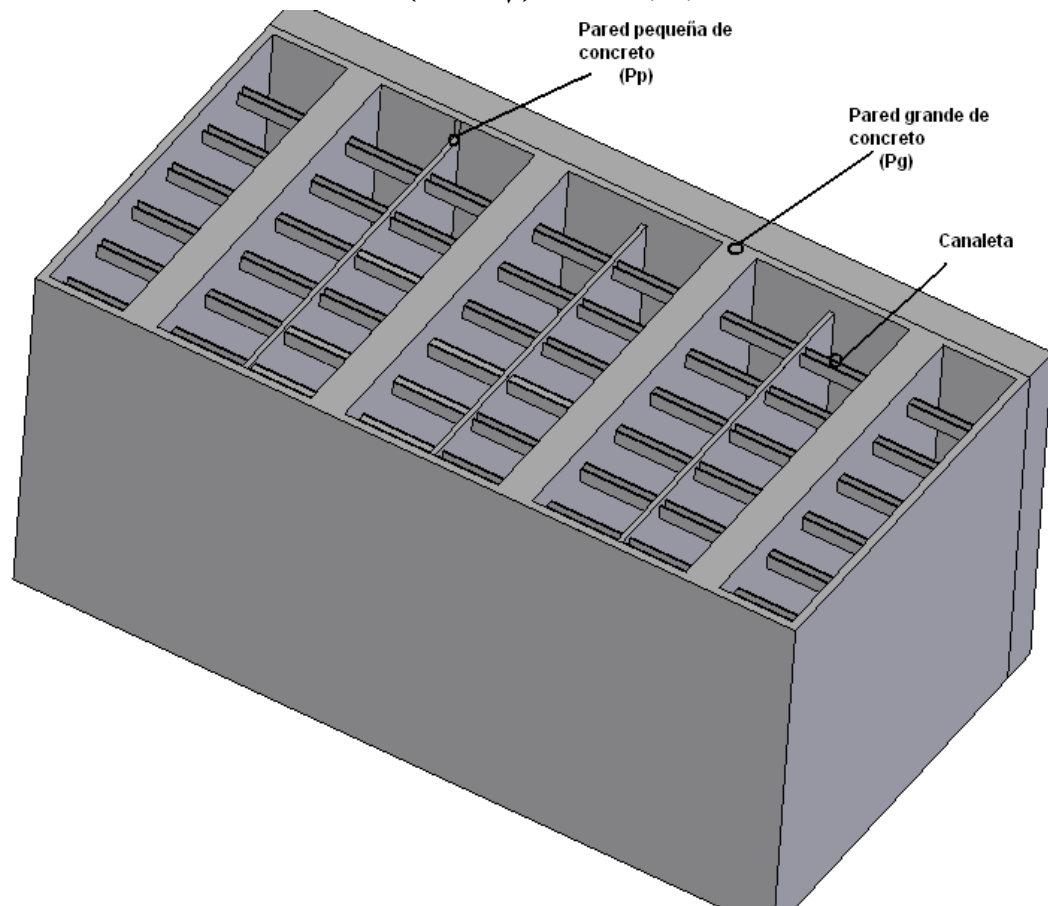
$$A_{sed} = \text{Área del sedimentador} = 24.1 * 12.15 = 292.8 \text{ m}^2$$

$$V_p = (\text{Área sed} * h_v) - \{ (\text{Area de}(P_p + P_g)) * h_v + (\text{Vol. canaletas}) \}$$

$$V_p = A_{sed} h_v - \{ (1.08 * 12.15) * 4 * h_v + (0.14 * 12.15) * 3 * h_v + (0.33 * 0.21 * 2.4) * 48 \}$$

$$V_p = (292.8 - 52.49 - 5.103) h_v - 7.98$$

$$V = (235 * h_v) - 7.98 \text{ (m}^3\text{)}$$



Balance de masa:

$$\rho Q_{\text{purga}} = \rho Q_{\text{entra}} + \rho(d(Ah)/dt) = \rho Q_{\text{entra}} + \rho A (d(h)/dt)$$

El caudal de entrada a la unidad de sedimentación #4, se estima que es la cuarta parte del caudal de agua cruda que históricamente es $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$, así el caudal de entrada a la unidad de sedimentación es $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

La velocidad de descenso (dh/dt) se determino, al dividir la altura de vaciado entre el tiempo en que se vaciaba la unidad. Para esto se realizaron tres pruebas en las que se midió el tiempo de vaciado:

Prueba # 1	Medida de la Regleta (m)	Tiempo (s)	Velocidad de Descenso (m/s)
	0,12	74	0,0016
	0,24	165	0,0015
	0,42	301	0,0014
	0,60	449	0,0013
	0,62	470	0,0013
		Velocidad Promedio:	0,0014

Prueba #2	Medida de la Regleta (m)	Tiempo (s)	Velocidad de Descenso (m/s)
	0,07	63	0,0011
	0,57	429	0,0013
		Velocidad Promedio:	0,0012

Prueba #3	Medida de la Regleta (m)	Tiempo (s)	Velocidad de Descenso (m/s)
	0,12	74	0,0016
	0,62	451	0,0014
		Velocidad Promedio:	0,0015

Velocidades promedio (m/s)	Área total (m ²)	Caudales promedio (m ³ /s)
0,0014	366,5	0,51
0,0012	366,5	0,44
0,0015	366,5	0,55
Caudal promedio (m ³ /s)		0,50

Por lo que el caudal de vaciado arroja un valor de 0.50 m³/s, sumándole el caudal de entrada de 0.2 m³/s, resultaría el caudal de purga 0.7 m³/s.

Anexo 6

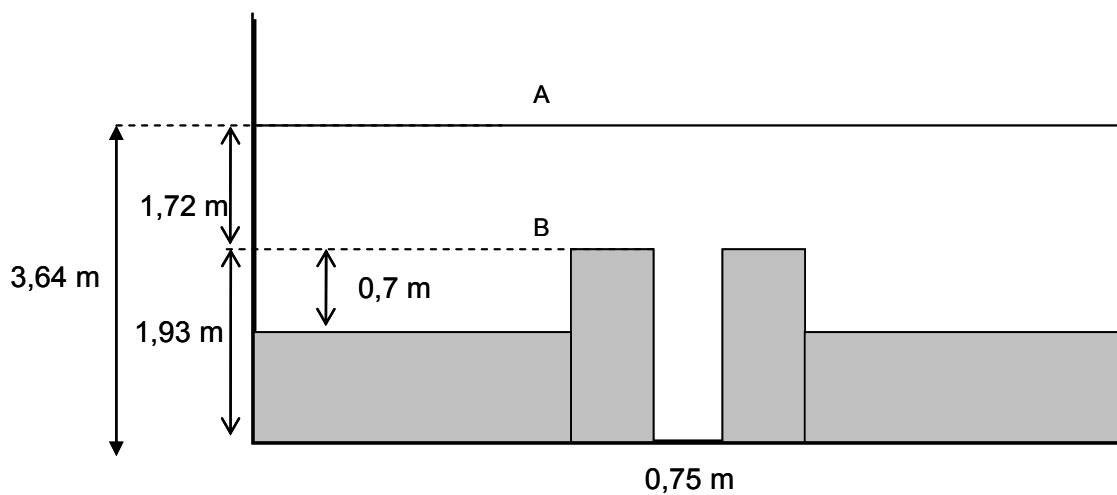
Calculo de caudales y volúmenes generados en el lavado de filtros

Vaciado de filtro

El caudal del vaciado del filtro se calculo con una regleta graduada y se tomó el tiempo promedio de vaciado, esto se hizo para 4 filtros diferentes.

