



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO PARA EL  
AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA  
“VISTA BELLA” DE MORELIA**

**TESIS presentada por:**

**I.Q. ALDO ZÚÑIGA JIMÉNEZ**

**Como requisito para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**EN**

**INGENIERÍA QUÍMICA**

**Asesor: Dr. EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL JOSÉ APOLINAR  
CORTÉS**

**Co-asesora: Dra. En Biotecnología María del Carmen Chávez Parga**

**Morelia, Michoacán**

**Mayo 2015**



# RESUMEN

## DISEÑO DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO PARA EL AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA “VISTA BELLA” DE MORELIA

Presenta: Aldo Zúñiga Jiménez, Mayo 2015

Dirigido por: Dr. José Apolinar Cortés

Co-asesorado por: Dra. María del Carmen Chávez Parga

La planta potabilizadora “Vista Bella” de la ciudad de Morelia, descarga su agua residual al río “chiquito”, cuyo destino final es el lago de Cuitzeo, causando problemáticas de contaminación en estos cuerpos de agua. En el presente trabajo de investigación, se diseñó un proceso para tratar dicho efluente.

Los resultados de la caracterización, también indicaron que los procesos de separación factibles eran la sedimentación, centrifugación y filtración de torta, por esta razón, se evaluaron en el laboratorio y a escala piloto dichos procesos, encontrando parámetros como capacidad de remoción, humedad del lodo resultante, eficiencia y tamaño del equipo con la capacidad necesaria para tratar el flujo de la planta.

La mejor opción es la centrifugación, ya que en promedio presenta remociones superiores al 95%, humedad de los lodos del orden de 60%, eficiencias superiores al 90% y requiere la menor área en comparación con los otros procesos de separación. Se diseñó el decantador centrífugo a utilizar en la planta potabilizadora, el cual genera condiciones para poder aprovechar el agua recuperada, los sólidos separados y evita que se siga vertiendo el agua residual al río Chiquito de Morelia.

**Palabras Clave:** Diseño, proceso, tratamiento, agua, residual, centrifugación

# **ABSTRACT**

## **DESIGN OF A WASTEWATER TREATMENT PROCESS FOR THE WATER PURIFICATION PLANT “VISTA BELLA” IN MORELIA**

In this work, a process is designed to treat the wastewater of the purification plant “Vista Bella” in Morelia city. This effluent is discharged into the “Chiquito” river, which eventually flows into the lake “Cuitzeo”, resulting in pollution problems of these water bodies.

According to the characterization performed in said water, it was found that it contains clay halloysite 7A, from “Cointzio” dam, the properties this clay has, as a result of the addition of the chemical substances added during the purification treatment, make it suitable to generate value-added products. Since there is not organic matter to degrade in this water, no further chemical or biological processes are required. The clay and water are separated using only a mechanical process. As a result of the characterization, it is concluded too that the possible separation processes to achieve the clay removal are sedimentation, centrifugation and cake filtration. Therefore, these processes were carried out on laboratory and pilot plant scale, finding parameters as removal ability, humidity of resulting slurry, efficiency and size of the equipment required for the plant capacity.

Centrifugation was found to be the best option, since it has in average removal over 95%, humidity of resulting slurry about 60%, efficiencies greater than 90% and it requires the smallest area compared to other separation processes. A decanter centrifuge was designed, this equipment enables the use of the recovered water and the solid residue, as well as preventing the sludge discharge into the “Chiquito” river in Morelia.

Key words: Design, process, treatment, wastewater, centrifugation

ESTE TRABAJO LO DEDICO A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE TUVIERON QUE TRABAJAR Y ESTUDIAR PARA SALIR ADELANTE, PERO SOBRE TODO A AQUELLAS PERSONAS QUE POR CIRCUNSTANCIAS DE LA VIDA Y CUESTIONES AJENAS A SU VOLUNTAD, NO PUDIERON ESTUDIAR, YA SEA LA PRIMARIA, SECUNDARIA, PREPARATORIA, LICENCIATURA, MAESTRÍA Ó DOCTORADO, AÚN CUANDO CONTABAN CON LA CAPACIDAD SUFICIENTE.

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de existir, de darme la familia que tengo, por poner en mi camino a gente tan maravillosa, por todas las cosas buenas con las que cuento y por todos los retos que me ha puesto, ya que estos me han ayudado a crecer en todos los aspectos.

Agradezco a mi papa One(), por querernos, por darnos ejemplo de trabajo y honestidad, a mi tía bel() por los momentos de felicidad que compartió con todos nosotros, a mi tío Manolo(), porque aún sin ser familia de sangre siempre nos apoyó y nos enseñó que la discapacidad se tiene en la mente, agradezco también todos los momentos que en mi infancia pasé con el y con su yegua “tuza”, que en paz descansen todos.

