

DISEÑO DE UN ESPESADOR POR GRAVEDAD Y ERAS DE SECADO PARA LOS
LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE
"ACUEDUCTOS LA ENEA Ltda."

Autor:

Carlos Andrés Holguín Isaza

Código: 394024

Línea de profundización: Ingeniería Ambiental

Modalidad: Pasantía

Director Ad hoc:

Jhon Jaime Valencia

Director U.N:

Gonzalo Morante G.

Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Ingeniería Química
Manizales Diciembre de 2003

DISEÑO DE UN ESPESADOR POR GRAVEDAD Y ERAS DE SECADO PARA LOS
LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE
"ACUEDUCTOS LA ENEA Ltda."

Carlos Andrés Holguín Isaza

Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Ingeniería Química
Manizales Diciembre de 2003

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<u>1. RESUMEN</u>	<u>1</u>
<u>2. ABSTRACT.....</u>	<u>2</u>
<u>3. INTRODUCCIÓN</u>	<u>3</u>
<u>4. OBJETIVOS.....</u>	<u>4</u>
<u>4.1 GENERAL.....</u>	<u>4</u>
<u>4.2 ESPECÍFICOS.....</u>	<u>4</u>
<u>5. ANTECEDENTES.....</u>	<u>5</u>
<u>5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.....</u>	<u>9</u>
<u>5.3 ESPESADO.....</u>	<u>13</u>
<u>5.3.1 Lodo de la planta Capim Fino de la ciudad de Piracicaba Sao Paulo (Brasil).....</u>	<u>13</u>
<u>5.3.1.1 Espesado por flotación con aire disuelto</u>	<u>13</u>
<u>5.3.1.2 Espesado por gravedad</u>	<u>13</u>
<u>5.4 DESHIDRATACIÓN DE LODOS.....</u>	<u>14</u>
<u>5.4.1 Lechos de Secado y Lagunas de Lodos.....</u>	<u>14</u>
<u>6. MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	<u>15</u>
<u>7. RESULTADOS OBTENIDOS.....</u>	<u>18</u>
<u>7.1 RESULTADOS A NIVEL DE LABORATORIO.....</u>	<u>18</u>

7.2	<u>RESULTADOS A NIVEL PILOTO.....</u>	<u>25</u>
7.3	<u>VOLÚMENES DE AGUA DE LAVADO PRODUCIDA EN EL DECANTADOR.....</u>	<u>27</u>
7.3.1	<u>Por balances de materia.....</u>	<u>27</u>
7.3.2	<u>Medidos con el vertedero.....</u>	<u>27</u>
7.4	<u>ENSAYOS DE ESPESADO A ESCALA REAL.....</u>	<u>28</u>
7.5	<u>PROMEDIOS.....</u>	<u>30</u>
7.5.1	<u>Filtros.....</u>	<u>30</u>
7.5.2	<u>Decantadores.....</u>	<u>30</u>
7.6	<u>DATOS DE SECADO.....</u>	<u>31</u>
8.	<u>DISEÑO DEL ESPESADOR Y LAS ERAS DE SECADO.....</u>	<u>32</u>
8.1	<u>DISEÑO DEL TANQUE ESPESADOR POR GRAVEDAD.....</u>	<u>32</u>
8.1.1	<u>Volumen.....</u>	<u>32</u>
8.2	<u>ERAS DE SECADO DE ARENA Y GRAVA.....</u>	<u>39</u>
8.2.1	<u>Obtención del área.....</u>	<u>39</u>
8.2.2	<u>Dimensionamiento.....</u>	<u>39</u>
8.2.3	<u>Materiales de construcción.....</u>	<u>40</u>
8.3	<u>PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LAS AGUAS DE LAVADO POR MEDIO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD.....</u>	<u>42</u>
9.	<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>43</u>
	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>44</u>
	<u>ANEXOS.....</u>	<u>46</u>

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <u>Características de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable</u>	9
Tabla 2. <u>Concentración de metales presentes en la fase sólida de los lodos de plantas de tratamiento de agua potable</u>	11
Tabla 3. <u>Características de los lodos generados por los decantadores</u>	11
Tabla 4. <u>Sistemas de remoción de agua de los lodos utilizados en Estados Unidos</u>	12
Tabla 5. <u>Prácticas de disposición de lodos en los Estados Unidos en grupos de población</u>	12
Tabla 6. <u>Sólidos sedimentables a tiempo final obtenidos por el método estándar</u>	18
Tabla 7. <u>Porcentaje de lodo promedio a nivel piloto</u>	25
Tabla 8. <u>Caudales y volúmenes promedio medidos con el vertedero para el tren de filtros de la planta 2</u>	25
Tabla 9. <u>Caudales y volúmenes promedio medidos con el vertedero para el decantador 2</u>	26
Tabla 10. <u>Cálculo del volumen de agua de lavado para el decantador 2 por balances de materia</u>	27
Tabla 11. <u>Cálculo del volumen de agua de lavado para el decantador 2 por medio de las medidas de caudal del vertedero</u>	27
Tabla 12. <u>Agua de lavado y sólidos sedimentables a escala real para los decantadores 1 y 2</u>	28

Tabla 13. <u>Porcentajes de sólidos y de humedad de los lodos sometidos a secado a diferentes tiempos.....</u>	31
Tabla 14. <u>Ciclo de entradas y salidas de materia al tanque espesador y a las eras de secado.....</u>	34
Tabla 15. <u>Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales por espesado.....</u>	44

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfico 1. Plano de planta de “Acueductos la Enea Ltda.”	8
Gráfica 2. Sólidos Sedimentables en decantadores 1 y 2	21
Gráfica 3. Sólidos sedimentables en filtros de la planta 2	22
Gráfica 4. Agua de lavado y sólidos sedimentables a escala real para los decantadores 1 y 2	29
Gráfica 5. Porcentaje de sólidos para los lodos secados a diferentes tiempos	31
Gráfica 6. Remanente de lodo en el espesador	36
Gráfica 7. Agua de lavado que entra al tanque espesador	36
Gráfica 8. Clarificado extraído del espesador	37
Gráfica 9. Volumen máximo en el espesador	37
Gráfica 10. Lodo espesado y lodo enviado a secar	38
Gráfica 11. Tanque espesador de lodos	40
Gráfica 12. Eras de secado de arena y grava	43

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

°C:	GRADOS CELSIUS.
DBO:	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO.
DQO:	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.
HUM.:	HUMEDAD
Min.:	MINUTOS.
pH	POTENCIAL DE HIDROGENIONES.
Prom.:	PROMEDIO.
PTAP:	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.
SED:	LODO SEDIMENTADO.
SOL:	SÓLIDOS.
SS:	SÓLIDOS SEDIMENTABLES.
ST:	SÓLIDOS TOTALES.
SV:	SÓLIDOS VOLÁTILES.
uT.:	UNIDADES TURBIDIMÉTRICAS.
Vol.:	VOLUMEN.
h.:	HORAS.
REM.:	REMANENTE DE LODO EN EL TANQUE ESPESADOR.
Ent.:	ENTRADA.

Sal.:	SALIDA
MAX.:	MÁXIMO.
Tot.:	TOTAL.
V1:	VÁLVULA DE ALIMENTACIÓN AL DECANTADOR 1
V2:	VÁLVULA DE ALIMENTACIÓN AL DECANTADOR 2
V3:	VÁLVULA DE DESCOLE A LA QUEBRADA CIMITARRA
V4:	VÁLVULA DE FONDOS DEL DECANTADOR 2.
V6:	VÁLVULA DE ENTRADA AL CONO DE AIREACIÓN.
V5:	VÁLVULA DE FONDOS DEL DECANTADOR 1
V7:	VÁLVULA DE LODOS DEL DECANTADOR 1
V8:	VÁLVULA DE LODOS DEL DECANTADOR 2
F4.1	FILTRO 4 DE LA PLANTA 1
F1.2:	FILTRO 1 DE LA PLANTA 2
F2.2:	FILTRO 2 DE LA PLANTA 2.
F4.2	FILTRO 4 DE LA PLANTA 2
F1:	TREN DE FILTROS DE LA PLANTA 1.
F2:	TREN DE FILTROS DE LA PLANTA 2.
D1:	DECANTADOR 1.
D2:	DECANTADOR 2.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: <u>DATOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE LAVADO DE DECANTADORES Y FILTROS</u>	Pág. 47
ANEXO B: <u>DATOS DE LOS LODOS RECOGIDOS EN LAS CANECAS Y CANTIDAD DE ESPESADO DESPUÉS DE 6 HORAS</u>	57
ANEXO C: <u>CAUDALES MEDIDOS EN EL VERTEDERO</u>	59
ANEXO D: <u>DATOS DE SECADO EN LAS ERAS PILOTO</u>	63
ANEXO E: <u>NUEVO PROCEDIMIENTO DE LAVADO DE DECANTADORES</u>	65
ANEXO F: <u>ENSAYOS DE ESPESADO A ESCALA REAL.</u>	67
ANEXO G <u>PROCEDIMIENTOS ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES SÓLIDOS SEDIMENTABLES Y HUMEDAD</u>	70
ANEXO H <u>COSTOS</u>	74
ANEXO I <u>FORMULAS</u>	77

1. RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una caracterización de las aguas de lavado de filtros y decantadores de la planta de tratamiento de agua potable “Acueductos la Enea Ltda.”, realizándole ensayos de caudal, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales.

Se diseña además un sistema de espesamiento por gravedad y secado en lechos de arena y grava para los lodos producidos durante el lavado de los decantadores y filtros, por medio de los datos obtenidos a nivel de laboratorio, a nivel piloto y a escala real.

Se demuestra también que la reducción de volumen en las aguas de lavado de los filtros y decantadores es posible por medio de espesado por gravedad y secado en eras de arena y grava.

A partir de los datos también se concluye que la reducción en la tasa retributiva será bastante considerable, pues el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales es bastante grande.

2. ABSTRACT

Presently work is carried out a characterization of the waters of laundry of filters and decanters of the plant of treatment of drinkable water "Aquaducts the Enea Ltda"., carrying out him flow rehearsals, solid sedimentables and total suspended solids.

It is also designed a thickening system by graveness and drying in channels of sand and it burdens for the muds taken place during the laundry of the decanters and filters, by means of the data obtained at laboratory level, at level pilot and real scale.

It is also demonstrated that the reduction of volume in the waters of laundry of the filters and decanters is possible by means of having thickened by graveness and drying in eras of sand and it burdens.

Starting from the data you also concludes that the reduction in the recompensing rate will be quite considerable, because the percentage of removal of the solids suspended totals is quite big.

3. INTRODUCCIÓN

La planta de tratamiento de agua potable "Acueductos la Enea Ltda.", es un acueducto privado que surte agua a la empresa "PROGEL" y que anteriormente surtía también a la desaparecida empresa "DERIVADOS DEL AZUFRE".

Los desechos de la planta de tratamiento se generan principalmente en los desarenadores, los decantadores y los filtros. Los desarenadores no representan un problema para el acueducto, pues los sedimentos son principalmente arena y se puede devolver a la quebrada sin pagar por estos tasa retributiva, además estas son recogidas aguas abajo como material de río.

El problema lo constituyen las aguas de lavado de los ocho filtros cada 48 horas o antes dependiendo de la turbiedad del agua efluente (generalmente los Martes, Jueves, Viernes y Domingo), y la purga de los dos decantadores cada semana los Viernes, o antes dependiendo de las cantidades de lodos en los mismos. Estas aguas de lavado contienen altas cargas de sólidos y material en suspensión que deben ser removidas.

Los lodos producidos contienen además un alto contenido de humedad, la cual debe ser retirada por métodos físicos, para hacer más fácil su manejo y disposición final.

4. OBJETIVOS

4.1 General:

Diseñar un sistema de espesado por gravedad y eras de secado de arena y grava para los lodos producidos en el lavado de decantadores y filtros de la planta de tratamiento de agua potable "Acueductos la Enea Ltda.".

4.2 Específicos:

- 1 Determinar las características de las aguas de lavado de los decantadores y filtros de la planta de tratamiento de agua potable "Acueductos la Enea Ltda.".
- 2 Diseñar y dimensionar un tanque espesador para los lodos provenientes del lavado de los decantadores y filtros.
- 3 Determinar las condiciones de operación del tanque espesador.
- 4 Diseñar y dimensionar los lechos de secado de arena, determinando sus condiciones de operación.
- 5 Determinar la reducción en las concentraciones de sólidos suspendidos de las aguas de lavado vertidas a la quebrada Cimitarra antes y después del tratamiento basados en los ensayos pilotos.

- 6 Calcular por escalado el volumen promedio de los lodos antes y después de cada operación (espesado y secado en lechos de arena y grava).

5. ANTECEDENTES

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta de tratamiento de agua potable “Acueductos La Enea Ltda.” es un acueducto privado, el cual se surte de agua cruda de la quebrada Manizales y realiza el siguiente tratamiento en la misma:

El agua cruda llega a un cono de aireación, el cual sirve además como igualador de caudales, de allí se distribuye a las dos plantas compactas donde se realiza la mezcla rápida y lenta con el floculante y el coagulante (dosificado por medio de bombas peristálticas), para la posterior sedimentación dentro de los mismos tanques.

El agua clarificada es recogida por colectores de tubo con orificios en la parte superior y llevada a un tren de filtros.

La planta posee 8 filtros rápidos que operan por gravedad, de los cuales 4 filtran el agua proveniente del decantador 1 y 4 el agua del decantador 2.

Al agua efluente de los filtros se le ajusta el pH (entre 7.2 y 7.6) adicionándoles Hidróxido de Calcio y se clora de modo que el cloro residual sea 0.2 mg/L con el gas Cloro antes de pasar a los tanques de almacenamiento.

Cada planta puede procesar un caudal máximo de 79 L/seg. y utiliza como coagulante Sulfato de Aluminio clase A y una poli sulfamida producida por la empresa “Protecnica Ingeniería S.A.”, denominado “profloc 1986”.

El consumo promedio de agua potable por parte de PROGEL es de 65 L/seg., con consumos máximos de 75 L/seg.

A continuación se presenta un diagrama general de la planta.