Prueba	Medida de la Regleta (m)	Tiempo (s)	Velocidad de Descenso (m/s)
1	1,14	84	0,0136
2	1,14	81	0,0141
3	1,14	86	0,0133
4	1,14	83	0,0137
Velocidad Promedio			0,0137
Caudal Promedio (m ³ /s)			0,8019
El área del Filtro es 58,71 m ²			

El área del filtro es de 58.71 m², la altura 1.72 m y el volumen total es de 100.98 m³. El tiempo total de vaciado es de 126 segundos que se halló con dividiendo el volumen entre el caudal.



Agua sobre el lecho

El volumen de agua que queda sobre el lecho se calculo con las dimensiones del sedimentador, el volumen $0.7\text{m} \times 58.71\text{m}^2$ y el volumen de agua del entre canal $1.2\text{ m} \times 0.75\text{m} \times 6.71\text{ m}$, que sumados dan un volumen de 47.136 m^3 .

Para hallar el tiempo se dividió el volumen en el caudal de vaciado hallado anteriormente, dando 58.78 s.

Retrolavado

Para hallar el caudal de retrolavado se utilizo la formula para vertederos rectangulares aplicando la aproximación de la formula empírica de Francis¹³.

Formula:

$$Q = \frac{2}{3} C_d * b * (2g)^{1/2} H^{3/2}$$

Q = Caudal de escurrimiento, m^3/s

C_d = Coeficiente de descarga, adimensional

b = Ancho del vertedero, m

g = aceleración de la gravedad, m/s^2

H = Altura de la lamina de agua, m

El coeficiente para este tipo de vertederos se aproxima a 0.622 y la gravedad a $9.81\text{ m}/\text{s}^2$

$b = 0.4\text{ m}$

$H = 0.1\text{ m}$

Reemplazando, $Q = 0.0232\text{ m}^3/\text{s}$

Y multiplicamos por los 8 vertederos para hallar el caudal total equivalente a $0.1856\text{ m}^3/\text{s}$

Y el volumen de agua se calcula multiplicando el caudal hallado por el tiempo de retrolavado que es de 6 minutos, dando 68.4 m^3 .

¹³ ROLIM MENDOZA, Sergio. Sistema de lagunas de estabilización. McGraw Hill. Colombia. 2000. Pag 184

Anexo 7

Calculo de caudales y volúmenes del lavado del sedimentador

Vaciado del sedimentador-floculador

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones y el volumen de las dos unidades.

Unidad	Área (m)	Altura (m ²)	Volumen (m ³)
Sedimentador	144	3.9	561.6
Floculador	222,5	3.9	867.7

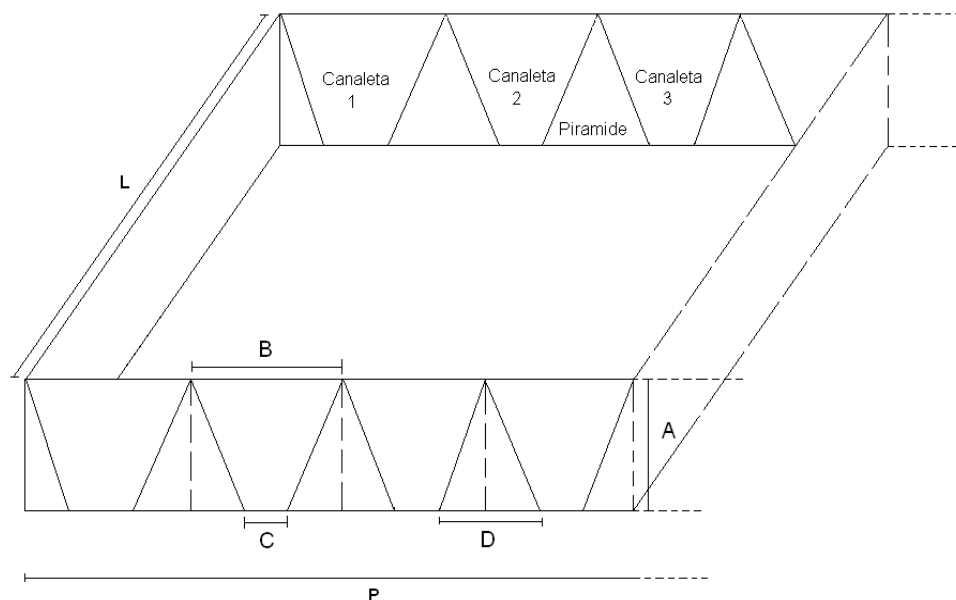
El tiempo en que se vació el sedimentador-floculador fue de una hora; para hallar el caudal promedio del lavado se dividió la suma de los volúmenes sedimentador-floculador (1429 m³) en el tiempo de vaciado, que da un caudal aproximado de 0,4 m³/s.

El caudal de entrada que se muestra en la tabla 1 se refiere al agua de arrastre que le sigue entrando al floculador, cuando se esta vaciando, se aproximo a un cuarto del caudal que le entra normalmente equivalente a 0,05 m³/s.

Lodos en las canaletas y pasillos

El sedimentador cuatro cuenta con 8 canaletas que recolecta el lodo de la sedimentación, de la canaleta pasan a las pirámides por una tubería y allí se almacenan hasta salir por arrastre con la purga o con el lavado de manguera.

El la siguiente figura se muestran 4 de las 8 canaletas que tiene el sedimentador.



Especificación	Lado	Medida (m)
Alto	A	1,50
Base Grande	B	2,50
Base Pequeña	C	0,65
Largo de la Canaleta	L	11,90
Base del Triangulo	D	1,85
Largo del pasillo dos	P	20,00

El lodo aparte de almacenarse en las canaletas y pirámides lo hacen en los pasillos y alcanzan una altura aproximada de 1 m.

Hay tres pasillos el primero con dimensiones de 12 x1.1 m, el segundo de 20x1.1 m y el tercero (pasillo de purga) de 15x1.1 m.

En la siguiente tabla se calcula la cantidad de lodo total que queda en el sedimentador después de ser vaciado.

TOTAL DE LODO EN EL SEDIMENTADOR	
Volúmenes	m ³
Pasillo 1	13
Pasillo 2	22
Pasillo de Purga	17
8 pirámides	132
8 Canaletas	224
Total lodo espeso	408

Para hallar el caudal de lodo se tuvo en cuenta que el lodo sale con el agua de manguera, lo que indica que el tiempo en que sale es igual al del lavado con manguera (15400 s) y equivale a 0,2649 m³.

Lavado con manguera

El lavado del lodo de las canaletas se llevo a cabo con dos motobombas, para hallar el caudal de estas se utilizo un tanque de 200 litros y se tomo el tiempo de llenado, las motobombas se distinguieron por su color y los datos se muestran en la siguiente tabla.



Motobomba verde



Motobomba roja

Volumen del tanque =200 litros	
Tiempos de llenado	
Motobomba verde (s)	Motobomba roja (s)
13,38	19,85
14,13	20,38
13,22	19,21
	18,96
	19,25
$T_{\text{promedio}}=13,58 \text{ s}$	$T_{\text{promedio}}=19,53 \text{ s}$
$Q_{\text{promedio}}=14,73 \text{ l/s}$	$Q_{\text{promedio}}= 10,24 \text{ l/s}$
T:tiempo Q:caudal	

El caudal total de agua equivale a 24,95 l ($0,025 \text{ m}^3$) y fue hallado sumando los caudales de cada motobomba.

Motobomba Verde			Motobomba Roja		
Estado	Hora	Tiempo Abierta (s)	Estado	Hora	Tiempo Abierta (s)
A	7:40	2220	A	7:10	4200
C	8:17		C	8:17	
A	8:22	6780	A	8:35	5880
C	10:15		C	10:13	
A	10:37	2580	A	10:47	1980
C	11:20		C	11:20	
A	11:25	3900	A	11:35	3300
C	12:30		C	12:30	
Tiempo		15480	Tiempo		15360
A:abierta C: cerrada					

En la anterior tabla se calculo los tiempos que duraron las motobombas abiertas, el tiempo calculado se multiplico por el caudal de cada motobomba, estimado anteriormente, para la motobomba verde el volumen fue de 228020 l y para la motobomba roja de 157286 l, por lo que el volumen total es igual a 385306 l (385 m^3).

El tiempo total se estimo con el volumen total y el caudal total y equivale a 15400 s

Anexo 8

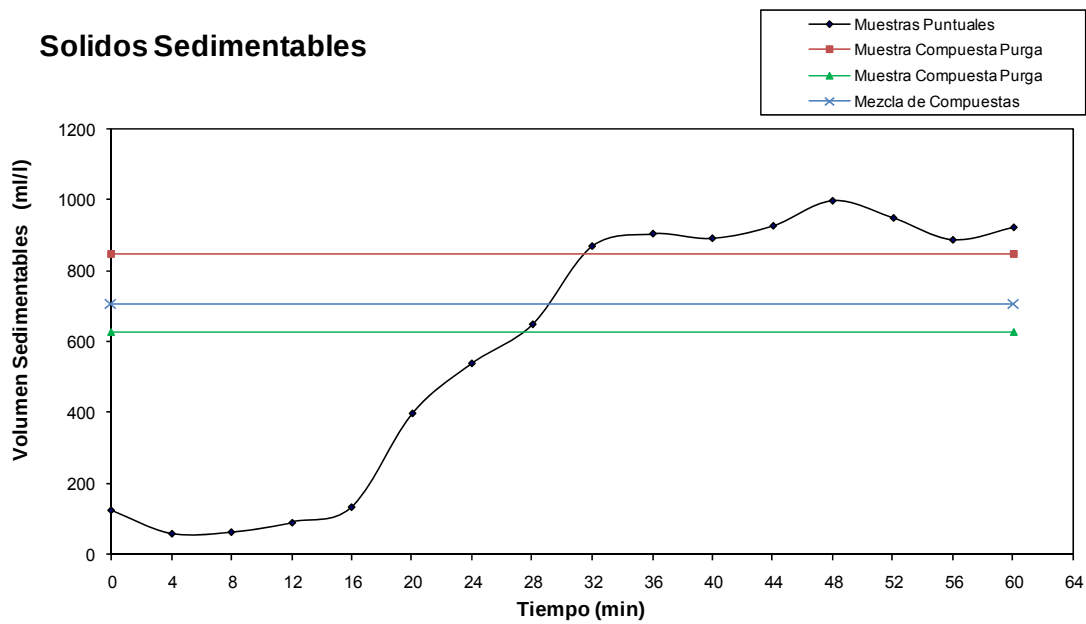
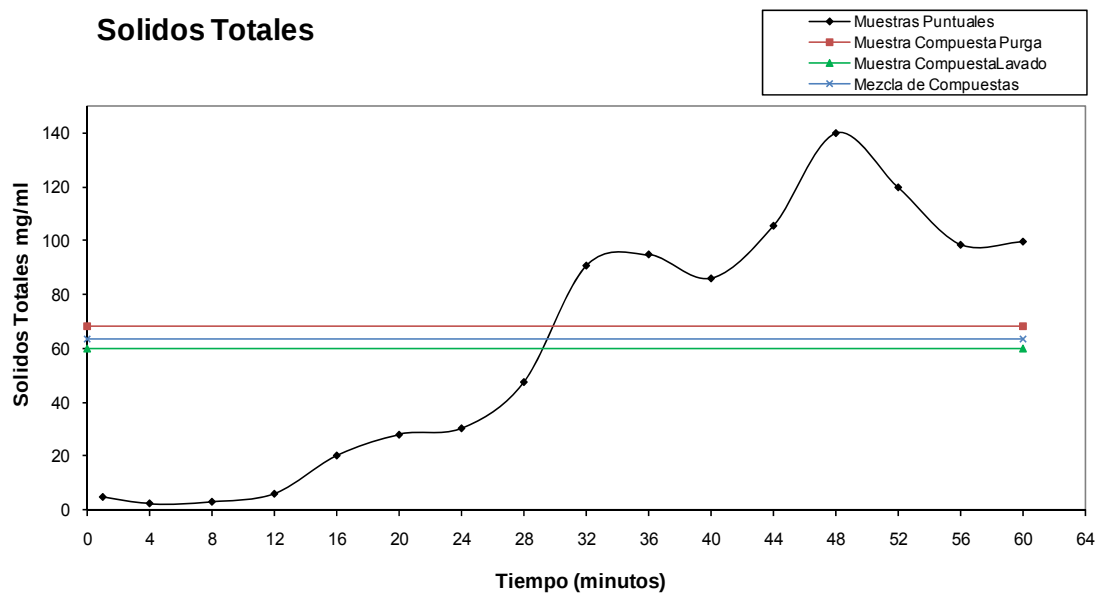
Tablas y graficas del lavado del sedimetador

Tablas de solidos totales y solidos sedimentables para las muestras puntuales del vaciado del sedimentador, cuando se va a lavar.

Tiempo (minutos)	Sólidos Totales (mg/ml)
0	4,7500
4	2,4060
8	3,0740
12	6,2120
16	20,2720
20	28,3580
24	30,6780
28	47,9060
32	90,8840
36	94,7920
40	86,2880
44	105,8940
48	140,0000
52	119,6460
56	98,8580
60	99,9870
Compuesta Vaciado	68,4020
Compuesta Lavado con manguera	60,1240
Mezcla de Compuestas	63,3500

Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml/l)
0	126
4	60
8	64
12	92
16	135
20	400
24	540
28	650
32	869
36	905
40	893
44	928
48	1000
52	950
56	890
60	921
Compuesta Vaciado	850
Compuesta Lavado con manguera	626
Mezcla de Compuestas	708

Figuras de sólidos totales y sólidos sedimentables



Anexo 9

Montaje para la determinación de la resistencia específica y el tiempo de filtración

La resistencia específica se halla utilizando la siguiente ecuación que describe una línea recta si graficamos como ordenadas (t/V) y como abscisas el volumen filtrado. La pendiente de dicha curva será el cociente que multiplica a V y si se conoce la presión ejercida, el área de filtración y la concentración de sólidos en el lodo y en la torta, se puede encontrar el valor de la resistencia específica de la torta R , este procedimiento se encuentra en el Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 ed 1998.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\omega R}{2\Delta P A^2} V + \frac{\mu R_f}{\Delta P A}$$

$$m = \frac{\mu\omega R}{2\Delta P A^2}$$

Donde V = Volumen de filtrado (m^3)

t = tiempo (s)

ΔP = diferencial de presión (vacío, N/m^2)

A = área del filtro (m^2)

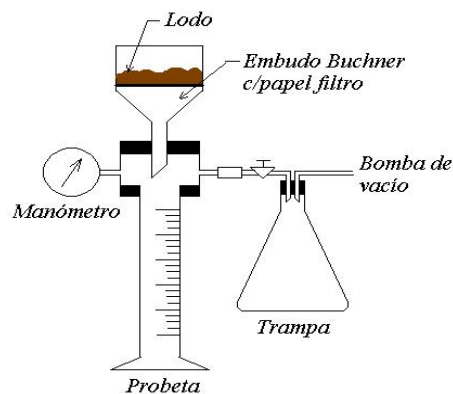
μ = viscosidad dinámica del filtrado (Ns/m^2)

ω = Peso del sólido seco en el lodo por unidad de volumen de filtrado (Kg/m^3)

R = Resistencia específica de la torta (m/Kg)

R_f = Resistencia específica del filtro ($1/m$)