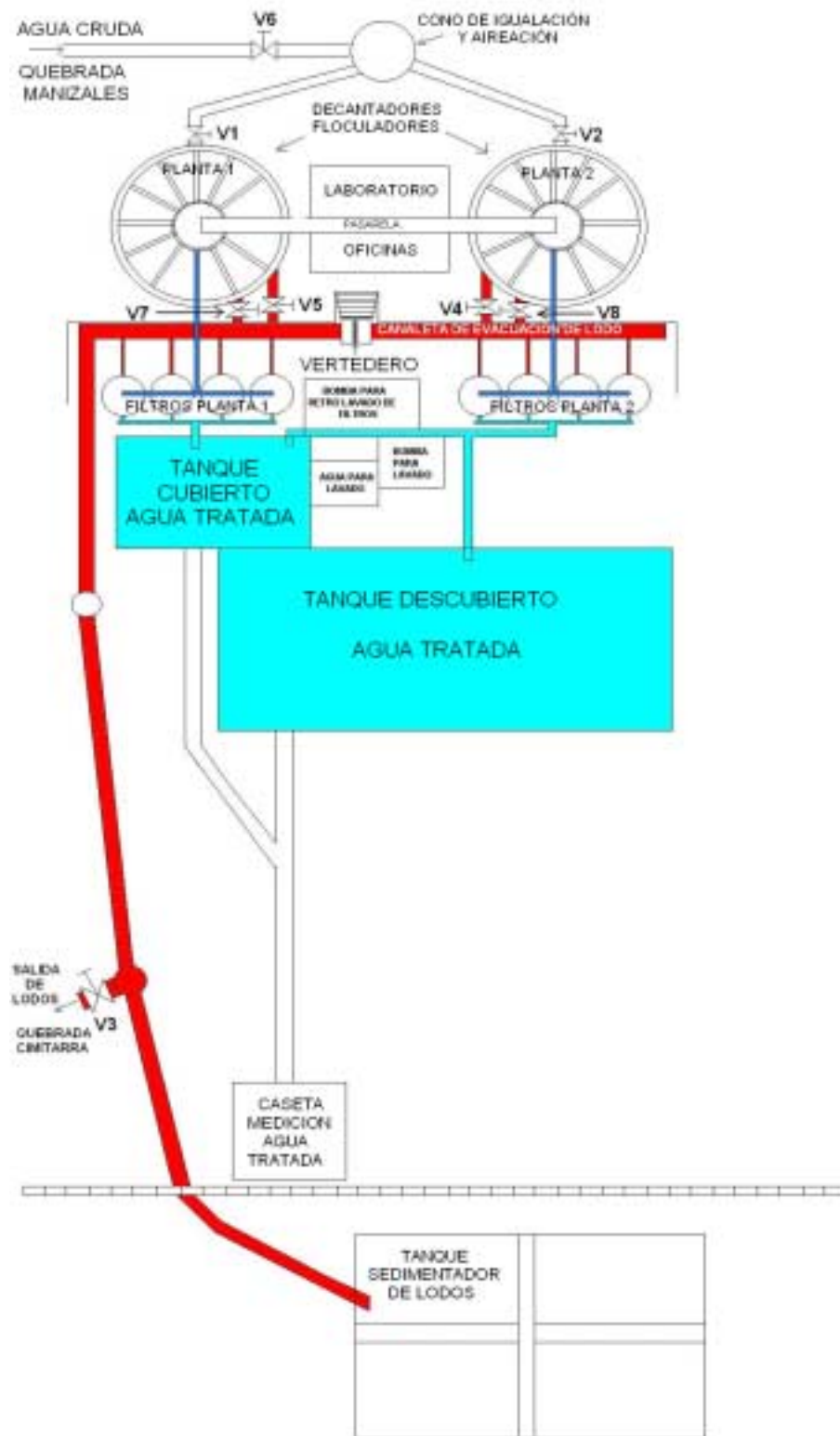


Gráfico 1. Plano de planta de “Acueductos la Enea Ltda.”.

5.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LODOS

Las siguientes tablas presentan las características de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable de acuerdo a diferentes autores desde 1968 hasta 1998, luego de las cuales se enumerarán algunos de los sistemas de remoción de agua de los lodos usados en EE.UU., además de algunos métodos de disposición final para los mismos. Finalmente, se presentarán algunas investigaciones hechas en Brasil sobre espesado, deshidratación de lodos, remoción de agua por circulación forzada, lechos de secado de arena y grava y lagunas de secado de lodos.

Tabla 1. Características de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable (1):

Autor / año	DBO (mg / L)	DQO (mg / L)	pH	ST (mg / L)	SV (mg / L)	SS %SS
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15000	6.0 a 7.6	1100 a 16000	20% a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1100	7.0	4300 a 14000	25%	80
Bugg (1970)	380	1162 a 15800	6.5 a 6.7	4380 a 14000	20%	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 10000	5.0 a 7.0	3000a 15000	20%	75
Culp (1974)	40 a 150	340 a 5000	7.0	-	-	-
Nilsen (1974)	100	2300	-	10000	30%	-
Singer (1974)	30 a 300	30 a 5000	-	-	-	-

Tabla 1 (Continuación). Características de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable (1):

Autor / año	DBO (mg / L)	DQO (mg / L)	pH	ST (mg / L)	SV (mg / L)	SS %SS
Cordeiro (1981)	320	5150	6.5	81575	20.7%	-
Vidal (1990)	449	3487	6.0 a 7.4	21972	15%	-
Vidal (1990)	173	1776	6.7 a 7.1	6300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5600	6.4	30275	26.3%	-
Patrizze (1998)	-	-	5.55	6112	19%	-
Patrizze (1998)	-	-	6.8	6281	-	-

En la tabla anterior se puede ver que las características de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable son muy variables, esto hace necesario que se realice la caracterización de las aguas de lavado para las condiciones existentes en la planta de tratamiento.

Tabla 2. Concentración de metales presentes en la fase sólida de los lodos de plantas de tratamiento de agua potable* (1):

Metales	PTAP 01	PTAP 02	PTAP 03
Aluminio (mg / L)	3965.00	391	325
Bario (mg / L)	-	0.22	0.18
Cadmio (mg / L)	0.14	0.02	0.02
Calcio (mg / L)	142.00	-	0.08
Plomo (mg/L)	2.32	0.20	0.30
Cloro	-	35	36.3
Cobre	1.47	0.12	0.2
Cromo Total	3.82	0.06	0.09
Hierro Total	3381.00	129	166
Hierro soluble	-	6.14	0.12
Magnesio	27.00	2.87	1.38
Manganeso	1.86	7.80	3.44
Manganeso soluble	-	4.57	1.00
Mercurio	-	-	-
Níquel	2.70	0.14	0.12
Potasio	49.97	7.37	7.55
Sodio	311.00	29.3	63.0
Zinc	2.13	0.7	0.98

*Situadas en el estado de Sao Paulo (Brasil)

Tabla 3. Características de los lodos generados por los decantadores (1):

PARÁMETROS	VALOR
pH	6.4
DQO (mg / L)	5600
Sólidos Totales (ST) (mg / L)	30275
Sólidos Totales Fijos (STF) (mg / L)	22324
Sólidos Totales Volátiles (STV) (mg / L)	7951
Sólidos Suspendidos Totales (mg / L)	27891
Sólidos Suspendidos Totales fijos (mg / L)	22034
Sólidos Suspendidos Totales volátiles (mg / L)	5857
Sólidos sedimentables (mL / L)	710
Masa específica de los lodos (g / cm ³)	265
Nitrógeno Total (mg / L) (NTK)	280
P-PO ₄ (mg / L)	97.8

Tabla 4. Sistemas de remoción de agua de los lodos utilizados en Estados Unidos (1):

TIPOS DE SISTEMA	Número de plantas	% con relación a 469 PTAP
Espesado en lagunas	318	67.8
Reciclaje de lodos	68	14.5
Espesado por gravedad	61	13.0
Calentamiento y descongelado	55	11.7
Lechos de secado	47	10.0
Filtros Prensa	20	4.3
Centrifugación	12	2.6
Filtros a vacío	4	0.9
Recuperación de cal	1	0.2
Recuperación de sulfato de Aluminio	1	0.2
Otros	71	15.1

Tabla 5. Prácticas de disposición de lodos en los Estados Unidos en grupos de población (1)*:

PRACTICA DE DISPOSICIÓN	10 A 25 MILLARES	25 A 50 MILLARES	20 A 100 MILLARES	MAYOR DE 100 MILLARES
Aplicación al suelo	37.8	20.2	24.1	20.7
Descarga en sistemas de drenaje sanitarios	20.5	32.1	25.5	20.7
Terreno municipal	24.4	25.7	20.4	20.7
Terrenos	9.4	20.2	15.7	22.9
Descarga directa en cursos de agua	13.4	11.9	15.7	14.1
Otros	6.3	4.5	7.4	10.6

* La tabla anterior es presentada por el autor citado (1) sin las unidades respectivas.

5.3 ESPESADO

En la escuela de San Carlos (Brasil) se llevaron a cabo ensayos de flotación y sedimentación de dos plantas de tratamiento de agua, con lo que obtuvieron los siguientes resultados (1):

5.3.1 Lodo de la planta Capim Fino de la ciudad de Piracicaba Sao Paulo (Brasil). Esta planta recibe agua del río Corumbataí, y posee una capacidad de tratar 1100 L/s. Esta planta es de tipo convencional, con zona de mezcla rápida, floculación, decantación, filtración y desinfección final. Como coagulante se emplea Sulfato de Aluminio.

El sistema de Decantación está compuesto de cuatro unidades convencionales de forma rectangular horizontal. Dos de los decantadores disponen de removedores mecánicos, con aspiración de lodo por sifón.

Se emplearon polímeros de alto y bajo peso molecular, aniónicos, catiónicos y no iónicos, en diferentes dosis para ambos ensayos, de flotación por aire disuelto y de espesado por gravedad.

5.3.1.1 Espesado por flotación con aire disuelto. Los mejores resultados se dieron con dosis de 4.5 g / Kg. de SST de polímero catiónico, de alto peso molecular. Se obtuvo un porcentaje teórico de sólidos en el lodo de 7.1 %, turbidez del sobrenadante de 1.0 uT.

5.3.1.2 Espesado por gravedad. Los mejores resultados se obtuvieron con el polímero catiónico de alto peso molecular, en dosis de 10.26 g / Kg. Se obtuvo un porcentaje teórico de sólidos en los lodos de 4.6% y un sobrenadante con una turbidez de 1.5 uT

Al comparar los métodos anteriores se puede ver que el espesado por flotación además de usar dosis más bajas, la eficiencia del espesado es mayor, además pudieron apreciar que los lodos de esta planta que usa Sulfato de Aluminio espesaron mejor con un polímero catiónico para ambos tipos de espesado (1).

5.4 DESHIDRATACIÓN DE LODOS

5.4.1 Lechos de Secado y Lagunas de Lodos (1). Según Neubauer, quien realizó experiencias con estaciones piloto de lechos de secado, en un medio con temperatura ambiente entre 20 y 27 °C y una humedad relativa entre 72 y 93%, el drenado del agua disminuía hasta cesar completamente en 24 h, y el secado por evaporación duraba entre 24 y 72 horas.

Los lodos provenían de coagulación con Sulfato de aluminio, de las estaciones de tratamiento de agua potable de Shoremont, Rochester, N.Y., con capacidad de 1300 L/Seg., y Wolcot, N.Y., con caudales de 42 L/seg.

O'Brian y Gere, observaron que los lodos de estaciones de tratamiento de agua potable dispuestos en lechos de secado, cuyo afluente contenía concentraciones de 1% de sólidos después de un intervalo de tiempo de 70 a 100 horas, producían un residuo con 20 % en sólidos.

Adrian y Nebkler, describieron la estación de tratamiento de agua potable de Rinconada, en California, que empleaba lechos de secado para lodos y agua de lavado de filtros (después de recuperación de agua), mostrando que la capacidad máxima de lodo utilizada era 60 cm.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar las características de las aguas de lavado, se realizaron 20 muestreos de los filtros y 11 muestreos del decantador, los cuales cubren un periodo de 3 meses.

El parámetro para definir la cantidad de muestreos fue el tiempo que fijó el acueducto para la obtención de los datos, disponiendo solo 3 meses para realizar los muestreos. Es de anotar que en la propuesta se planteó realizar 29 muestreos para filtros, de los cuales solo se pudieron realizar 20 debido a que en algunas ocasiones se debieron lavar los filtros en las horas de la madrugada, siendo imposible la toma de las muestras.

El tiempo de lavado de los filtros es de aproximadamente 6 min. y tienen una variación rápida de las cargas al comienzo y al final del lavado.

A la salida de los filtros se recolectaron muestras de 9 Litros cada 20 seg. Las muestras se depositaron en canecas de 220 Litros donde se formó una muestra compuesta (cantidades iguales a intervalos constantes de tiempo) para su posterior caracterización.

En el caso del decantador 1, se realizaron únicamente dos muestreos, debido a que el punto de muestreo se encontraba muy lejos del decantador (aproximadamente 40 metros aguas abajo del fondo del decantador), por lo tanto había mucha acumulación de lodos en la canaleta de conducción, además no era posible medirle el caudal, pues la salida de los lodos a la quebrada son unos escalones, por lo que no se podía instalar un vertedero y por lo turbulento era muy posible perder las aspas de un molinete en caso de usarlo.

Para el decantador 2 se hizo el muestreo en la canaleta de conducción de los lodos a 5 metros aproximadamente de la tubería de descarga en el fondo del decantador, donde se instaló además un vertedero para realizar el seguimiento del caudal.

Usando el método estándar (el cual se presenta en el Anexo G), se les hicieron a todas las muestras los ensayos de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales (Anexo A).

En cada muestreo de filtros se midieron varios caudales (cada 20 seg. para los filtros y cada minuto para los decantadores), con estos caudales se halló un único caudal promedio por medio de la fórmula 1 del Anexo J

El caudal de las aguas de lavado se midió por medio de un vertedero localizado en la canaleta de conducción de aguas de lavado, a 5 metros aproximadamente de la tubería de descarga del decantador 2.

El espesado a nivel piloto se realizó en canecas de 220 L las cuales se llenaron con las aguas de lavado, por medio de un balde aforado, tomando 7 litros de muestra cada minuto para el decantador, y alrededor de 9 litros cada 20 seg. para los filtros.

El lodo recogido se dejó reposar 6 horas, y después se le retiró el clarificado haciendo sifón con una manguera y recolectando muestras del mismo para los análisis antes mencionados.

Por medio de los datos de Sólidos sedimentables en el cono Imhoff, se definió el tiempo de retención, el cual se obtuvo como un promedio de los tiempos que tardaron en sedimentar los lodos hasta que la variación de volumen con respecto al tiempo fuera despreciable.

Los volúmenes de lodo que deberán pasar a los lechos de secado se obtienen por escalados de los datos obtenidos en el cono.

El porcentaje de remoción de sólidos se calculó con base en los sólidos suspendidos totales de las aguas de lavado (iniciales) y los sólidos suspendidos totales del agua clarificada de las canecas de 220 L (finales).

Durante el secado de los lodos en las eras piloto se tomaron muestras con el fin de determinarles la humedad, tomando alícuotas separadas 3 cm. una de la otra y utilizando una espátula para tomarlas a diferentes alturas y con una frecuencia en la toma de muestras de 24 hora.

La humedad se midió llevando la muestra a una estufa a 105°C durante cuatro horas y una hora en el desecador, para ser pesada luego, repitiendo el proceso hasta obtener peso constante (método estándar).

Los datos de caudal de agua percolada no se realizaron debido a que la poca cantidad de agua que percolaba de los lodos era absorbida por la arena y no salía por la tubería de drenado.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 RESULTADOS A NIVEL DE LABORATORIO

Con los resultados siguientes se planea encontrar un promedio de los lodos sedimentables de las muestras tomadas a las aguas de lavado de los filtros y decantadores, los cuales servirán para determinar por escalado los volúmenes de lodos que se sedimentarán en el tanque espesador.