Para ello se realizan pruebas de laboratorio utilizando un embudo Buchner como

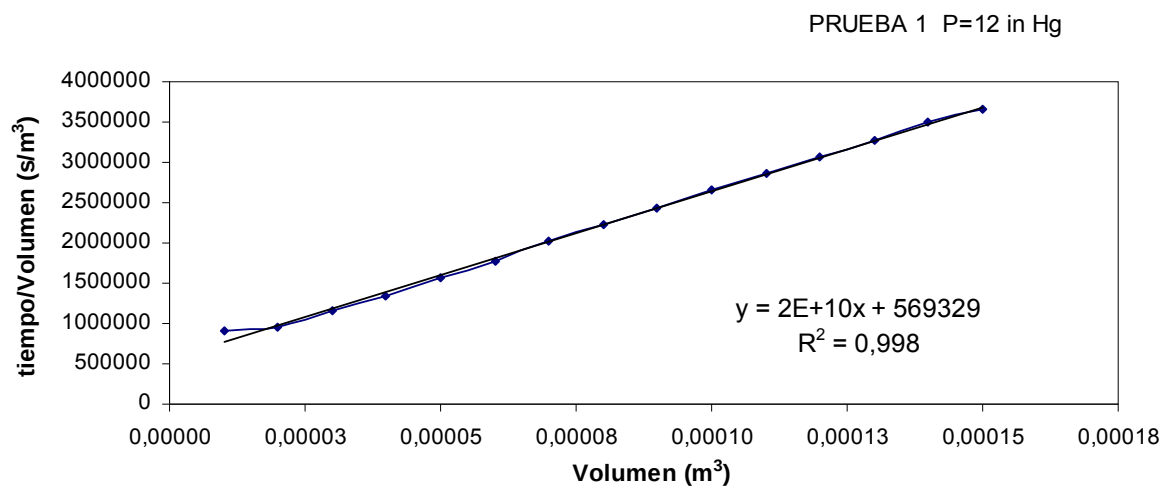


que se muestra en la figura.

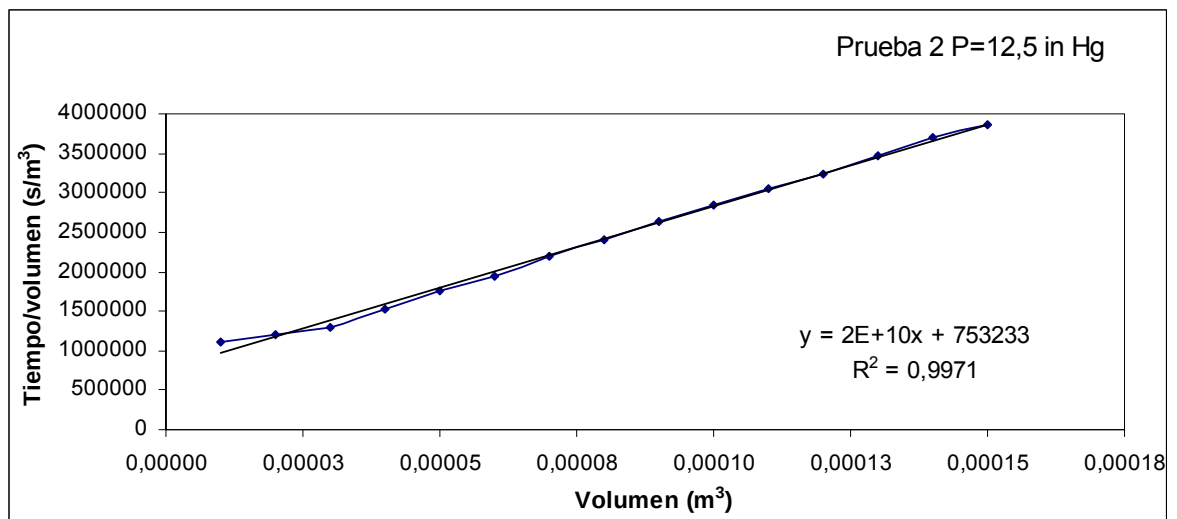


Anexo 10
Calculo de la resistencia específica sin polímero

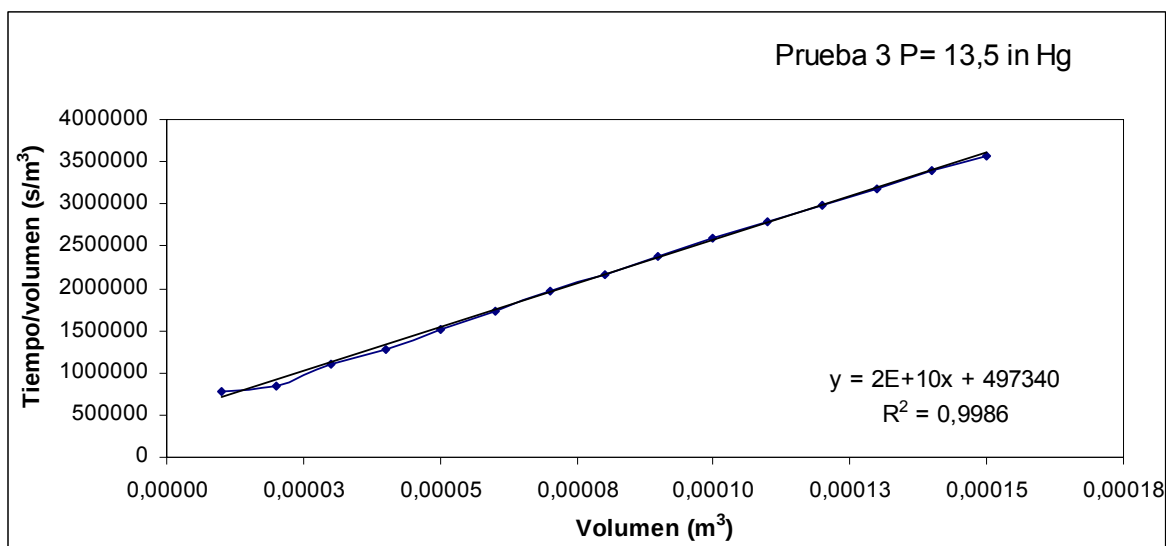
Tiempo (s)	Volumen (ml)	t/v
9	0,00001	900000
19	0,00002	950000
35	0,00003	1166667
54	0,00004	1350000
78	0,00005	1560000
107	0,00006	1783333
142	0,00007	2028571
179	0,00008	2237500
218	0,00009	2422222
265	0,00010	2650000
315	0,00011	2863636
369	0,00012	3075000
425	0,00013	3269231
489	0,00014	3492857
549	0,00015	3660000



Tiempo (s)	Volumen (m ³)	t/v
11	0,00001	1100000
24	0,00002	1200000
39	0,00003	1300000
61	0,00004	1525000
88	0,00005	1760000
117	0,00006	1950000
153	0,00007	2185714
192	0,00008	2400000
237	0,00009	2633333
284	0,00010	2840000
336	0,00011	3054545
389	0,00012	3241667
451	0,00013	3469231
517	0,00014	3692857
580	0,00015	3866667



Tiempo (s)	Volumen (m ³)	t/v
7,79	0,00001	779000
17	0,00002	850000
33	0,00003	1100000
51	0,00004	1275000
76	0,00005	1520000
104	0,00006	1733333
138	0,00007	1971429
173	0,00008	2162500
215	0,00009	2388889
259	0,00010	2590000
307	0,00011	2790909
359	0,00012	2991667
413	0,00013	3176923
475	0,00014	3392857
534	0,00015	3560000



Las variables para esta prueba fueron:

$$\Delta P = 41337,5 \text{ (vacío, N/m}^2\text{)}$$

$$A = 0,02545 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\mu = 2,61 \times 10^{-3} \text{ (Ns/m}^2\text{)}$$