Los siguientes son los valores para los sólidos sedimentables a tiempo final (mL. de lodo sedimentado / L de agua de lavado) que se obtuvieron a partir de las muestras de lavado de filtros y decantadores por medio del cono de Imhoff.

Tabla 6. Sólidos sedimentables a tiempo final* obtenidos por el método estándar** (Anexo G)

LAVADO DIA	D 1 (mL/L)	D 2 (mL/L)	F 1.2 (mL/L)	F 2.2 (mL/L)	F 4. 2 (mL/L)	F 4.1 (mL/L)
1	175	170	----	----	-----	-----
2	----	----	-----	16	22	-----
3	----	----	-----	12	15	-----
4	180	200	----	----	-----	-----
5	140	150	----	----	-----	-----
6	----	----	7	11	9	----
7	----	----	12	19	16	----
8	----	120		5	5.5	----
9	----	----	7.5	10	6	----
10	----	----	10	18	12	----
11	----	----	11	13	8	----
12	----	265	---	6	3	----
13	----	----	13	15	13	----

Tabla 6 (Continuación). Sólidos sedimentables a tiempo final* obtenidos por el método estándar**

LAVADO DIA	D 1 (mL/L)	D 2 (mL/L)	F 1.2 (mL/L)	F 2.2 (mL/L)	F 4. 2 (mL/L)	F 4.1 (mL/L)
14	----		8	6.5	8.5	----
15	----	510	----	4.5	1.9	----
16	----		----	----	4.2	2.0
17	----	650	----	----	44	1.5
18	----	----	----	----	9.0	3.5
19	----	468	----	7.0	8.0	----
20	----		----	20	28	----
21	----	100	----	8.5	10.5	----
22	----	470	----	18	16	----
23	----	220	----	10	7.5	----
Promedio (mL)	165	302.1	11.2	13.2	12.1	2.3
% (Vol./Vol.)	16.5	30.21	1.12	1.32	1.21	0.23
Intervalo	140-180	100-650	7-13	4.5-20	3-44	1.5-3.5
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	17.80	179.16	2.343	5.169	9.804	1.041
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	13.206	62.201	20.919	39.159	81.025	45.26
VALOR MÁXIMO.(mL/L)	180	650	13	20	44	3.5

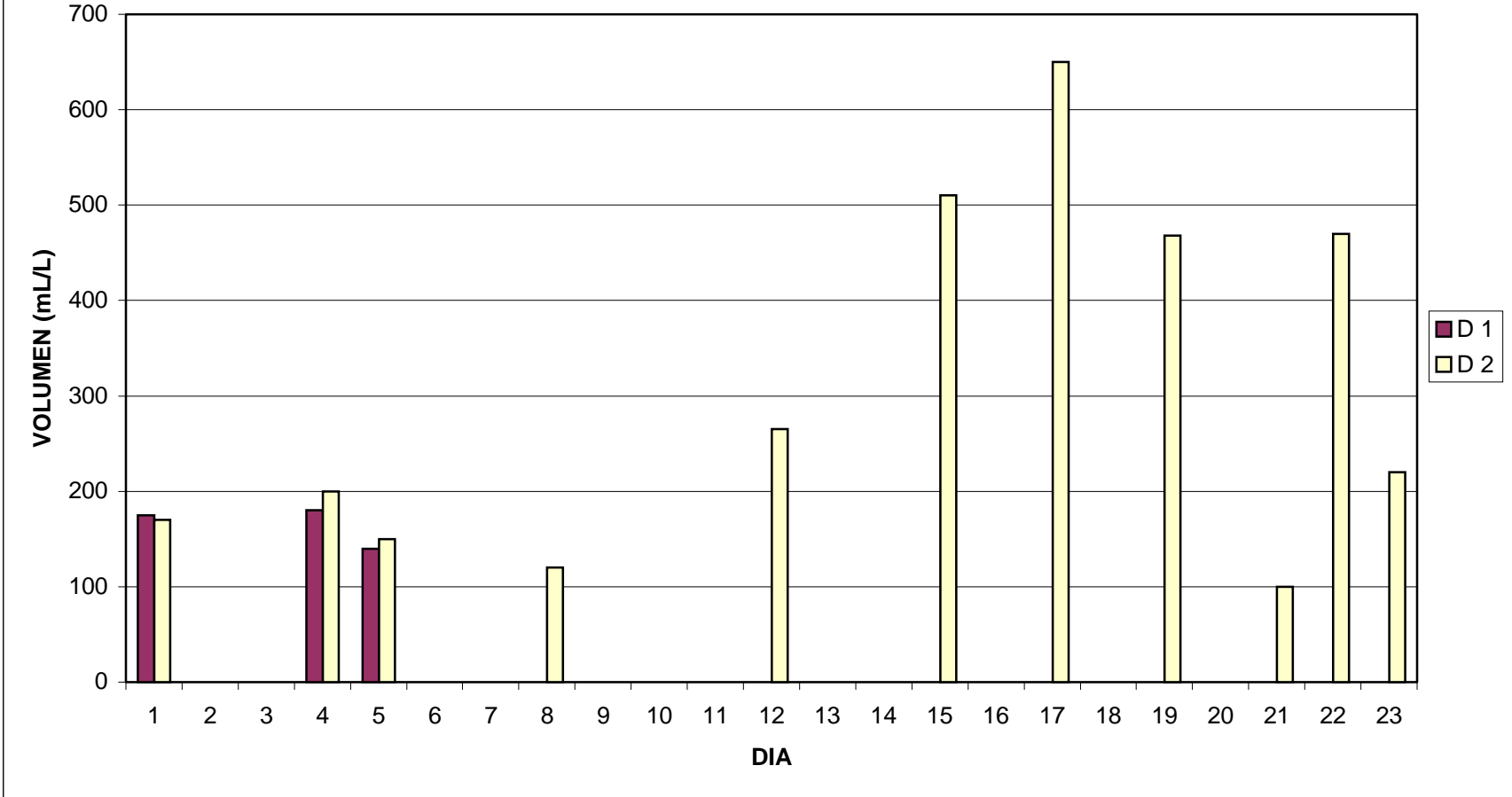
*Entiéndase por tiempo final el momento en que la variación del volumen de lodo sedimentado con respecto al tiempo es despreciable.

** Los datos a diferentes tiempos se encuentran en el anexo A

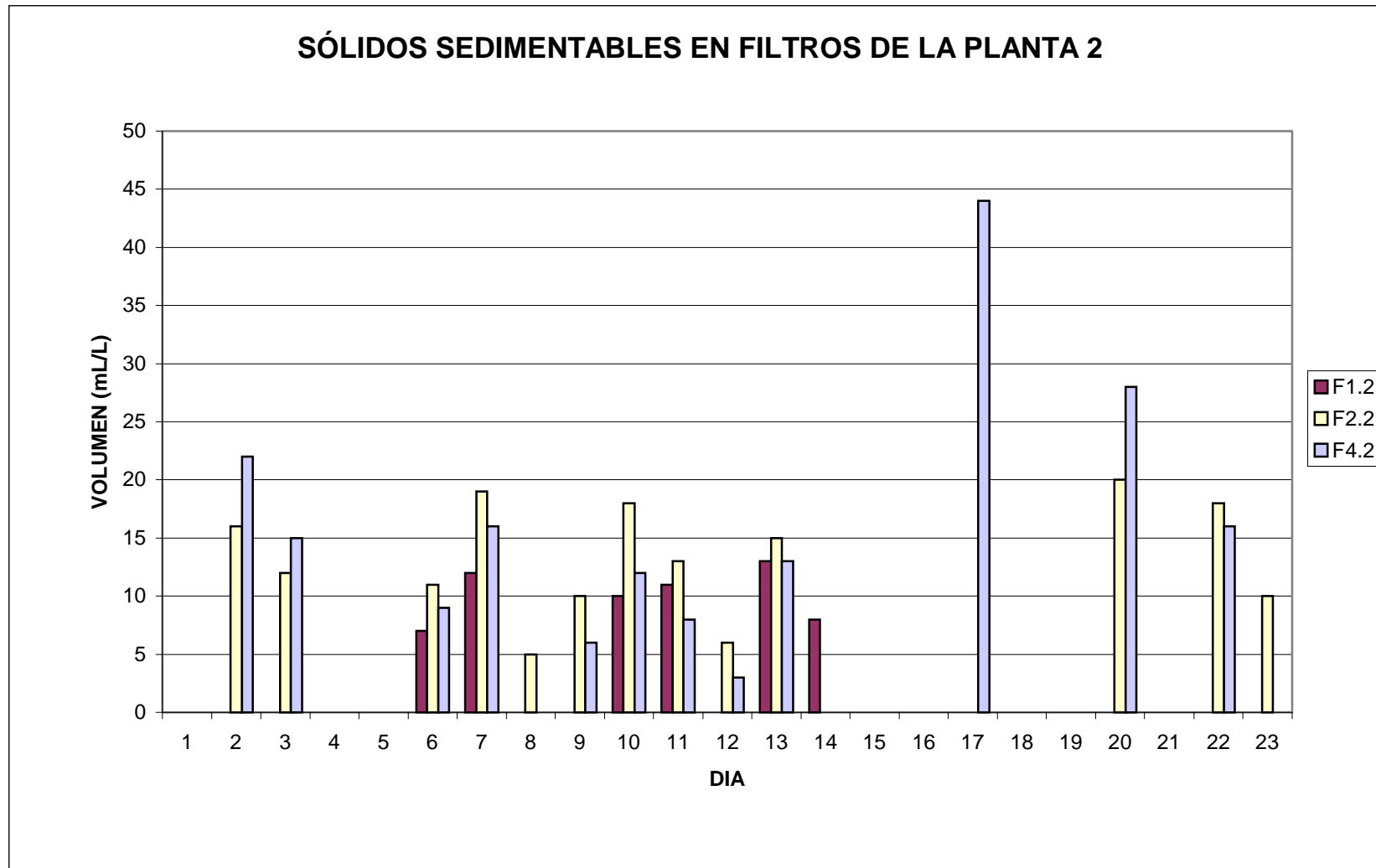
El filtro 3 de la planta 2 no se tuvo en cuenta para los muestreos debido a que se encontraba en un proceso de cambio del material filtrante, y de los colectores. Los filtros de la planta 1 no se muestrearon tampoco, pues aún tenían los colectores y el material filtrante viejos.

El filtro 4, de la planta 1 solo se muestreó en algunas ocasiones después de que se le hizo el cambio anteriormente mencionado, pues solo se disponía de 3 recipientes para la recolección de muestras y se debía incluir el muestreo de los decantadores, pues estos son los que producen la mayor cantidad de sólidos suspendidos.

SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN DECANTADORES 1 Y 2 (NIVEL LABORATORIO)



Gráfica 2. Sólidos Sedimentables en decantadores 1 y 2.



Gráfica 3. Sólidos sedimentables en filtros de la planta 2.

7.2 RESULTADOS A NIVEL PILOTO

A continuación se presentan los porcentajes de lodo espesado promedio que se obtuvieron llenando canecas de 220 L con las aguas de lavado de filtros y decantadores, tomando alícuotas iguales a intervalos constantes de tiempo, dejando reposar por 6 horas la muestra y midiendo el volumen final de lodos sedimentados, además se tabulan los caudales medidos con el vertedero para el tren de filtros de la planta 2 y el decantador 2 con sus respectivos volúmenes:

Tabla 7. Porcentaje de lodo promedio a nivel piloto*

EQUIPO	% de lodo espesado prom. (L de lodo espesado / L de muestra)
Planta 1	25.7
Planta 2	29.32
Filtro 1 (Planta 2)	1.22
Filtro 2 (Planta 2)	1.05
Filtro 4 (Planta 2)	0.94
Filtro 4 (Planta 1)	1.04

* Los datos puntuales se encuentran en el anexo B

Tabla 8. Caudales y volúmenes promedio medidos con el vertedero para el tren de filtros de la planta 2.*

DIA	Q _{TOTALPROM} (L/ seg.)	Q _{MÁXIMO} (L/ seg.)	V _{TOTALPROM} Para 4 filtros (m ³)	V _{MÁXIMO} Para 4 filtros (m ³)
15	103.7	110.84	131.124	139.645
16	90.21	94.26	111.860	120.652
17	94.98	97.34	128.028	131.214
18	82.67	90.50	98.873	108.238
PROMEDIO	92.89	98.235	117.471	124.937

* Los valores puntuales se encuentran en el anexo C.

Para calcular los datos anteriores se promediaron los valores de caudal contenidos en la tabla 1 del Anexo C.

Los volúmenes se calcularon usando los tiempos de lavado contenidos en la Tabla 1 del Anexo C teniendo en cuenta que el tiempo es un promedio de los tiempos medidos y los filtros que no se muestrearon se asumieron como una aproximación al promedio.

Tabla 9. Caudales y volúmenes promedio medidos con el vertedero para el decantador 2.*

DIA	Q Total promedio (L/seg.)	Q Máximo (L/seg.)	V Total promedio (m ³)	V Máximo (m ³)
17	112.29	118.04	126.882	133.385
19	123.74	131.78	141.060	150.229
PROMEDIO	118.05	124.91	133.971	141.807

*Los valores puntuales se encuentran en el anexo C

7.3 VOLÚMENES DE AGUA DE LAVADO PRODUCIDA EN EL DECANTADOR

7.3.1 Por balances de materia:

Tabla 10. Cálculo del volumen de agua de lavado para el decantador 2 por balances de materia.

PARÁMETRO	VALOR
DIÁMETRO DEL DECANTADOR 1 (m)	14.3
DESCENSO DEL NIVEL DE AGUA DURANTE LAVADO (m)	0.6
ENTRADA DE AGUA PROMEDIO AL DECANTADOR 1 (L/seg.)	55
TIEMPO DE LAVADO (mm:ss)	22:50
VOLUMEN QUE ENTRA EN 22 min.50 seg. (m ³)	75.35
VOLUMEN POR DESCENSO DE NIVEL(m ³)	96.37
VOLUMEN TOTAL DESALOJADO DURANTE LAVADO (m³)	171.72

7.3.2 Medidos con el vertedero.

Tabla 11. Cálculo del volumen de agua de lavado para el decantador 2 por medio de las medidas de caudal del vertedero.

PARÁMETRO	VALOR
CAUDAL PROMEDIO SIN ABRIR VÁLVULA DE FONDOS (L/seg.).	119.12
TIEMPO DE LAVADO SIN APERTURA DE FONDOS (seg.).	1260
VOLUMEN DESALOJADO ANTE DE ABRIR FONDOS (m ³)	150.09
CAUDAL PROMEDIO CON APERTURA DE FONDOS (L/seg.).	121.48
TIEMPO QUE DURARON ABIERTOS LOS FONDOS (seg.)	110
VOLUMEN DESALOJADO DESPUÉS DE ABRIR FONDOS (m ³)	13.36
VOLUMEN TOTAL DESALOJADO (m³)	163.45

Al comparar los datos anteriores se puede ver que difieren en un 4.8 %, lo que nos muestra que los valores medidos en el vertedero no son muy diferentes a los obtenidos por un balance de materia.

7.4 ENSAYOS DE ESPESADO A ESCALA REAL

Los ensayos de sedimentación a escala real se pudieron realizar gracias a que en el sector de la planta de Progel se pudo adecuar un tanque de aproximadamente 340 m³ para tal fin.

Para la adecuación del tanque fue necesario la construcción de una compuerta provista de una válvula de cortina de 4 pulgadas en la parte inferior del mismo para desalojar los lodos.

También fue necesario extender alrededor de 45 metros de tubería de 10 pulgadas de diámetro, y poner una compuerta con válvula en el descole a la quebrada cimitarra.

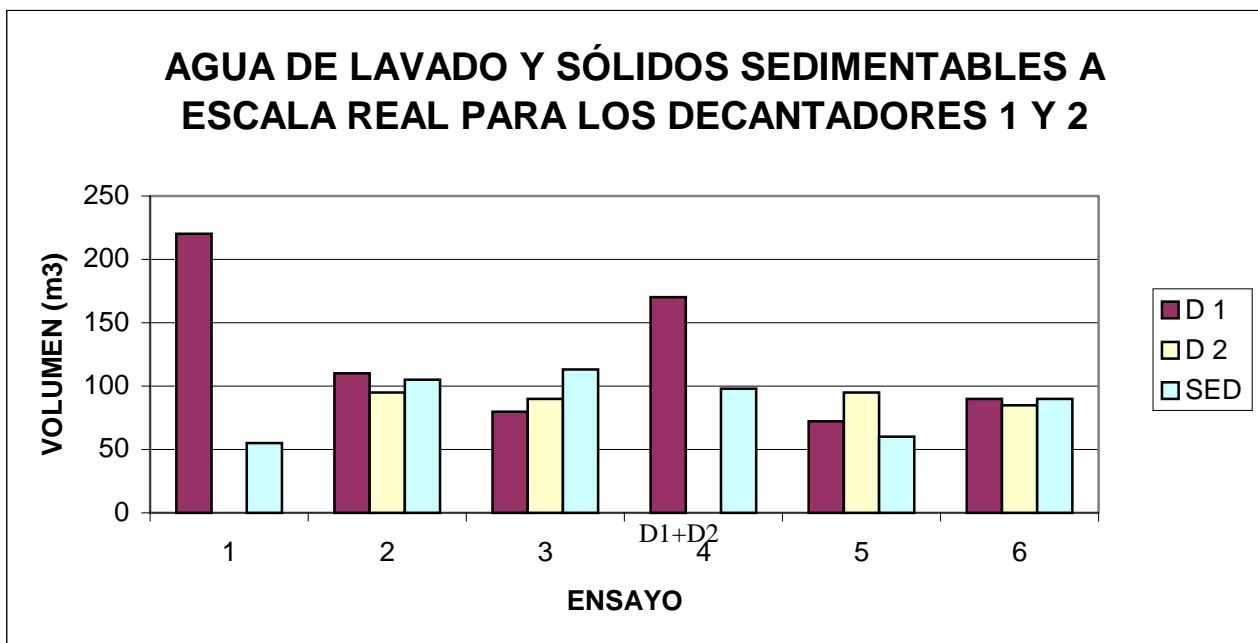
El volumen dentro del tanque espesador se midió por medio de unas líneas de aforo que se pintaron en la pared del tanque.

Los resultados obtenidos en dicho tanque se presentan a continuación:

Tabla 12. Agua de lavado y sólidos sedimentables a escala real para los decantadores 1 y 2*

ENSAYO	AGUA DE LAVADO (m ³)		LODO SEDIMENTADO(m ³)
	D1	D2	
1	220	----	55
2	110	95	105
3	80	90	113
4	170		98
5	72	95	60
6	90	85	90

*el valor del ensayo 4 corresponde a la suma de los volúmenes de las aguas de lavado.



Gráfica 4. Agua de lavado y sólidos sedimentables a escala real para los decantadores 1 y 2.

Donde: D1= Decantador 1
 D2= Decantador 2
 SED = Sólidos Sedimentados en 24 horas (excepto el ensayo 5 que fue a 36 horas).

En el primer ensayo solo se pudo muestrear un decantador pues la cantidad de agua de lavado de los dos decantadores excedía la capacidad del tanque, pues aún no se había optimizado el lavado de los mismos.

El lavado de los decantadores se modificó después del primer ensayo con el fin de minimizar los gastos de agua y hacer más eficiente el mismo, estos cambios se pueden ver en el tiempo de lavado y en la cantidad de agua de lavado. El nuevo procedimiento se presenta en el Anexo E.

7.5 PROMEDIOS

A continuación se presentan los promedios de los datos que se tomaron a escala real:

7.5.1 Filtros:

Tiempo de lavado promedio (4 Filtros) (minutos):	20:00
Volumen agua de lavado promedio (4 Filtros) (m ³):	120
Lodo sedimentado Promedio m³:	1.06

El tiempo de lavado en los ensayos a escala real corresponde a un valor dado por la directora técnica del acueducto Magnolia Villamil, la cual fijó el tiempo de lavado de 5 minutos para cada filtro.

El volumen de agua de lavado promedio de los filtros se calcula a partir de los datos de lavado de filtros contenidos en el anexo C.

El lodo sedimentado promedio se calculó a partir de la Tabla 7, ya que a escala real el lodo sedimentado por los filtros era muy pequeño para ser medido mediante las líneas de aforo pintadas en el tanque.

7.5.2 Decantadores:

En los siguientes promedios no se incluyen los datos correspondientes al 1^{er} ensayo, pues estos se tomaron antes de hacer la optimización en el lavado de los decantadores.

Tiempo de lavado promedio para un decantador:	9:54
Volumen agua lavado promedio para un decantador (m ³):	86
Lodo sedimentado promedio para un decantador (m³):	47

Los valores anteriores para los decantadores corresponden a promedios de los datos reales contenidos en el Anexo G.

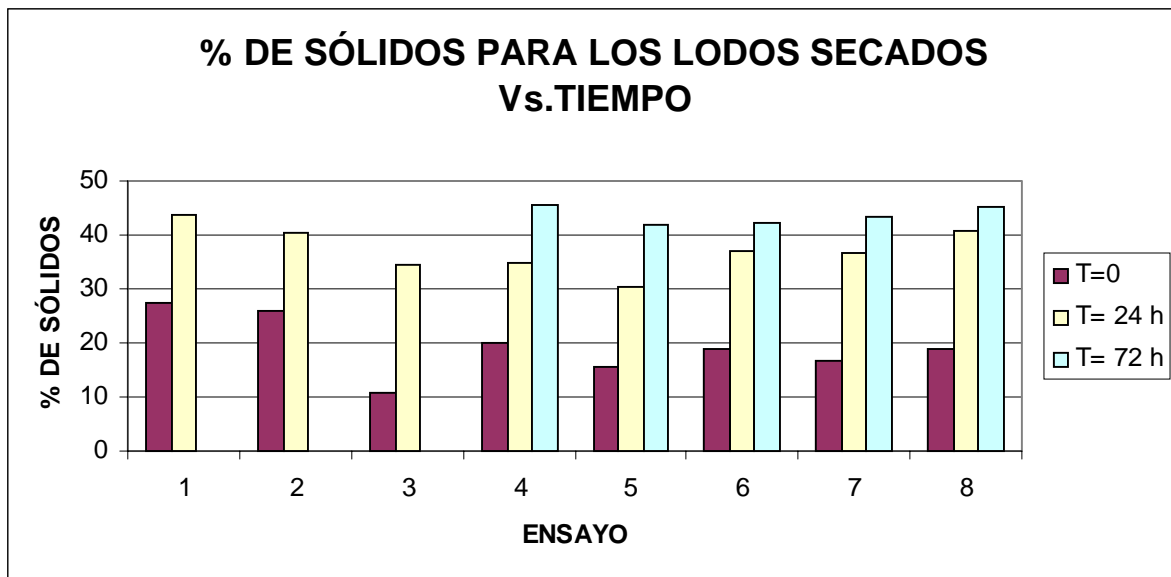
7.6 DATOS DE SECADO

Tabla 13. Porcentajes de sólidos y de humedad de los lodos sometidos a secado a diferentes tiempos*

ENSAYO	TIEMPO INICIAL		24 HORAS		72 HORAS	
	% SOL.	% HUM.	% SOL.	% HUM.	% SOL.	% HUM.
1	27.58	72.5	43.72	56.28	N.M.**	N.M.
2	25.88	74.12	40.25	59.75	N.M.	N.M.
3	10.81	89.19	34.31	65.69	N.M.	N.M.
4	19.90	80.10	34.96	65.14	45.63	54.37
5	15.50	84.50	30.52	69.48	41.78	58.22
6	18.98	81.02	37.20	62.80	42.12	57.88
7	16.51	83.49	36.63	63.37	43.20	56.80
8	18.92	81.08	40.78	59.22	45.05	54.95
PROMEDIOS	16.77	83.23	35.73	64.27	43.56	56.44

*Los datos correspondientes al ENSAYO 1 Y 2 no se incluyeron a la hora de tomar los promedios pues estos lodos permanecieron demasiado tiempo espesando, por lo que sedimentaron mucho.

** N.M. = no fue posible el procesamiento de los datos, pues dieron valores negativos al ser mayor el peso final que el inicial, al parecer por demasiada humedad en el gel absorbente del desecador.



Gráfica 5. Porcentaje de sólidos para los lodos secados a diferentes tiempos.

8. DISEÑO DEL ESPESADOR Y LAS ERAS DE SECADO

8.1 DISEÑO DEL TANQUE ESPESADOR POR GRAVEDAD

8.1.1 Volumen: Para determinar su volumen se tendrá en cuenta la manera como operará el tanque sedimentador, el cual lo hará del siguiente modo:

9. Día 1: se carga el tanque con las aguas de lavado del Decantador 1.

1.1 Tres horas después se retira el clarificado del tanque y se lava el tren de filtros de la planta 1, retirando el clarificado 6 horas después.

1.2 Se carga el lecho de secado con el lodo sedimentado.

9. Día 2: Se realiza el lavado de la planta 2 siguiendo el mismo procedimiento del día uno, pero dejando el lodo en el tanque sedimentador.

9. Día 3: Se lava el tren de filtros de la planta 1, se retira el clarificado (6 horas después de cargado el tanque) y se deja de nuevo el lodo en el tanque sedimentador.

9. Día 4: Se lava el tren de filtros de la planta 2 y se pasa el lodo remanente en el tanque a las eras de secado, después de que a estas se les ha retirado el lodo seco.

9. Día 5: Se lava el tren de filtros de la planta 1, se retira el clarificado y se conservan los lodos en el tanque.

9. Día 6: Se lavan los filtros de la planta 2 se retira el clarificado y se mantiene el lodo en el tanque espesador.
9. Día 7: Se lava el tren de filtros de la planta 1 retirando el clarificado y conservando el lodo en el tanque.

Se descarga el lodo del lecho de secado.

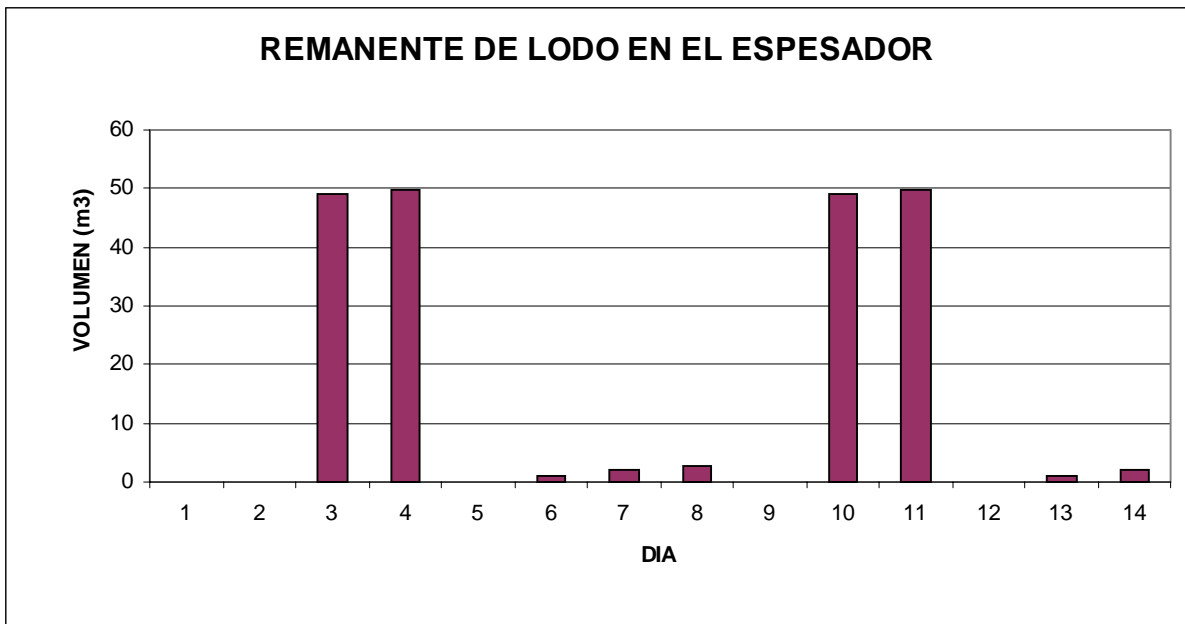
8. Día 8: Comienza de nuevo el ciclo teniendo en cuenta que los filtros se lavan cada dos días, los decantadores cada semana, el lecho de secado se carga los días 1 y 4 y se descarga los días 4 y 7.