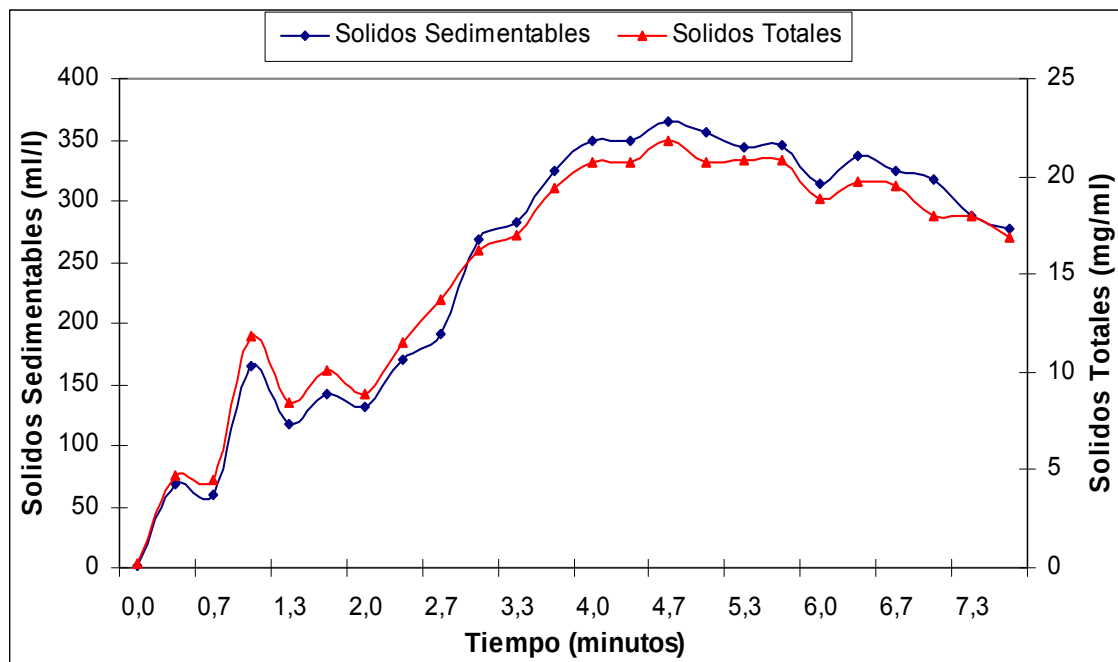
$$\omega = 62,7733 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$m = 2 \times 10^{10}$$

La viscosidad del lodo se halló en el laboratorio de reología de la escuela de ingeniería química con el viscosímetro BROOKFIELD PROGRAMABLE DV-III+RHEOMETER, se pasaron tres muestras y se promediaron, finalmente reemplazando en la ecuación para el cálculo de la resistencia planteada en el anexo anterior la resistencia es igual a $6.6949 \times 10^{12} \text{ m/Kg}$.

Anexo 11
Tablas y figuras de la caracterización de las purgas del sedimentador

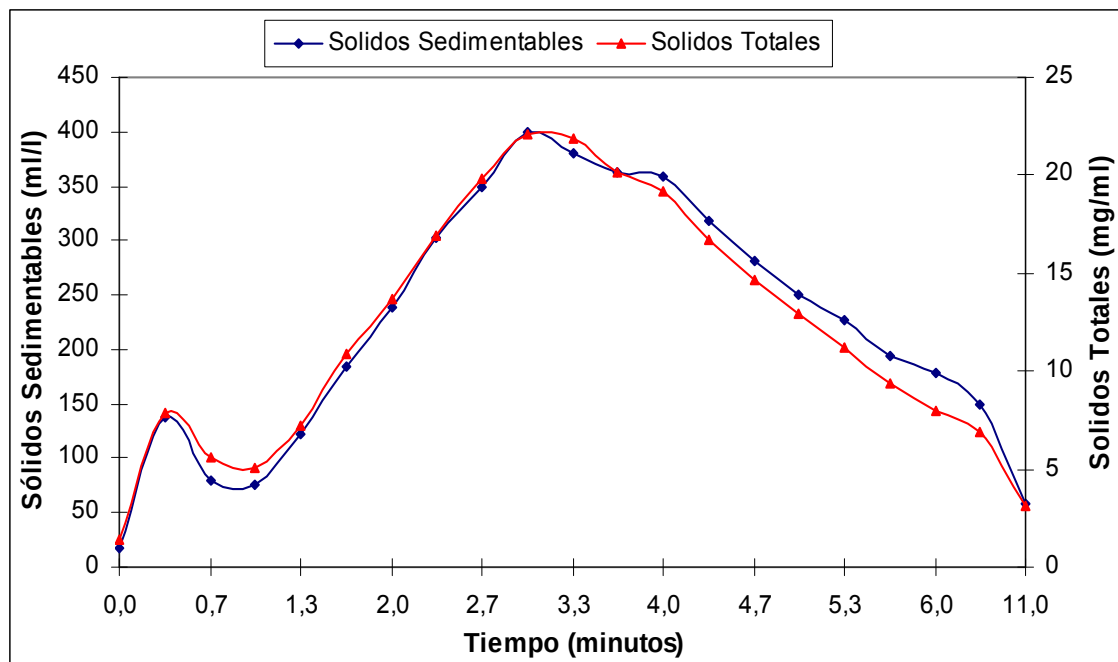
Purga abril 13



Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	1	0,25
0,33	68	4,754
0,67	59	4,516
1,00	165	11,872
1,33	117	8,44
1,67	142	10,072
2,00	131	8,864
2,33	170	11,548
2,67	191	13,746
3,00	268	16,2148
3,33	282	16,9736
3,67	325	19,3842

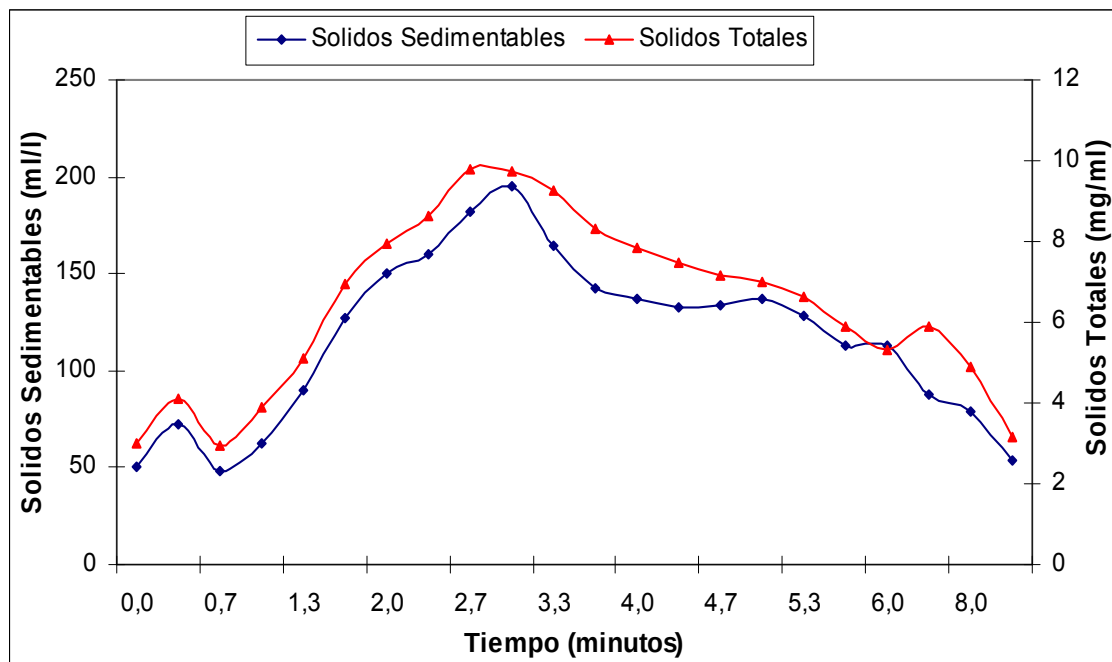
4,00	350	20,7592
4,33	350	20,6892
4,67	365	21,8722
5,00	356	20,6844
5,33	343	20,7798
5,67	346	20,8424
6,00	314	18,9084
6,33	336	19,7004
6,67	325	19,5042
7,00	318	18,0248
7,33	288	17,9988
7,67	278	16,8568
Compuesta	260	16,6504