En la siguiente tabla se presenta el procedimiento anterior con los volúmenes respectivos, los cuales son promedios de los datos reales:

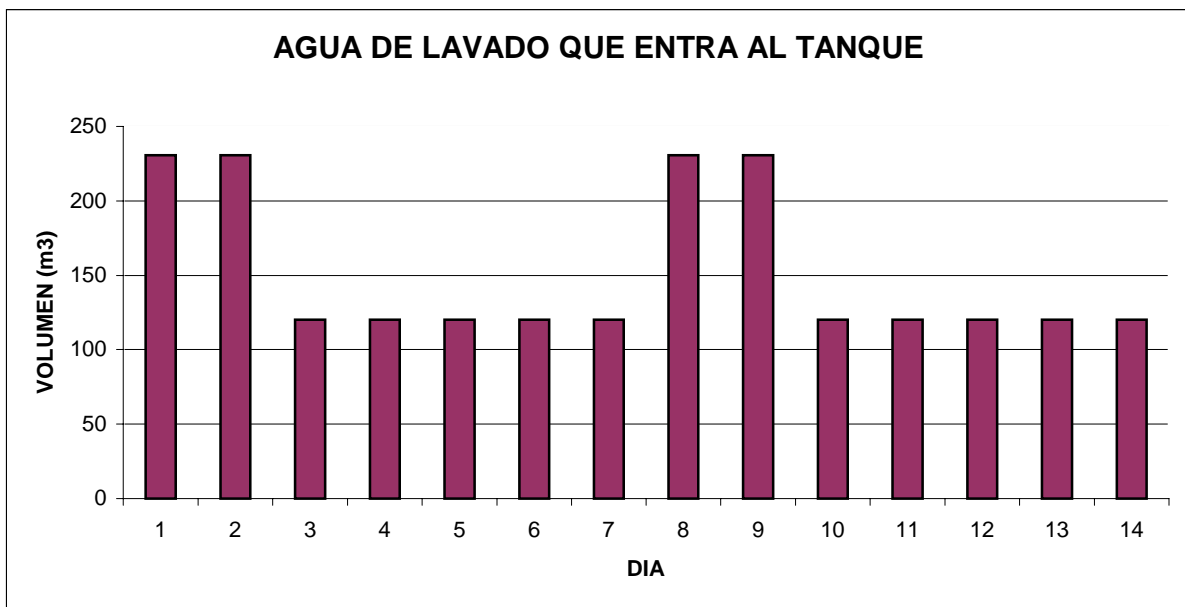
Tabla 14. Ciclo de entradas y salidas de materia al tanque espesador y a las eras de secado.

Día		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lavado en		D1	D2						D1	D2					
		F1		F1		F1		F1		F1		F1		F1	
			F2		F2		F2		F2		F2		F2		F2
Tanque Sedimentad	Rem.	0	0	48.96	49.92	0	0.96	1.92	2.88	0	48.96	49.92	0	0.96	1.92
	Ent.	230.7	230.7	120	120	120	120	120	230.7	230.7	120	120	120	120	120
	Sal.	181.74	181.74	119.04	119.04	119.04	119.04	119.04	181.74	181.74	119.04	119.04	119.04	119.04	119.04
	V _{max.}	168	168	168.96	169.92	120	120.96	121.92	170.88	168	168.96	169.92	120	120.96	121.92
	Tot.	48.96	48.96	49.92	50.88	0.96	1.92	2.88	51.84	48.96	49.92	50.88	0.96	1.92	2.88
Lecho secado	Sal.	No	No	No	Si	No	No	Si	No	No	No	Si	No	No	Si
	Ent.	48.96	No	No	50.88	No	No	No	51.84	No	No	50.88	No	No	No

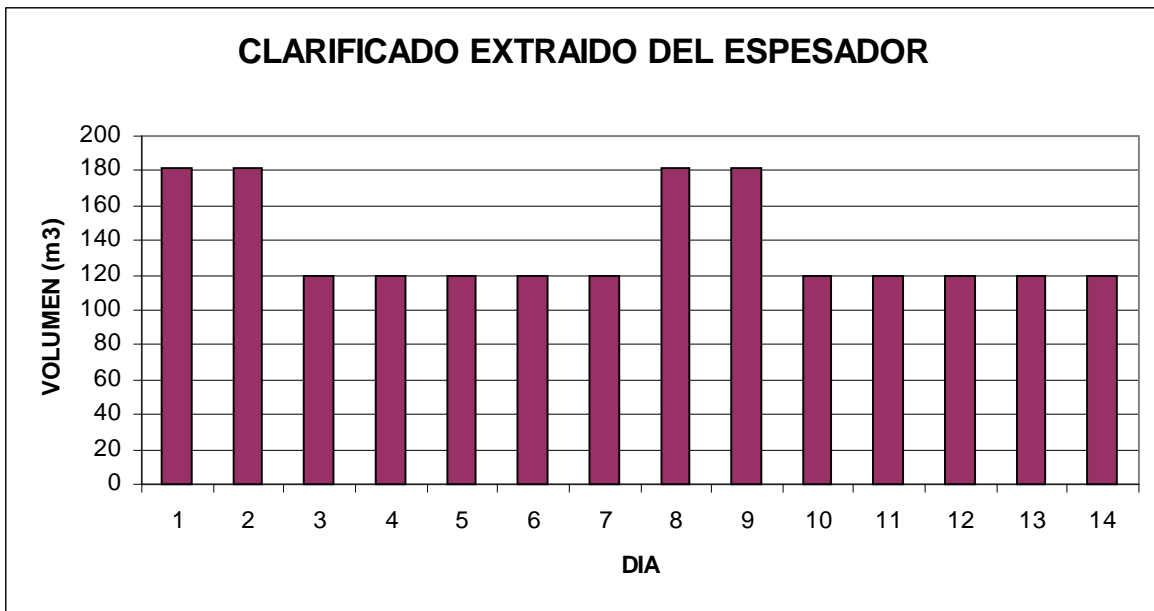
*Todos los datos contenidos en la tabla se encuentran en metros cúbicos.



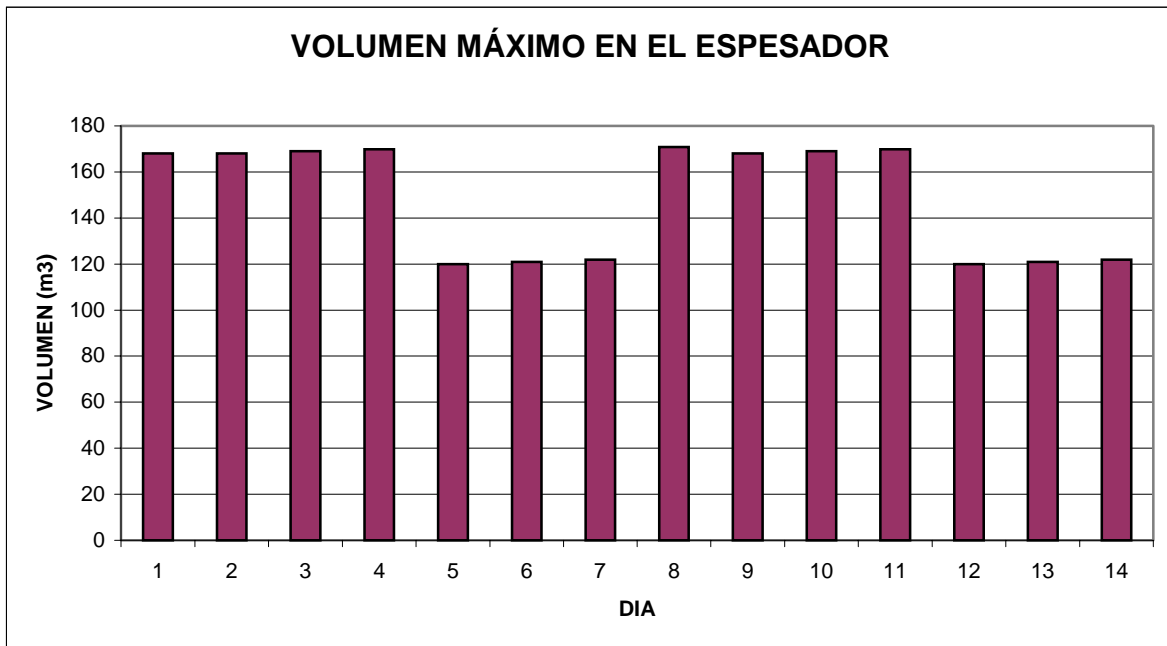
Gráfica 6. Remanente de lodo en el espesador.



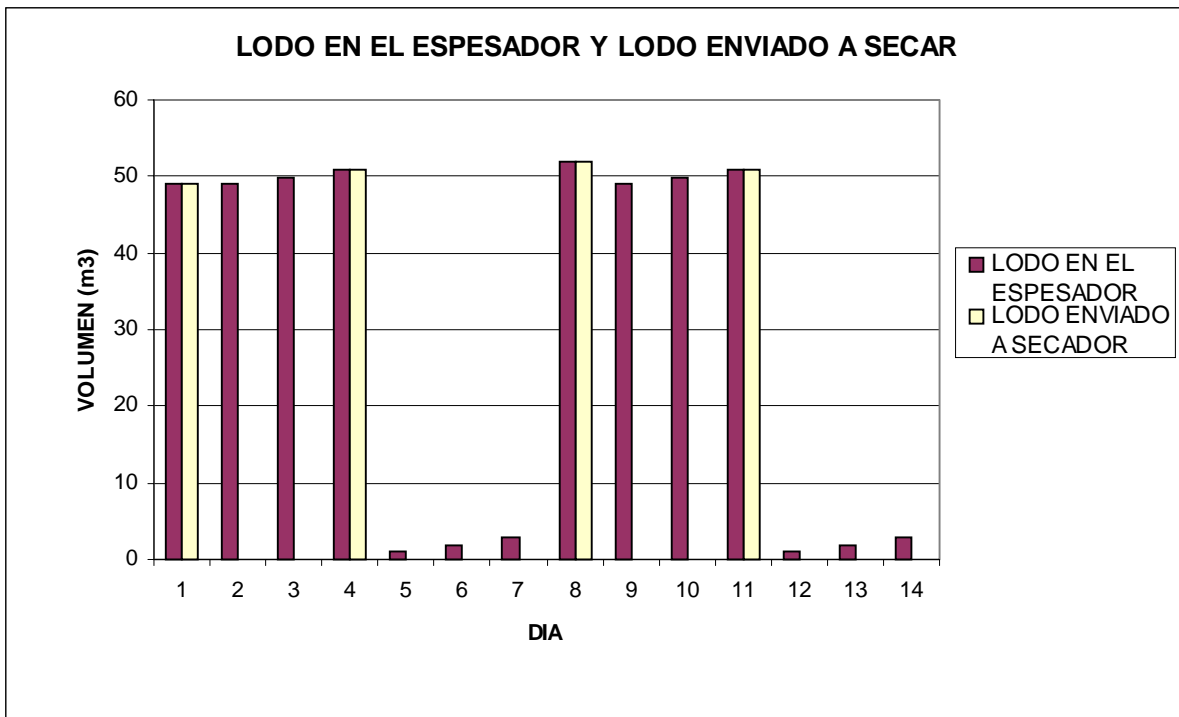
Gráfica 7. Agua de lavado que entra al tanque espesador.



Gráfica 8. Clarificado extraído del espesador.



Gráfica 9. Volumen máximo en el espesador.



Gráfica 10. Lodo espesado y lodo enviado a secar.

El remanente es la cantidad que se encuentra en el tanque desde el día anterior, por esta razón el remanente del primer día es cero, pues este es el día inicial.

El volumen que entra al tanque espesador es la cantidad de agua de lavado que recibe el tanque ese día, el promedio de agua de lavado para un tren de filtros (cuatro) es de 120 m^3 y para el decantador el volumen de agua de lavado es de 110.7 m^3 .

Para el primer día, el volumen total que entra es de $110.7 \text{ m}^3 + 120 \text{ m}^3$, con lo que se obtiene un total de 230.7 m^3 , este valor es diferente al valor máximo pues al los 110.7 m^3 de agua de lavado del decantador, ya se ha retirado 62.7 m^3 de clarificado antes de que entren los 120 m^3 de agua de lavado de los filtros.

El volumen que sale del espesador es el clarificado que se retira del mismo luego de haberse sedimentado el lodo. Para el decantador el volumen de clarificado promedio es de 62.7 m^3 y para los filtros el clarificado es de 119.04 m^3 .

El primer día se retiran del tanque espesador el clarificado de un tren de filtros y de un decantador, lo cual representa un volumen de 181.74 m³.

El volumen máximo es la mayor cantidad que permanece en el tanque (lodo y clarificado) durante un cierto tiempo ese día.

El primer día se lava primero el decantador 1, al retirarse el clarificado permanecen en el tanque los 48 m³ de lodo espesado, por tanto al lavar el tren de filtros se acumulan en el tanque el lodo mas los 120 m³ de agua de lavado del tren de filtros, por lo tanto el volumen máximo para ese día es de 168 m³.

El volumen total es el lodo que permanece en el tanque después de retirar todo el clarificado, y es el mismo que queda de remanente para el día siguiente menos el lodo enviado a las eras.

Como se puede ver en la tabla 11, el volumen máximo que se prevé para el tanque espesador, con base en los promedios estadísticos calculados es de:

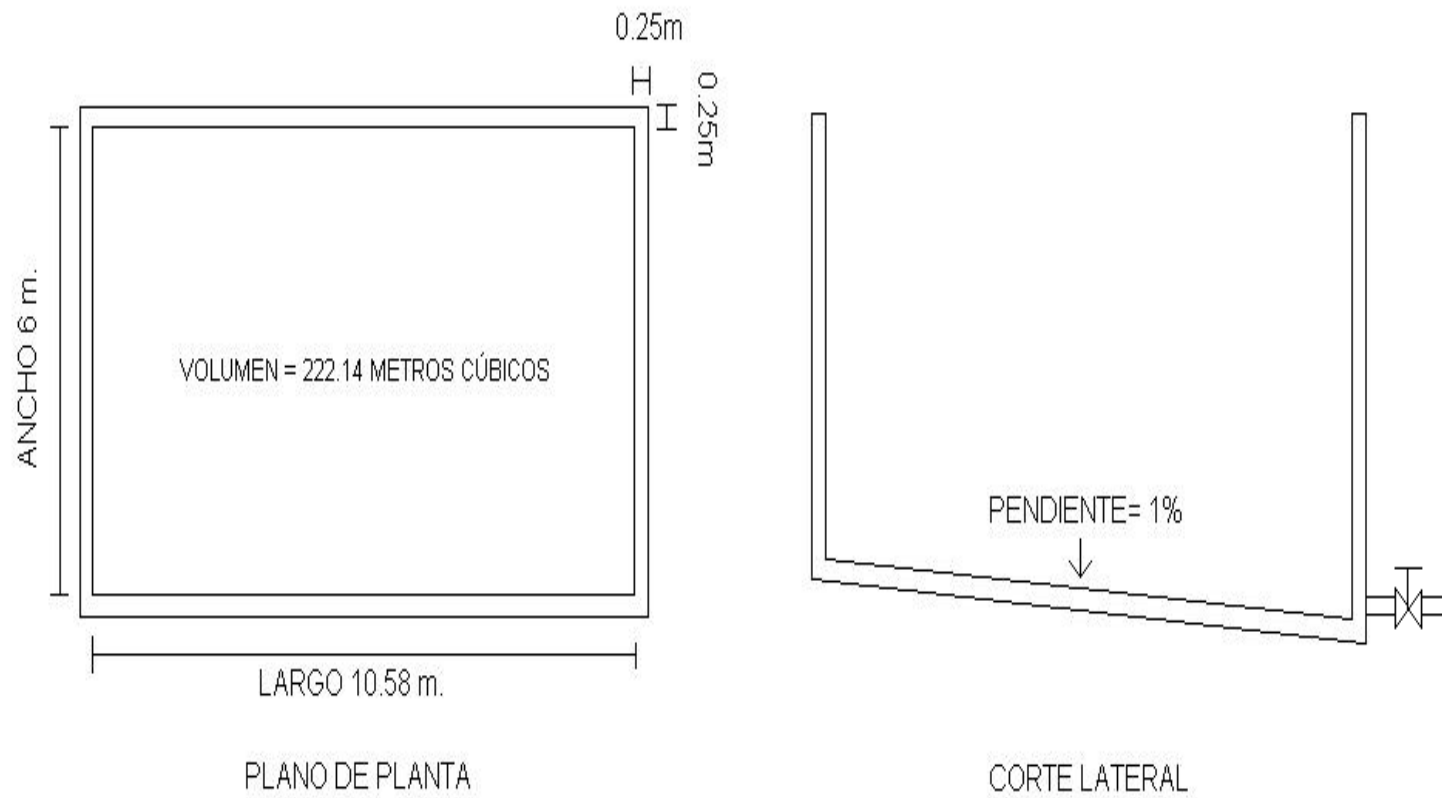
$$V_{\text{Máximo}} = 170.88 \text{ m}^3$$

Tomando un sobre diseño del 30 % (sugerido por el ingeniero civil Juan Bernardo Botero Botero), tenemos un volumen total para el tanque espesador de:

$$\text{Volumen total del espesador} = 170.88 * 1.30$$

$$\text{Volumen total del espesador} = 222.14 \text{ m}^3$$

TANQUE ESPESADOR DE LODOS



Gráfica 11. Tanque espesador de lodos.

8.2 ERAS DE SECADO DE ARENA Y GRAVA

8.2.1 Obtención del área. Utilizando los valores de sólidos sedimentables obtenidos a escala real y teniendo en cuenta el procedimiento como opera el tanque de sedimentación tenemos:

El volumen máximo de lodo a secar será el recogido en el tanque espesador desde el día 5 hasta el día 8 (ver Tabla 14), tiempo durante el cual se lavan dos veces el tren de filtros de la planta 1 (F1), dos veces el tren de filtros de la planta dos (F2), y una vez el decantador (D1), lo cual equivale a un volumen de 51.84 m³.

Para obtener el área total del lecho tenemos:

VOLUMEN DE LODO A SECAR	=	51.84 m³
ALTURA DEL LODO EN EL LECHO	=	30 cm.

Por lo tanto el área de las eras de secado será:

$$\text{Área} = 51.84 \text{ m}^3 / 0.30 \text{ m.} = \mathbf{172.8 \text{ m}^2}$$

8.2.2 Dimensionamiento. Para definir el largo y el ancho de las eras de secado no se tiene un criterio fijo, teniéndose más en cuenta la disposición del terreno para fijarlos, sin embargo de acuerdo al capítulo 9 pagina 295 del libro "Purificación del Agua", del Ingeniero Jairo Romero, de la escuela colombiana de ingeniería, se recomienda construir mínimo dos eras de secado.

La ingeniera civil Isabel Cristina Castaño sugirió que para un área total de 172.8 m² lo mas conveniente era construir 4 eras de secado de 9 m de largo y 4.8 m ancho, pues esto facilitará las labores de recolección del lodo seco. Con las dimensiones anteriores cada era tendrá 43.8 m² de área.

Las eras tendrán una profundidad de 1 m, de los cuales 10 cm. son para el tubo colector, sobre el cual se dispondrán 10 cm. de grava con un tamaño entre 3/8 de pulgada y 3/4 de pulgada, encima de estos se pondrán 10 cm. de grava de un tamaño entre 1/8 de pulgada y 3/8 de pulgada, para terminar con 30 cm. de arena de tamaño entre tamiz N° .00 y N° 4, quedando 40 cm. de los cuales se usarán 30 cm. para la el secado de lodos y 10 cm. de borde libre.

Para el drenaje se dispone en las eras un falso fondo con una pendiente del 1% con respecto al ancho y un tubo colector en el centro de la misma en tubería dren de 10 cm. (ver figura 10).

Los valores de la pendiente, tamaño de la tubería de drenaje y tamaños de la arena y la grava son recomendados en el libro purificación del agua (ver apéndice 1).

El lodo que entra a las eras será recibido una canaleta perforada desmontable, la cual evitará la erosión de la arena y ayudará a una distribución uniforme del lodo.

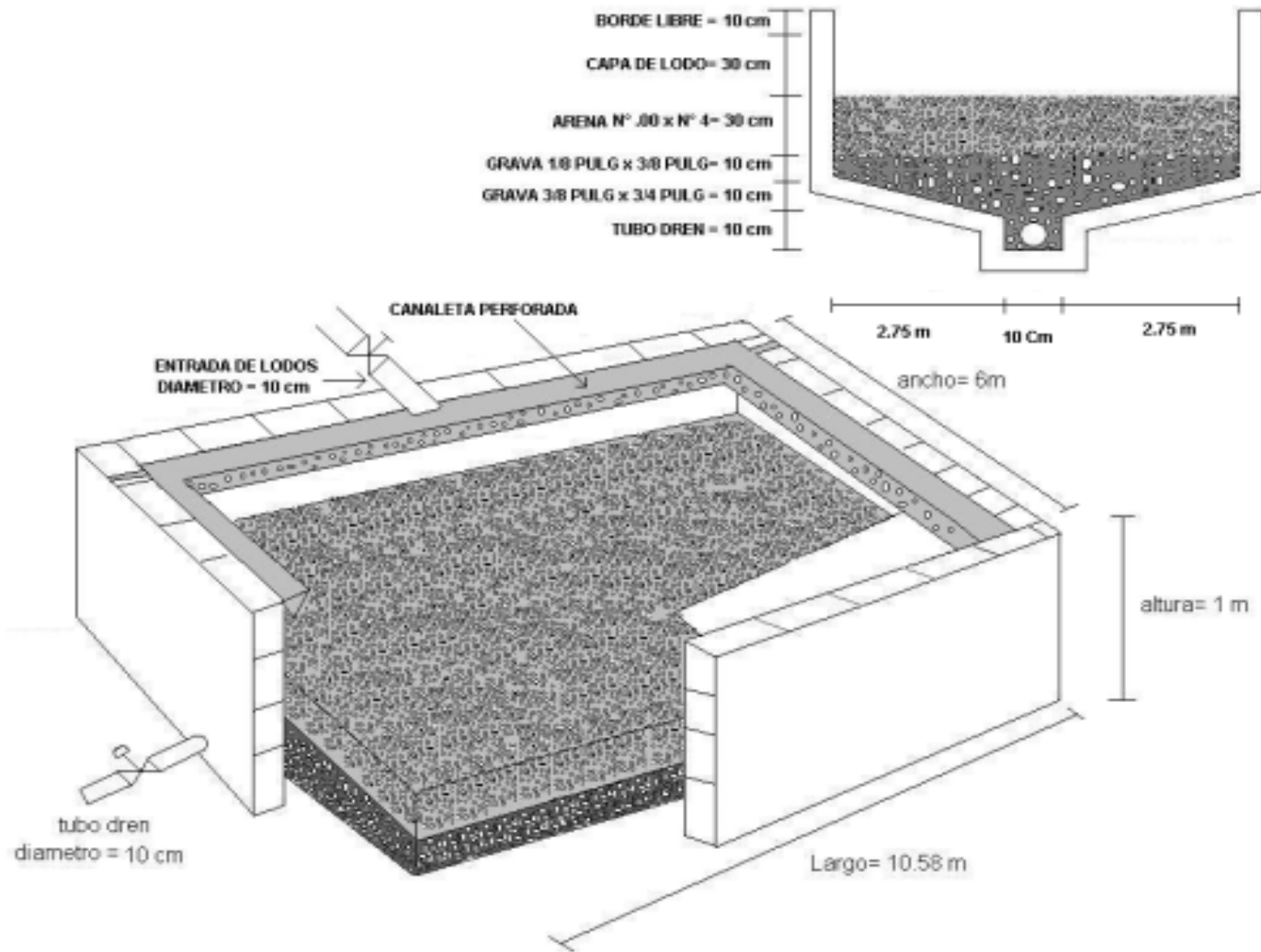
Los tiempos de secado será de 72 horas, tiempo durante el cual ya se ha alcanzado unos niveles de humedad que permiten su recolección con palas (ver Gráfica 5 y Tabla 13).

Los días en que se cargan y descargan las eras de secado pueden verse en la Tabla 14 y la Gráfica 10.

8.2.3 Materiales de construcción. Las paredes de las eras se construirán en ladrillo y llevarán un recubrimiento en cemento como impermeabilizante, la losa del piso de las mismas será en concreto impermeabilizado.

Para la canaleta de distribución de lodos se usan tubos en PVC de 25 cm. perforados y cortados a la mitad longitudinalmente.

ERAS DE SECADO DE ARENA Y GRAVA



Gráfica 12. Eras de secado de arena y grava.

8.3 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LAS AGUAS DE LAVADO POR MEDIO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD.

Tabla 15. Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales por espesado*

EQUIPO	SÓLIDO SUSPENDIDOS TOTALES (g / L)		
	AGUA DE LAVADO	CLARIFICADO	% DE REMOCIÓN
FILTROS	1.06	0.0192	98.18
DECANTADORES	35.71	0.0177	99.95

*Los datos de sólidos suspendidos totales para el agua de lavado y el clarificado se calcularon usando la fórmula (5) del Anexo J, usando los datos del anexo A.

El porcentaje de remoción se calculó mediante la fórmula (4) Anexo J.

9. CONCLUSIONES

- Si se implementa el sistema de espesamiento y tratamiento de lodos puede separarse y reutilizarse 98 % del agua de lavado de los filtros y más del 50% del agua de lavado de los decantadores.
- La sedimentación de los lodos del decantador es muy rápida y se alcanza casi totalmente en 2 horas.
- Los lodos de los filtros no sedimentan tan rápido, pero al mezclarse con los lodos del decantador la sedimentación se acelera.
- El agua clarificada que se obtiene posee cantidades mínimas de sólidos suspendidos totales (alrededor de 0.02 g / L).
- El porcentaje de sólidos en el agua de lavado fluctúa:

Entre 5 - 6 % de sólidos en el agua de lavado de los Decantadores.

Entre 0.08 y 0.10 % de sólidos en el agua de lavado de Filtros.
- El porcentaje de sólidos promedio en el lodo espesado es 35.73 % para el lodo secado por 24 h (mezcla lodos de los Decantadores y de los filtros).
- El porcentaje de sólidos de los lodos que se secaron durante 72 horas fue en promedio 43.56%.
- El cambio en el procedimiento de lavado de los decantadores significó una disminución en el agua de lavado de más de 90 m³ por decantador.
- Los promedios obtenidos a nivel piloto fueron muy similares a los obtenidos a escala real.
- Los lodos espesados que pasaron a las eras de secado de arena y grava piloto no capacidad de drenaje suficiente para atravesar la arena y producir precolación.

BIBLIOGRAFÍA

1. PENALVA R, Marco A, Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Agua.
Editorial ABES 1999.
2. METCALF Y EDDY, Ingeniería de las Aguas Residuales, Volumen 2.
Editorial Mc Graw Hill, Tercera edición 1995.
3. NEMEROW, Nelson L. Aguas Residuales Industriales Teorías, Aplicaciones y Tratamiento.
H. Blume ediciones. España 1977.
4. ROMERO. Jairo. Purificación del Agua .
Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999
5. HERNANDEZ, Muñoz. Depuración de Aguas Residuales colección Senior N° 9.
Editorial Parainfo 1992.
6. GERARD, Kiely. Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión Vol. 2.
Editorial Mc Graw Hill 1999.
7. RAMALHO. Tratamiento de las Aguas Residuales.
Barcelona Reverté 1991.

8. SAWYER, Clair. Chemistry for Environmental Engineering
Editorial Mc Graw Hill 1994.
9. VELASCO G, Mauricio. Tesis: Análisis y tratamiento de lodos Producidos en la
Planta de Aguas Residuales de Hilados y tejidos Única S.A.
10. GIRALDO, Gloria Inés, Manual de tratamiento de aguas
11. NOVAK, john. The Blinding of the Sludge During Filtration.
Revista Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 60 N° 2.
12. BLOWEN, P.T. Sludge Treatment, Utilization and Disposal.
Revista Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 62 N° 4.
13. VESILIIND, P. Aarne Capillary Suction Time as Fundamental Measure.
Revista Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 60 N° 2.
14. Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984
15. PHILLIP L. Thompson and WAYNE L. Paulson Dewaterability of alum and ferric
coagulation sludges
Revista Journal American Water Works Association Vol 90 Abril / 1998.
16. www.jrc.es
17. www.dep.state.pa.us
18. www.cfe.cornell.edu
19. www.gencat.es

ANEXO A

DATOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE LAVADO DE DECANTADORES Y FILTROS

Sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales del las aguas de lavado de filtros y decantadores, sólidos suspendidos totales de los clarificados.

Tabla 1. Caracterización del agua de lavado de decantadores DIA 1.*

PARÁMETRO	DECANTADOR 1	DECANTADOR 2
Sólidos sedimentables (mL/L):		
45 min.	225	235
1 hora.	200	210
Tiempo final: 4:12	175	170
Sólidos suspendidos totales (g/L)	16.585	22.68
Sólidos Totales (g/L):	17.854	19.802

*Los datos anteriores son de una muestra compuesta tomada cada 30 seg. en el descole a la quebrada Cimitarra, del agua mezclada del lavado de filtros y decantadores.

Para el clarificado del cono Imhoff se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

PARÁMETRO	CLARIFICADO DECANTADOR 1	CLARIFICADO DECANTADOR 2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.045	0.1025

Tabla 2. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 2.

PARÁMETRO	FILTRO 2 (PLANTA 2)	FILTRO 4 (PLANTA 2)
Tiempo de lavado (mm:ss)	05:50	08:00
Sólidos sedimentables (mL/L):		
1 hora.	16	17
Tiempo final: 3horas 51min.	16	22
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.185	0.602
Sólidos Totales (g / L)	0.302	0.717

Tabla 3. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 3

PARÁMETRO	FILTRO 2 (PLANTA 2)	FILTRO 4 (PLANTA 2)
Tiempo de lavado (mm:ss)	06:30	07:20
Sólidos sedimentables (mL / L):		
45 min.	12.5	16
1 hora.	13	16
Tiempo final: 4:30	12	15
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.565	0.559
Sólidos totales (g/L)	0.719	0.686

Para el clarificado del cono Imhoff se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado Filtro 2	Clarificado Filtro 4
Sólidos suspendidos Totales	0.043 g / L	0.044 g / L

Tabla 4. Caracterización del agua de lavado de Decantadores. DIA 4*

Parámetro	Decantador 1	Decantador 2
Tiempo de lavado (mm:ss)	25:58	22:49
Sólidos sedimentables (mL / L):		
45 min.	220	232
1 hora.	200	225
Tiempo final: 4:00	180	200
Sólidos suspendidos totales (g/L)	17.46	21.95
Sólidos totales (g/L)	18.694	19.819

*Para los decantadores la muestra fue compuesta tomando cada 30 seg. un volumen constante de agua de lavado en el descole a la quebrada cimitarra.