Purga mayo 3



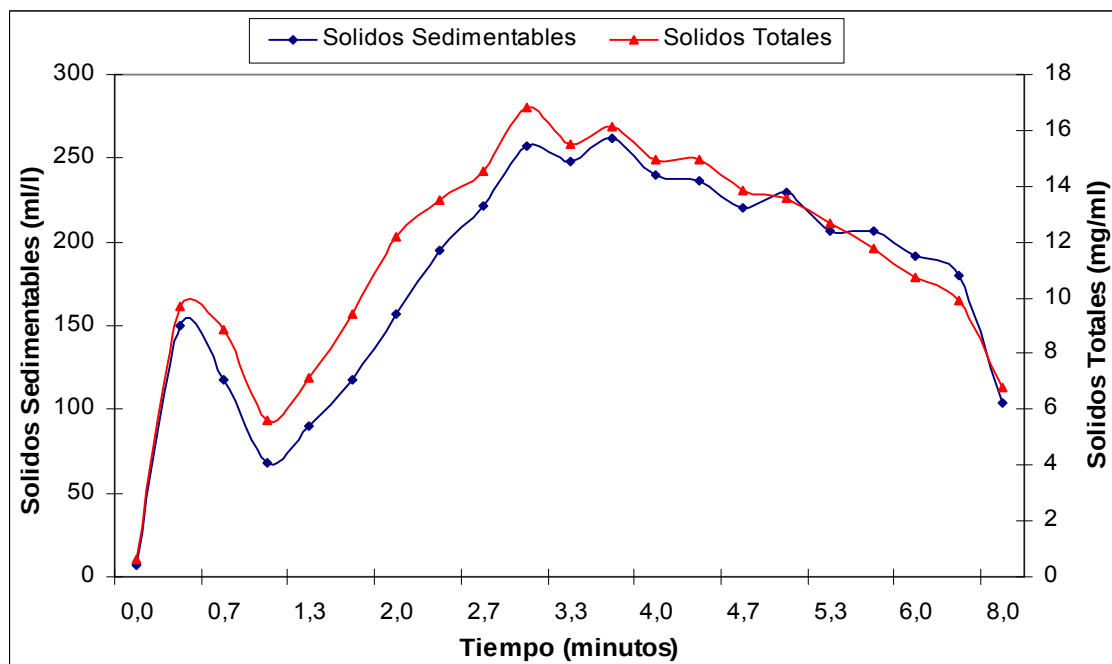
Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	18	1,3860
0,33	137	7,9040
0,67	80	5,6380
1,00	76	5,0220
1,33	123	7,2180
1,67	184	10,8320
2,00	239	13,7360
2,33	303	16,9000
2,67	350	19,8420
3,00	400	22,0860
3,33	381	21,8540
3,67	362	20,1800
4,00	358	19,1300
4,33	318	16,7040
4,67	282	14,7060
5,00	250	12,9320
5,33	227	11,2480
5,67	193	9,4040
6,00	179	7,9560
6,33	150	6,8660
11,00	59	3,1700
Compuesta	249	12,8

Purga mayo 17



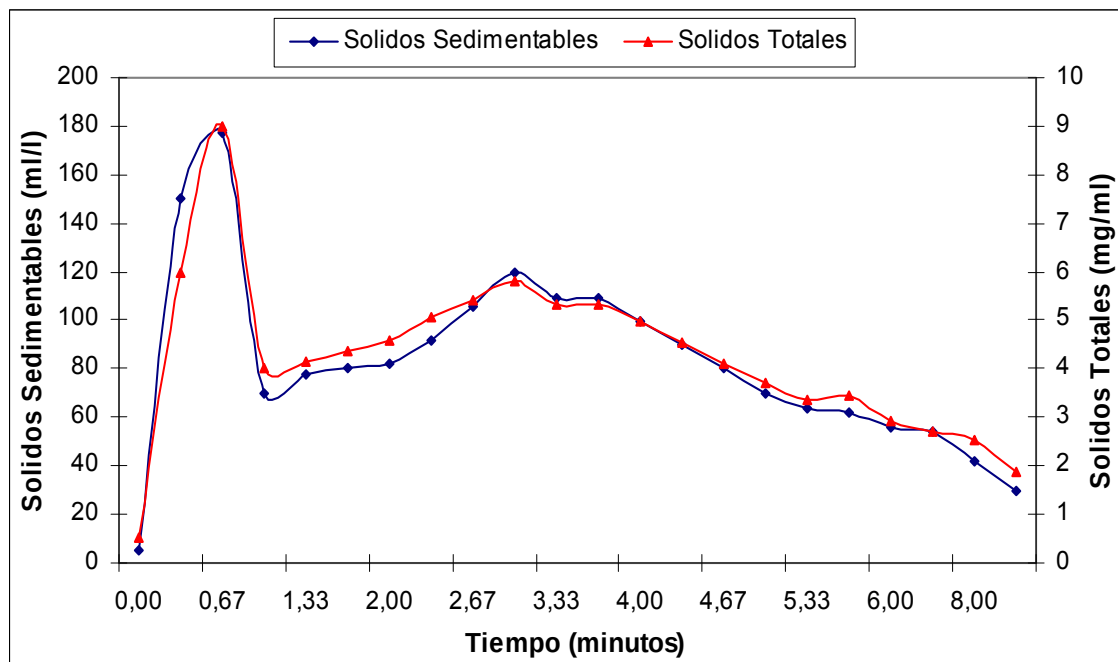
Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	50	3,0160
0,33	72	4,1160
0,67	48	2,9640
1,00	62	3,8760
1,33	90	5,1300
1,67	127	6,9360
2,00	150	7,9340
2,33	160	8,6180
2,67	182	9,7660
3,00	195	9,7340
3,33	164	9,2620
3,67	142	8,3340
4,00	137	7,8560
4,33	133	7,4960
4,67	134	7,1820
5,00	137	7,0120
5,33	128	6,6420
5,67	113	5,9160
6,00	113	5,3280
6,33	88	5,8740
8,00	79	4,9140
11,00	54	3,1840
Compuesta	125	6,5200

Purga mayo 31



Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	7	0,652
0,33	150	9,676
0,67	118	8,888
1,00	68	5,602
1,33	90	7,128
1,67	118	9,39
2,00	157	12,202
2,33	195	13,524
2,67	222	14,568
3,00	257	16,808
3,33	248	15,486
3,67	262	16,12
4,00	240	14,938
4,33	236	14,972
4,67	220	13,858
5,00	230	13,598
5,33	206	12,656
5,67	206	11,748
6,00	191	10,73
6,33	180	9,91
8,00	104	6,776
Compuesta	189	11,5767