Para el clarificado del cono Imhoff se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado Decantador 1	Clarificado Decantador 2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.018	0.011

Tabla 5. Caracterización del agua de lavado de Decantadores. DIA 5*

Parámetro	Decantador 1	Decantador 2
Tiempo de lavado (mm:ss):	24:30	22:54
Sólidos sedimentables (mL/L):		
45 min.	200	225
1 hora.	190	210
1 hora: 42 min.	170	200.
3 horas: 10 min.	150	175
Tiempo final: 5 horas 58 min.	140	150
Sólidos suspendidos totales (g/L)	20.51	20.53

*Las muestras anteriores se recolectaron en el sitio de vertimiento a la quebrada Cimitarra, en dos canecas de 220 Litros de capacidad, tomando muestras de volumen constantes cada 30 seg. para cada Decantador, con el fin de recolectar lodos para el secador de arena.

Para el clarificado del cono Imhoff se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado Decantador 1	Clarificado Decantador 2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.043	0.0212

Tabla 6. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 6*

Parámetro	Filtro 1 (Planta. 2)	Filtro 2 (Planta 2)	Filtro 4 (Planta 2)
Tiempo de lavado (mm:ss)	05:08	06:27	06:08
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	9	16.5	17
1 hora.	8	16	15
3horas: 43 min.	7	12	10
Tiempo final: 5:36	7	11	9
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.765	1.024	1.430

*Las muestras anteriores se recolectaron en tres canecas de 220 Litros de capacidad, tomando muestras de volumen constante cada 10 seg. a la salida de cada filtro, con el fin de recolectar lodos para el secador de arena.

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales(g/L)	0.0151	0.012	0.009

Tabla 7. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 7

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	05:10	06:13	06:50
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	15	24	20
1 hora.	14	22	18
2 horas.	13	21.5	17.5
3 horas.	13	20.5	17
Tiempo final: 4horas 40 min.	12	19	16
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.780	1.081	0.901

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos Totales (g/L)	0.034	0.024	0.021

Tabla 8. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 8*

Parámetro	Decantador 1	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	19:30	05:06	05:20
Sólidos sedimentables (mL/L):			
1 hora.	150	4	8
2 horas.	180	5	7
Tiempo final: 4horas	120	5	5.5
Sólidos suspendidos totales (g/L)	15.45	0.889	0.675

*La muestra de la planta 1 la compone una mezcla de las aguas de lavado de filtros y decantadores, y se recolectó en la zona de vertido a la quebrada, las muestras de los filtros se tomaron a la salida de cada filtro.

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado D1	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos Totales (g/L)	0.010	0.0283	0.0236

Tabla 9. Caracterización del agua de Lavado de filtros. DIA 9

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:55	06:07	06:21
Sólidos sedimentables (mL/L):			
1 hora.	9.0	11	11.5
2 horas.	8.0	11	8.0
3 horas	8.0	10	7.5
Tiempo final: 4:00	7.5	10	6.0
Sólidos suspendidos Totales (g/L)	0.551	0.677	0.649

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.031	0.034	0.038

Tabla 10. Caracterización del agua de Lavado de filtros. DIA 10

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	05:00	05:38	06:00
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	16	27	22
1 hora	15	26	21
2 horas	13.5	23.5	18.5
3 horas	12	21.5	17
4 horas	11	20	14
5 horas	11	19	13.5
6 horas	10	18	12
7 horas	10	18	12
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.242	0.348	0.288

Las muestras de los filtros se tomaron a la salida de cada filtro.

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0117	0.0087	0.013

Tabla 11. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 11

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	05:10	05:20	05:30
Sólidos sedimentables (mL/L):			
1 hora	13	15	11
2 horas 16 min.	11	13.5	8
3 horas 28 min.	10.5	13	8
4 horas	11	13	8
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.564	0.581	0.651 L

Las muestras de los filtros se tomaron a la salida de cada filtro.

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0207	0.0206	0.0203

Tabla 12. . Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 12

Parámetro	Decantador 2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	---	04:50	05:00
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	360	4.5	2.5
1 hora.	340	6	3
2 horas.	300	6	3
3 horas	275	6	3
3 horas 49 min.	265	6	3
Sólidos suspendidos totales (g/L)	27.32	0.240	0.192

La muestra del decantador se tomó en la recámara 10 metros aguas abajo de las válvulas de purga y las muestras de los filtros se tomaron a la salida de los mismos.

Tabla 13 Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 13

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:40	05:20	05:30
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	20	24	23
1 hora.	19	22	21
2 horas.	16	19	18
3 horas	14	17	15
4 horas	13	16	14.5
5 horas	13	15.5	13.5
6 horas	13	15.5	13.5
7 horas	13	15	13
Sólidos suspendidos totales(g/L)	0.345	0.414	0.382

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.007	0.0048	0.0076

Las muestras de los filtros se tomaron a la salida de cada filtro.

Tabla 14. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 14

Parámetro	Filtro 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:40	05:30	05:40
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	12.0	13.0	12.0
1 hora.	11.0	12.0	11.0
2 horas.	8.0	8.5	10.0
3 horas	7.5	7.5	9.0
4 horas	7.0	7.0	9.0
5 horas	8.0	7.0	9.0
6 horas	8.0	6.5	8.5
7 horas	8.0	6.5	8.5
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.514	0.585	0.528

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F1.2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0108	0.0105	0.0100

Tabla 15. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 15

Parámetro	Decantador 1	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	17:08	04:45	04:50
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	780	3.5	0.4
1 hora.	705	4.0	0.8
2 horas.	620	3.5	1.2
3 horas	580	3.5	1.2
4 horas	550	4.5	1.8
5 horas	530	4.5	1.8
6 horas	510	4.5	1.9
Sólidos suspendidos totales (g/L)	54.7	0.552	0.218

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0195	0.00975

Tabla 16. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 16

Parámetro	Filtro 4.1	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:24	05:10
Sólidos sedimentables (mL/L):		
45 min.	0.5	7.0
1 hora.	0.6	6.3
2 horas.	1.4	5.0
3 horas	1.5	4.5
4 horas	1.7	4.5
5 horas	2.0	4.2
6 horas	2.0	4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.348	0.805

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F4.1	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0213	0.0175

Tabla 17. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 17

Parámetro	Decantador 1	Filtro 4.1	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	18:50	05:22	06:15
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	910	0.8	78
1 hora.	890	1.2	67
2 horas.	800	1.25	58
3 horas	745	1.5	50
4 horas	700	1.5	46
5 horas	680	1.5	44
6 horas	650	1.5	44
Sólidos suspendidos totales (g/L)	75.54	0.416	0.952

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F4.1	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0198	0.0063

Tabla 18. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 18

Parámetro	Filtro 4.1	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:10	05:45
Sólidos sedimentables (mL/L):		
45 min.	14	1.6
1 hora.	13	1.8
2 horas.	11	2.5
3 horas	10	3.0
4 horas	9	3.0
5 horas	9	3.5
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.138	0.358

Tabla 19. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 19

Parámetro	Decantador 1	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	19:00	05:42	06:00
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	945	8.5	9
1 hora.	920	8.0	9
2 horas.	680	7.5	8
3 horas	570	7.0	8
4 horas	525	7.0	8
5 horas	495	7.0	8
6 horas	468	7.0	8
Sólidos suspendidos totales (g/L)	59.91	0.811	0.952

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado D 2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0213	0.021	0.028

Tabla 20. Caracterización del agua de lavado de filtros. DIA 20

Parámetro	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	04:55	05:40
Sólidos sedimentables (mL/L):		
45 min.	35	45
1 hora.	30	40
2 horas.	25	35
3 horas	21	29
4 horas	21	28.5
5 horas	20	28
6 horas	20	28
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.506	0.598

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0124	0.0122

Tabla 21. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 21

Parámetro	Decantador 1	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	-----	05:37	06:50
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	140	8.0	10
1 hora.	120	8.0	11
2 horas	115	8.0	11
3 horas	110	8.0	10
4 horas	105	8.0	10
5 horas	100	8.5	10.5
6 horas	100	8.5	10.5
7 horas	100	8.5	10.5
Sólidos suspendidos totales (g/L)	13.305	1.005	0.976

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado D 2	Clarificado F2.2	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0138	0.019	0.0178

Tabla 22. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 22

Parámetro	Decantador 2	Filtro 2.1	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	----	06:00	06:30
Sólidos sedimentables (mL/L):			
1 hora.	700	19	19
2 horas.	600	18	17
3 horas	550	18	16
4 horas	510	18	16
5 horas	470	18	16
Sólidos suspendidos totales (g/L)	47.715	1.029	1.261

Para el clarificado de las canecas se tuvo el siguiente valor de sólidos suspendidos:

Parámetro	Clarificado D 2	Clarificado F2.1	Clarificado F4.2
Sólidos suspendidos totales (g/L)	0.0022	0.0252	0.0268

Tabla 23. Caracterización del agua de lavado de filtros y Decantadores. DIA 23

Parámetro	Decantador 2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
Tiempo de lavado (mm:ss)	15:30	06:15	07:30
Sólidos sedimentables (mL/L):			
45 min.	330	10.5	7.0
1 hora.	310	10.5	7.0
2 horas.	275	10	7.0
3 horas	250	10	7.0
4 horas	230	10	7.5
5 horas	225	10	7.5
6 horas	220	10	7.5
Sólidos suspendidos totales (g/L)	33.675	0.560	0.392

A menos que se indique lo contrario en la tabla, las muestras de filtros fueron tomadas a la salida de cada filtro.

ANEXO B

DATOS DE LOS LODOS RECOGIDOS EN LAS CANECAS Y CANTIDAD DE ESPESADO DESPUÉS DE 6 HORAS

Datos de los lodos recogidos en las canecas y cantidad de espesado después de 6 horas.

Tabla 1. Lodos recogidos a nivel piloto y volumen de espesado después de 6 horas para el decantador 1 y los filtros 1, 2 y 4 de la planta 2.

DIA	D 1 (L)		F 1.2 (L)		F 2.2		F 4.2 (L)	
	Muestra recogida	Espe-sado	Muestra recogida	Espe-sado	Muestra recogida	Espe-sado	Muestra recogida	Espe-sado
8	220	26.4	----	----	200	1.1	198	1.08
9	---	---	196	2.6	220	2.92	220	2.41
10	---	---	220	2.8	220	3.2	220	3.0
11	---	---	195	1.85	216	1.8	220	1.84
12	220	42.8	---	---	164	0.82	180	0.78
13	---	---	198	3.45	220	4.01	220	4.05
14	---	---	188	1.6	220	2.2	220	2.4
15	141.6	65.07	---	---	220	2.1	220	0.75
16					----	----	220	10.5
17					----	----	220	1.8
18					220	3.5	220	4.0
19					220	4.4	220	4.2
20					220	1.87	220	2.31
21					220	3.1	220	2.9
22					220	2.2	220	1.65

Tabla 2. Lodos recogidos a nivel piloto y volumen de espesado después de 6 horas para el decantador 2 y el filtros 4 de la planta 1.

DIA	PLANTA 2 (L)		FILTRO 4 Planta 1 (L)	
	Muestra recogida	ESPE- sado	Muestra recogida	Espe- sado
16	220	105.31	190.2	3.00
17	----	-----	192.7	0.95
18	220	61.6	-----	----
19	----	-----	----	----
20	220	22.3	-----	-----
21	220	83.4	----	----
22	200	45.4	----	----

Los datos de espesado anteriores tienen una variación alta de un día al otro debido a que la quebrada Manizales de donde se surte de agua el acueducto puede aumentar o disminuir en un intervalo corto de tiempo (10 a 20 min.) la turbiedad y por ende los sólidos suspendidos totales, hasta en un 900%, esta variación puede darse varias veces durante un día y al día siguiente no presentarse ni una sola vez, esto provoca que la cantidad de lodos en los filtros y decantadores sea variable.

ANEXO C

CAUDALES MEDIDOS EN EL VERTEDERO

Tabla 1: Caudales medidos en el vertedero para los filtros 1, 2 y 4 de la planta 2.

DIA	Parámetro	F 1.2	Filtro 2.2	Filtro 4.2
15	Tiempo lavado (mm:ss)	04:40	05:30	05:40
	Caudal promedio (L/seg.)	105.19	111.94	93.97
	Volumen Promedio (m ³)	29.453	36.940	31.949
16	Tiempo lavado (mm:ss)	----	----	04:57
	Caudal promedio (L/seg.)	----	----	90.21
	Volumen Promedio (m ³)	----	----	27.965
17	Tiempo lavado (mm:ss)	----	05:37	----
	Caudal promedio (L/seg.)	----	94.98	----
	Volumen Promedio (m ³)	----	32.01	----
18	Tiempo lavado (mm:ss)	05:00	04:10	05:45
	Caudal promedio (L/seg.)	82.67	95.63	97.35
	Volumen Promedio (m ³)	24.801	23.907	33.585
19	Tiempo lavado (mm:ss)	----	05:42	06:00
	Caudal promedio (L/seg.)	----	124.90	97.35
	Volumen Promedio (m ³)	----	42.717	35.044

Los caudales anteriores se midieron con un vertedero rectangular de una sola abertura, el cual se instaló en la canaleta de conducción de lodos a aproximadamente 5 m aguas debajo de la salida del decantador 2 (Ver Gráfica 1)

DIA 15. Caudales medidos para los filtros 1, 2 y 4 de la planta 2.

F 1.2 (L/seg.)	F 2.2 (L/seg.)	F 4.2 (L/seg.)
81.43	118.85	91.43
101.63	111.94	94.81
118.85	108.49	94.81
118.85	108.49	94.81
Caudal máximo (L/seg.):	$Q_{\text{máximo}}$	= 118.85
Caudal promedio (L/seg.):	Q_p	= 97.35
Volumen promedio (L):	V_p	= 35044.29

DIA 16. Caudales medidos para el filtro 4 de la Planta 2.

F 4.2 (L/seg.)		
80.79		
87.48		
94.26		
94.26		
94.26		
Caudal máximo (L/seg.):	$Q_{\text{máximo}}$	= 94.26
Caudal promedio (L/seg.):	Q_p	= 90.21
Volumen promedio (L):	V_p	= 27965.1

DIA 17. Caudales medidos para el Decantador de 2.

Decantador 2 (L/seg.)	F2.2 (L/seg.)
97.34	97.34
107.68	97.34
107.68	97.64
107.68	93.92
109.41	93.92
111.13	93.92
116.31	93.92
118.04	93.92
118.04	93.92
118.04	93.92
118.04	93.92
118.04	

Caudal máximo D1 (L/seg.):	$Q_{\text{máximo}} =$	118.04
Caudal promedio D1 (L/seg.):	$Q_p =$	112.29
Volumen promedio D1 (L):	$V_p =$	126882.99
Caudal máximo F2.2 (L/seg.):	$Q_{\text{máximo}} =$	97.34
Caudal promedio F2.2 (L/seg.):	$Q_p =$	94.98
Volumen promedio F2.2 (L):	$V_p =$	320069.12

DIA 18. Caudales medidos para los Filtros de la Planta 2.

F 1.2 (L/seg.)	F 2.2 (L/seg.)	F 4.2 (L/seg.)
70.44	97.35	97.35.
73.72	93.91	97.35
80.36	97.35	97.35
90.50	93.91	97.35
90.50	97.35	97.35
90.50	93.91	97.35

	F 1.2	F 2.2	F 4.2
Caudal máximo (L/seg.):	90.50	97.35	97.35
Caudal promedio (L/seg.):	82.67	95.63	97.35
Volumen promedio (L):	24801	23907.5	33585.75.

DIA 19. Caudales medidos para el Decantador de 2 y filtros 2 y 4 de la planta 2. *

Decantador 2 (L/seg.)	F 2.2 (L/seg.)	F 4.2 (L/seg.)
131.78	135.18	97.35
131.78	128.36	97.35
128.36	121.48	97.35
124.93	114.59	97.35
123.21		
123.21		
121.48		
121.48		
123.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		
121.48		

(*) Los valores de caudal para el filtro 2 de la planta 2 son muy altos debido a que el decantador se encontraba desaguando y este caudal se suma al del lavado de los filtros antes de pasar por el vertedero.

	D 2	F 2.2	F 4.2
Caudal máximo (L/seg.):	131.78	135.18	97.35
Caudal promedio (L/seg.):	123.74	124.9	97.35
Volumen promedio (L):	141060.75	42716.66	35044.29

ANEXO D

DATOS DE SECADO

La humedad inicial es la del lodo mezclado de filtros y decantadores, espesado por 3 días o más. Solo el ensayo 1 se seco por separado.

Humedad expresada como kilogramos de agua / kilogramo de lodo espesado.

ENSAYO 1

	DECANTADOR 1	DECANTADOR 2
Tiempo inicial:	73.48	72.50
24 horas:	57.91	56.28
36 horas:	54.79	53.21

ENSAYO 2

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	25.88	74.12
24 horas:	40.25	59.75
36 horas:	50.34	49.66

ENSAYO 3

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	10.81	89.19
24 horas:	34.86	65.69
36 horas:	42.87	57.13

ENSAYO 4

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	19.90	80.10
24 horas:	34.86	65.14
48 horas:	43.90	56.10
72 horas:	45.63	54.37

ENSAYO 5

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	15.50	84.50
48 horas:	40.52	59.48
72 horas:	41.78	58.22

ENSAYO 6

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	18.98	81.02
24 horas:	37.20	62.80
H 48 horas:	40.60	59.40

ENSAYO 7

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	16.51	83.49
24 horas:	36.63	63.37
48 horas:	41.03	58.97
72 horas:	43.20	56.80

ENSAYO 8

	% de Sólidos	% de Humedad
Tiempo inicial:	18.92	81.08
24 horas:	40.78	59.22
48 horas:	43.32	56.68
72 horas:	45.05	54.95

ANEXO E

NUEVO PROCEDIMIENTO DE LAVADO DE DECANTADORES:

1. Tomar la medida de la altura de los vástagos de las válvulas V1 Y V2 de alimentación de los dos Decantadores (Ver Gráfica 1).
2. Suspender los filtros del Decantador 1.
3. Cerrar la válvula V3 de descole a la quebrada Cimitarra.
4. Abrir totalmente la válvula V2 de alimentación del Decantador 2.
5. Cerrar inmediatamente la válvula V1 de alimentación del Decantador 1 por completo.
6. Si hay derrame en el cono, cerrar la válvula V6 de entrada a este hasta que no halla derrame.
7. Abrir 12 vueltas la válvula V5 de fondos del Decantador 1*.
8. Cuando el nivel en el Decantador desciende hasta la mitad de la altura de la viga que sostiene los tubos colectores (Aproximadamente 5:30 min.), cerrar la válvula V5 de fondos, y abrir la válvula V7 de los lodos por 20 seg.
9. Después de cerrar la válvula V7 de los lodos abra completamente la válvula V1 de alimentación del Decantador 1 y cierre la válvula V2 de alimentación al Decantador 2 y repita el proceso desde el numeral 6, pero con el otro Decantador.

10. Al finalizar ponga de nuevo las válvulas V1 y V2 de alimentación en la posición que se encontraban al iniciar el lavado.

* Las doce vueltas a la válvula V5 de fondos mencionado en el numeral 7 es un procedimiento que se efectúa por parte de los operarios para asegurar que el descenso del nivel dé el tiempo suficiente para lavar los colectores.

La diferencia de este procedimiento con relación al anterior reside en que en este nuevo método de lavado se cierran las válvulas de entrada de agua cruda al decantador que se está lavando, con lo cual se reducen el tiempo necesario para que el nivel del agua llegue hasta la altura necesaria para permitir el lavado de los colectores del decantador, lo cual hace que la cantidad de agua de lavado sea considerablemente menor.

ANEXO F

ENSAYOS A ESCALA REAL

Ensayo 1

Decantador 1:

Descenso de nivel del decantador:	0.80 m
Tiempo de lavado (mm:ss)	20:34
Número de vueltas a la válvula:	13
Volumen de agua de lavado en el tanque:	220 m ³

Lodo sedimentado a 24 h: **55 m³**

Ensayo 2

Decantador 1:

Descenso de nivel del decantador:	0.708 m
Tiempo de lavado (mm:ss)	10:54
Número de vueltas a la válvula:	13
Volumen de agua de lavado en el tanque:	110 m ³

Decantador 2:

Descenso de nivel del decantador:	0.636 m
Tiempo de lavado (mm:ss)	13:50
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	95 m ³

Lodo sedimentado a 24 h (2 decantadores): **105 m³**

Ensayo 3

Decantador 1:

Descenso de nivel del decantador:	0.49 m
Tiempo de lavado (mm:ss)	7:00
Número de vueltas a la válvula:	13
Volumen de agua de lavado en el tanque:	80 m ³

Decantador 2:

Descenso de nivel del decantador:	0.455 m
Tiempo de lavado (mm:ss)	7:30
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	90 m ³

Lodo sedimentado a 24 h (2 decantadores): 113 m³

Ensayo 4

Tiempo de lavado (2 decantadores)	19:48
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen recogido (2 decantadores)	170 m ³

Lodo sedimentado a 24 h (2 decantadores): 98 m³

Ensayo 5

Decantador 1:

Tiempo de lavado (mm:ss)	10:20
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	72 m ³

Decantador 2:

Tiempo de lavado (mm:ss)	10:30
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	95 m ³

Lodo sedimentado a 36 h (2 decantadores): 60 m³

Ensayo 6

Decantador 1:

Tiempo de lavado (mm:ss)	9:03
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	90 m ³

Decantador 2:

Tiempo de lavado (mm:ss)	10:04
Número de vueltas a la válvula:	12
Volumen de agua de lavado en el tanque:	85 m ³

Lodo sedimentado a 24 h (2 decantadores): 90 m³

Ensayo 7

Tren de filtros planta 1:

Tiempo de lavado (minutos).	20
Volumen de agua de lavado en el tanque (m ³):	122

Tren de filtros planta 2:

Tiempo de lavado (minutos):	20
Volumen de agua de lavado en el tanque (m ³):	123

Ensayo 8

Tren de filtros planta 1:

Tiempo de lavado (minutos).	20
Volumen de agua de lavado en el tanque (m ³):	119

Tren de filtros planta 2:

Tiempo de lavado (minutos):	20
Volumen de agua de lavado en el tanque (m ³):	116

ANEXO G

PROCEDIMIENTOS ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES SÓLIDOS SEDIMENTABLES Y HUMEDAD

A continuación se presentan los procedimientos de laboratorio que se siguieron para el procesamiento de las muestras del lavado de filtros y decantadores.

1. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS

Muestreo y almacenamiento:

El análisis se debe hacer lo más pronto posible, pues estas muestras no se pueden preservar; se deben excluir las partículas flotantes o el material no homogéneo.

En caso de no poder hacer el análisis inmediatamente, almacene las muestras a 4°C, para reducir al mínimo la descomposición microbiana.

Recolecte las muestras en botellas de vidrio resistente o material plástico, para impedir que las muestras se adhieran a la pared.

Si las muestras contienen Hierro o Manganeso, debe analizarla rápidamente para minimizar los posibles cambios físicos o químicos durante el almacenamiento.

Materiales y Equipo:

Placas de evaporación.

Estufa.

Mufla.

Balanza analítica.

Embudo de filtración para discos de fibra de vidrio.

Bomba de vacío.

Cápsulas de porcelana de 100 mL.

Crisol de Gooch o disco de fibra de vidrio tipo Gelman A/E o equivalente, con diámetro de 4 cm.

Probetas graduadas de 100 mL.

Pipetas.

Cono Imhoff

Sólidos suspendidos Totales:

Método de filtración en disco de fibra de vidrio:

Interferencias:

Se debe eliminar de la muestra las partículas gruesas flotables o los aglomerados sumergibles de materiales no homogéneos, si se decide que su inclusión no es deseable en el resultado final.

Procedimiento:

Inserte el disco con la cara rugosa hacia arriba en el embudo de filtración, conecte el vacío y lave el filtro con 20 mL. de agua destilada.

Continúe la succión hasta eliminar totalmente los residuos de agua.

Seque el filtro en la estufa a 103°C durante una hora. Si va a medir sólidos volátiles calcine en la mufla a 500°C ± 50°C durante 20 minutos, enfríe en el desecador y pese.

Mida 100 mL de muestra o un volumen que proporcione entre 2.5 y 200 mg. de residuo.

Inserte el filtro en el embudo de filtración, conecte el vacío e inicie la succión.

Filtre la muestra previamente agitada a través del filtro de fibra de vidrio.

Lave con 3 porciones de 10 mL de agua destilada, continúe la succión por cerca de 3 minutos. Seque el filtro en la estufa a 103°C - 105°C durante una hora, enfríe en el desecador y pese.

Repita el ciclo de secado hasta peso constante.

Cálculos:

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales (mg / L)} = \frac{(B-A) \times 1000}{\text{mL de muestra filtrada}}$$

A: Peso del filtro vacío.

B: Peso del filtro mas el residuo seco en mg.

Sólidos Totales 103°C - 105°C:

Procedimiento:

Caliente una cápsula de porcelana en la mufla a 550°C durante 1 hora, enfríe y pese.

Transfiera 100 mL de la muestra o el volumen adecuado a la cápsula pesada (El volumen de muestra está en relación con la cantidad de sólidos que contiene la muestra, elija un volumen de muestra que proporcione un residuo entre 2.5 y 200 mg), y evapore en una placa caliente, después lleve la cápsula con el agua evaporada a una estufa a 103°C - 105°C durante 1 hora, enfríe la cápsula en el desecador y pese, repita la operación hasta peso constante.

Cálculos:

$$\text{Sólidos Totales (mg/L)} = \frac{(B-A) \times 100}{\text{mL de muestra}}$$

A: Peso de la cápsula vacía en mg.

B: Peso de la cápsula más el residuo en mg.

Sólidos Sedimentables:

Los muestreos deben recolectarse en recipientes de vidrio resistente o recipientes plásticos que minimicen las adherencias de partículas a las paredes. El análisis debe efectuarse lo más pronto posible después de tomada la muestra, para evitar cambios físicos o químicos por el almacenamiento, el máximo tiempo de almacenamiento es de 24 horas.

Procedimiento:

Agite la muestra y vierta un litro de esta en el cono Imhoff.

Deje sedimentar por 45 minutos.

Agite suavemente el líquido contenido en el cono con un agitador, o mediante rotación del cono, para que se desprendan y sedimenten los sólidos de la pared del cono.

Reporte: Se expresan los resultados como:
Sólidos sedimentables (mL / L /1 hora).

ANEXO H

COSTOS

Tanque espesador:

Características:

Volumen total del tanque: 222.14 m³.

Área: 63.47 m².

Profundidad: 3.5 m.

Largo: 10.58 m.

Ancho: 6 m.

Espesor de pared: 0.25 m.

Tabla 1. Costos del tanque espesador en concreto.

ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
CONCRETO PLACA PISO*	m ³	12.70	203.414	2'583.358
CONCRETO MUROS	m ³	28.14	330.000	9'286.200
HIERRO *	Kg.	7.500	2.200	16'500.000
EXCAVACIÓN *	m ³	223	9.380	2'091.740
ESTUDIO DE SUELO**				450.000
TOTAL				30'911.298

*Valores cotizados por el ingeniero civil Jorge Hernán Cuervo Agudelo.

Tabla 2. Costos del tanque espesador en geomembrana*.

ÍTEM	VALOR
EXCAVACIÓN*	2'091.740
ESTUDIO DE SUELO*	450.000
GEOMEMBRANA	2'000.000
TOTAL	4'541.740

* La excavación y el estudio de suelo fueron cotizados por el ingeniero civil Jorge Hernán Cuervo Agudelo y la geomembrana por Roberto Salazar y Cia. para geomembrana de 0.75 mm., el valor incluye los costos de instalación.

Eras de secado de arena y grava

Características:

Número de eras de secado:	4
Área de cada era:	43.2 m ² .
Largo de cada era:	9 m.
Ancho de cada era:	4.8 m.
Profundidad:	1 m.

Tabla 3. Costos de las cuatro eras de secado*

ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
MURO EN LADRILLO	m ²	110.4	17.433,2	1'925.729
TUBO DREN 100 MM.	m	36	16938	609.768
COLOCACIÓN GRAVA	m ³	9	40.500	364.500
COLOCACIÓN ARENA	m ³	54	38.600	2'084.400
CONCRETO LOSA PISO	m ³	17.38	203.414	3'535.335
TOTAL				8' 519.732

*Valores cotizados por el ingeniero civil Jorge Hernán Cuervo Agudelo.

ANEXO I

FORMULAS

$$Q = \frac{\sum \bar{Q}_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal promedio total

\bar{Q}_i = caudal promedio del muestreo i.

n = número de muestreos

El tiempo de lavado promedio se define como:

$$t = \frac{\sum t_i}{n} \quad (2)$$

Donde:

t = tiempo de lavado promedio.

t_i = tiempo de lavado para el muestreo i.

El volumen del tanque de espesado por gravedad estará dado por la fórmula:

$$V = Q * t \quad (3)$$

Donde:

V = Volumen.

Q = Caudal promedio total.

t = Tiempo de lavado promedio.

$$\% \text{ de remoción} = 100 - \frac{SST_{FINALES} * 100}{SST_{INICIALES}} \quad (4)$$

Media Aritmética:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética

X_i = valor del dato i ésimo.

n = número de datos.

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{Scx}{n}} \quad (6)$$

Donde:

σ = desviación estándar.

X_i = valor del i ésimo dato.

\bar{x} = media aritmética.

n = número de datos.

Scx = sumatoria de los cuadrados de los datos.

Coefficiente de variación:

$$C.V. = (\sigma / \bar{x}) * 100\% \quad (7)$$