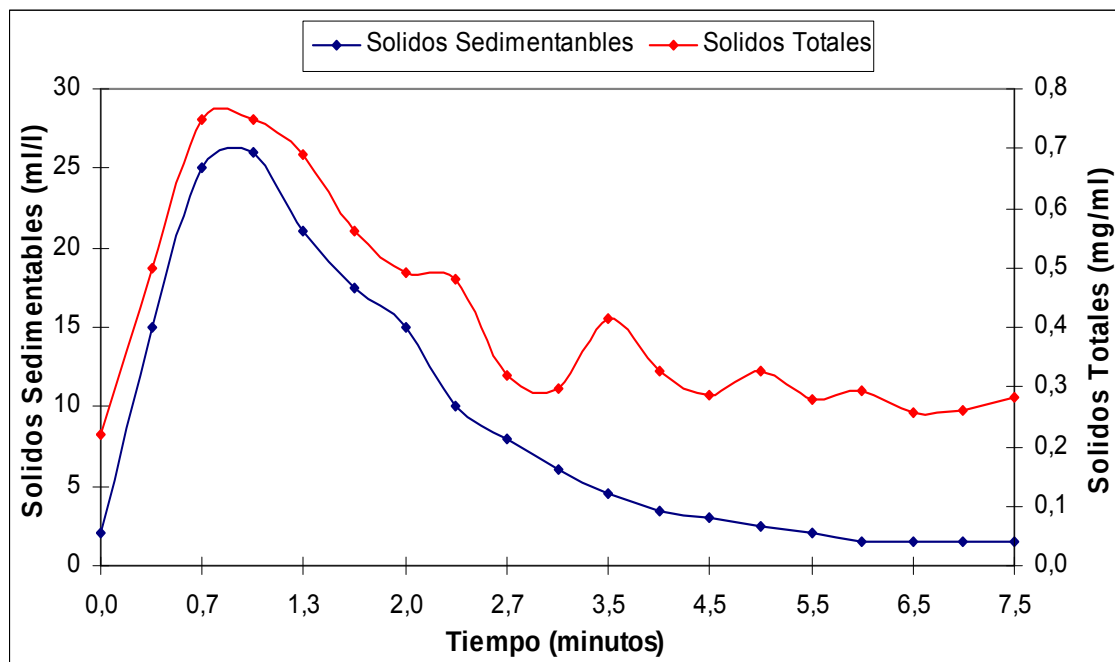
Purga junio 21



Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	5	0,538
0,33	150	5,972
0,67	177	8,992
1,00	70	4,01
1,33	78	4,138
1,67	80	4,376
2,00	82	4,604
2,33	92	5,072
2,67	106	5,43
3,00	120	5,798
3,33	109	5,328
3,67	109	5,348
4,00	100	4,974
4,33	90	4,544
4,67	80	4,098
5,00	70	3,708
5,33	64	3,352
5,67	62	3,43
6,00	56	2,904
6,33	54	2,7038
8,00	42	2,518
11,00	30	1,856
Compuesta	93	4,54

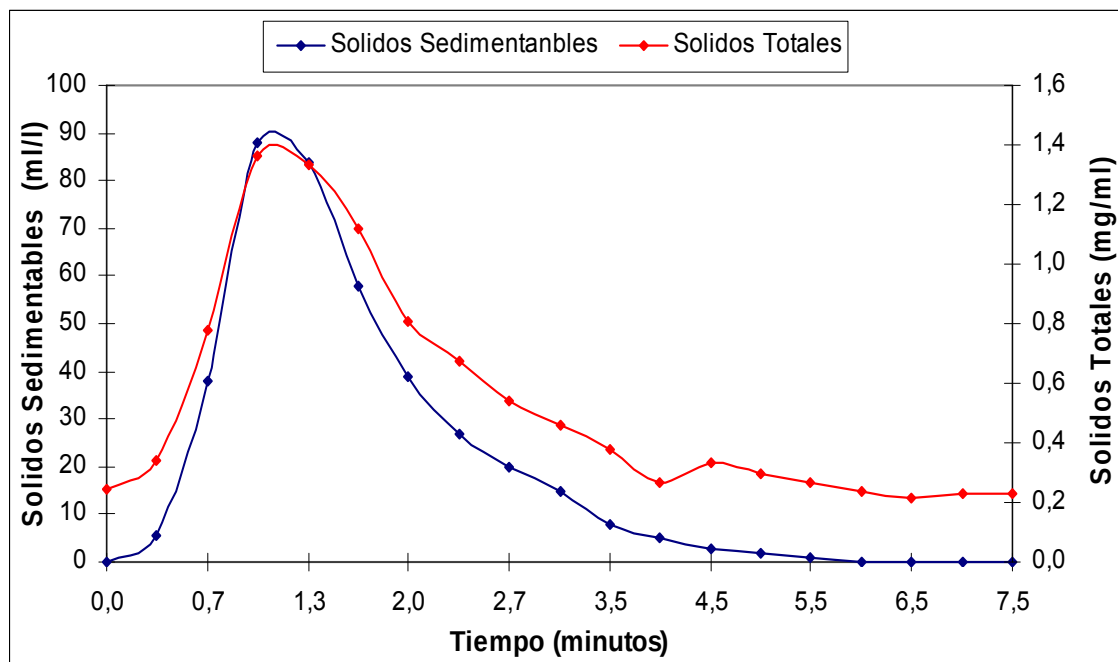
Anexo 12
Tablas y figuras de la caracterización del lavado de filtros

Lavado de filtros abril 27 (filtro 8)



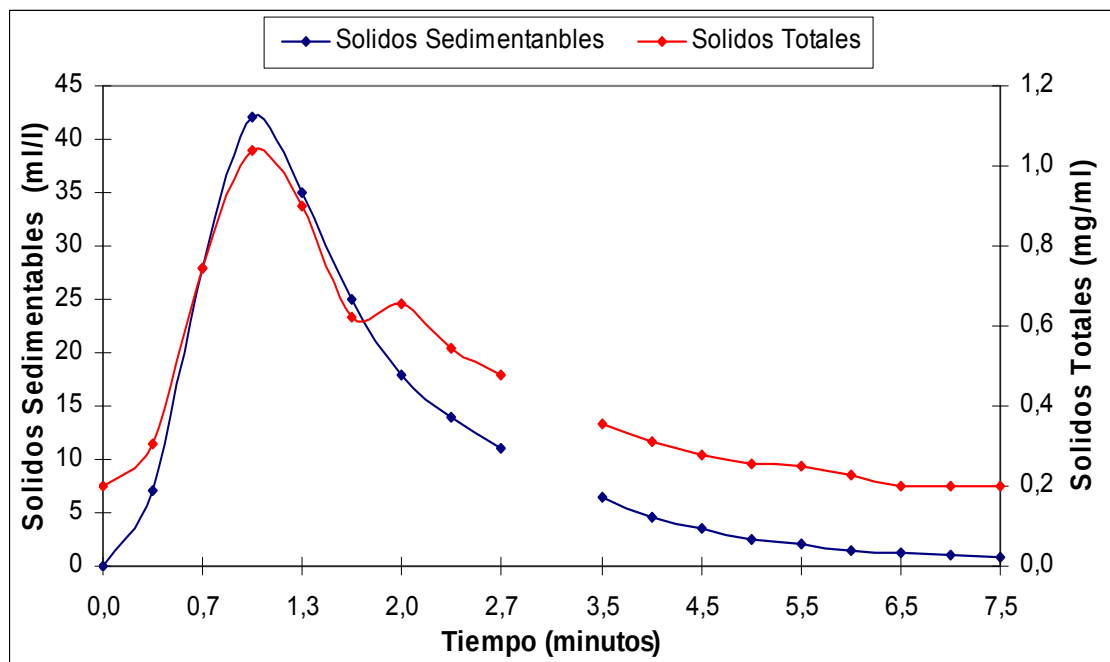
Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	2	0,2220
0,33	15	0,5000
0,67	25	0,7500
1,00	26	0,7500
1,33	21	0,6900
1,67	17,5	0,5620
2,00	15	0,4920
2,33	10	0,4820
2,67	8	0,3200
3,00	6	0,2980
3,50	4,5	0,4160
4,00	3,5	0,3280
4,50	3	0,2860
5,00	2,5	0,3260
5,50	2	0,2800
6,00	1,5	0,2940
6,50	1,5	0,2560
7,00	1,5	0,2620
7,50	1,5	0,2840
Compuesta Vaciado	0,01	0,0860
Compuesta Retrolavado	8	0,4140

Lavado de filtros mayo 10 (filtro 3)



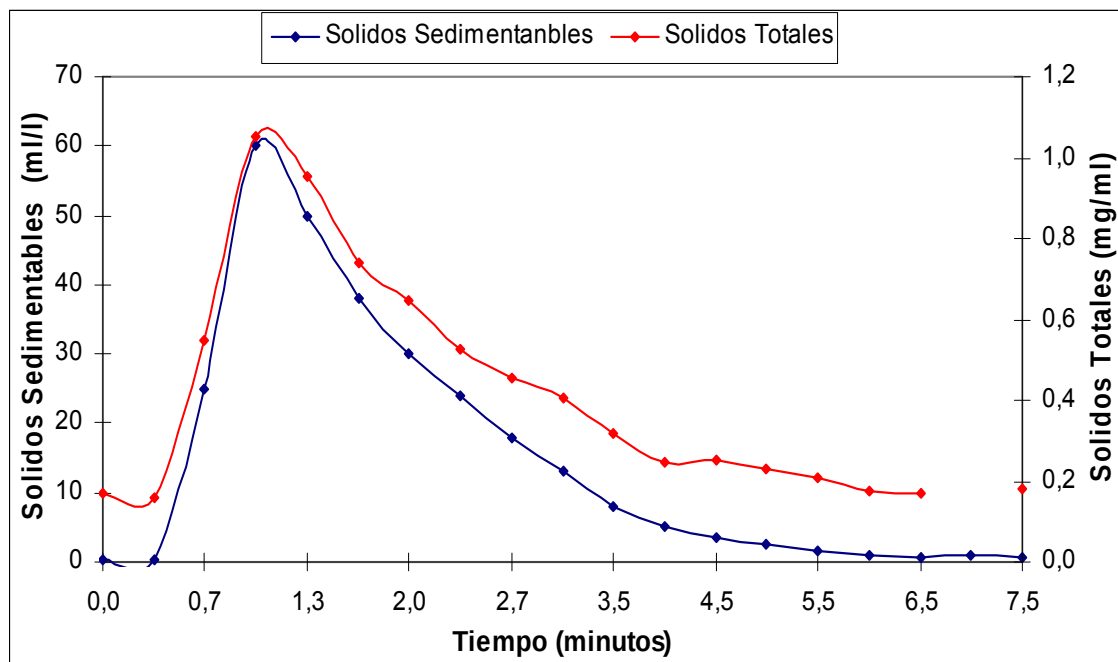
Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	0,02	0,2440
0,33	5,50	0,3400
0,67	38,00	0,7760
1,00	88,00	1,3600
1,33	84,00	1,3300
1,67	58,00	1,1160
2,00	39,00	0,8100
2,33	27,00	0,6760
2,67	20,00	0,5400
3,00	15,00	0,4600
3,50	8,00	0,3800
4,00	5,00	0,2680
4,50	3,00	0,3360
5,00	2,00	0,2980
5,50	1,00	0,2660
6,00	0,20	0,2340
6,50	0,20	0,2160
7,00	0,20	0,2280
7,50	0,20	0,2280
Compuesta Vaciado	0,02	0,0244
Compuesta Retrolavado	20,00	0,4553

Lavado de filtros mayo 28 (filtro 8)



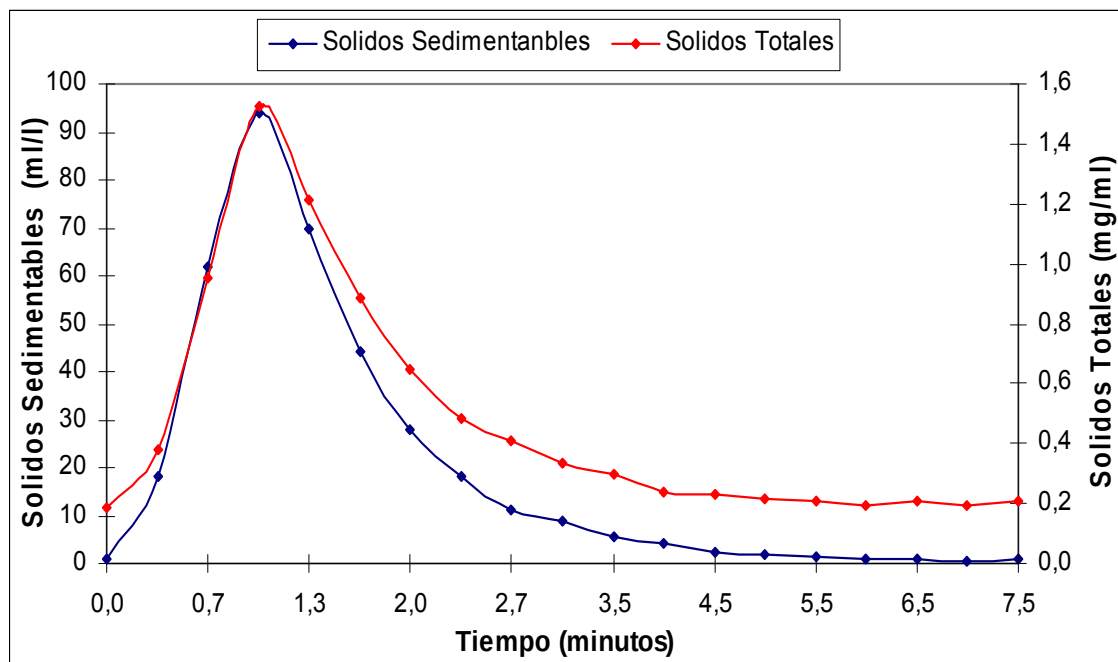
Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	0.3	0,2000
0,33	7	0,3060
0,67	28	0,7420
1,00	42	1,0380
1,33	35	0,9000
1,67	25	0,6240
2,00	18	0,6580
2,33	14	0,5440
2,67	11	0,4780
3,00		
3,50	6,5	0,3560
4,00	4,5	0,3120
4,50	3,5	0,2780
5,00	2,5	0,2560
5,50	2	0,2480
6,00	1,5	0,2300
6,50	1,3	0,2020
7,00	1	0,2020
7,50	0,8	0,2018
Compuesta Vaciado	0,04	0,0298
Compuesta Retrolavado	10	0,4636

Lavado de filtros junio 6 (filtro 8)



Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	0,3	0,1700
0,33	0,3	0,1580
0,67	25	0,5500
1,00	60	1,0540
1,33	50	0,9560
1,67	38	0,7420
2,00	30	0,6440
2,33	24	0,5260
2,67	18	0,4560
3,00	13	0,4060
3,50	8	0,3160
4,00	5	0,2480
4,50	3,5	0,2540
5,00	2,5	0,2320
5,50	1,5	0,2080
6,00	1	0,1760
6,50	0,7	0,1720
7,00	1	
7,50	0,5	0,1800
Compuesta Vaciado	0,03	0,0234
Compuesta Retrolavado	15	0,4347

Lavado de filtros junio 15 (filtro 3)



Tiempo (minutos)	Sólidos Sedimentables (ml)	Sólidos Totales (mg/ml)
0,00	0,8	0,184
0,33	18	0,38
0,67	62	0,95
1,00	94	1,522
1,33	70	1,21
1,67	44	0,888
2,00	28	0,644
2,33	18	0,482
2,67	11	0,412
3,00	9	0,332
3,50	5,5	0,298
4,00	4	0,238
4,50	2,5	0,232
5,00	2	0,218
5,50	1,5	0,206
6,00	1	0,196
6,50	0,7	0,206
7,00	0,4	0,19
7,50	0,9	0,208
Compuesta Vaciado	0,02	0,0256
Compuesta Retrolavado	18	0,4793