A mis padres Benito y Fatil, gracias por su incesante e incondicional apoyo en todo, por su ejemplo y sus consejos, por enseñarme que con disciplina y trabajo se puede salir adelante. A mis hermanos Ray, Alan y Tita, gracias por todo su apoyo.

A mi tío One y mis tías Gior, Nena, Rafa, Muty, gracias por el apoyo que siempre nos han dado, en especial a mi tía Faby, que sin ella nada de esto hubiera sido posible, no tengo palabras suficientes de agradecimiento para ustedes por todo lo que hemos vivido juntos.

A mis primos Clemen, Faby, Lucero, Chuy, Ana, Pablo, Nando, Vane, Britney, Camila y Paula, gracias por su apoyo y todos los momentos que hemos pasado juntos.

A mis sobrinos Dulce, Chito, Majo, Sofy, Alancito y Vale, por hacernos más felices y darnos motivos para salir adelante.

A las personas que forman parte de mi familia aunque no llevemos la misma sangre, Chucha, Don Trino, Jesús, Ambrosio, Esbeidy, Angélica, Rosa, gracias por todo.

A mis amigos del 3ºD, gracias por permitirme vivir la etapa más bonita de mi vida, aunque no ponga su nombre, ya saben que me se el de todos con apellidos y número de lista.

A mi novia Adri, gracias por todo el amor y apoyo que me has dado, en especial por tu comprensión, ya que sacrifiqué mucho tiempo contigo para realizar este proyecto.

A todos mis amigos de Pátzcuaro, Paramuén y a mis amigos que conocí en la Universidad, que no menciono su nombre por falta de espacio, pero que han sido muy importantes en mi vida y me han enseñado muchas cosas que me han ayudado a salir adelante, gracias por todos los buenos momentos vividos.

“Hay maestros buenos, los que enseñan; hay maestros muy buenos, los que educan; pero hay maestros superiores, los que inspiran”, gracias a los maestros que a lo largo de mi trayectoria académica me han inspirado para seguir adelante. Al Dr. José Apolinar Cortés, gracias por todo el apoyo y por el conocimiento compartido en todos los proyectos donde trabajamos juntos, al maestro Domingo Acuña Pardo, Dr. Rafael Huirache Acuña, Dr. Horacio Gonzales Rodríguez, a los maestros Salvador Escobar Argote, Armando López Zamudio, Víctor Escandón Alvarado y al maestro Maclovio Arreola Romero.

A la Dra. María del Carmen Chávez Parga, Dr. Rafael Maya Yescas y al M.C. Gabriel Martínez Herrera, que fortalecieron este trabajo con sus comentarios.

A todos los maestros que tuve en la facultad y maestría, ya que aprendí muchas cosas de cada uno de ellos.

A Mary, Lolita, Sra. Rocío, Froy y mi estimado Richard, por apoyarme siempre incondicionalmente y brindarme su amistad.

Agradezco los apoyos otorgados por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 DISTRIBUCIÓN Y USOS DEL AGUA .....	1
1.1.2 AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MORELIA .....	2
1.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN LA PLANTA “VISTA BELLA” DE MORELIA .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.3 HIPÓTESIS .....	11
1.4 OBJETIVOS .....	12
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	13
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	15
2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	16
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA “VISTA BELLA” .....	17
2.4 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN .....	20
2.4.1 <i>SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS</i> .....	20
2.4.2 <i>SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULANTES</i> .....	22
2.4.3 <i>SEDIMENTACIÓN POR ZONA</i> .....	25
2.4.4 <i>SEDIMENTACIÓN POR COMPRESIÓN</i> .....	28
2.5 TEORÍA DE LA CENTRIFUGACIÓN .....	29
2.5.1 <i>FUERZAS QUE SE DESARROLLAN EN LA SEPARACIÓN POR             CENTRIFUGACIÓN</i> .....	29
2.5.2 <i>FUNDAMENTOS DE LA CENTRIFUGACIÓN CONTINUA</i> .....	31
2.5.3 <i>VALORES SIGMA Y ESCALAMIENTO DE CENTRÍFUGAS</i> .....	33
2.6 TEORÍA DE FILTRACIÓN .....	34
2.6.1 <i>CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DE LA TORA DE FILTRACIÓN</i> ....	35
2.6.2 <i>TORTAS DE FILTRACIÓN COMPRESIBLES E INCOMPRESIBLES</i> .....	37
2.6.3 <i>RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE</i> .....	39
2.6.4 <i>FILTRACIÓN A PRESIÓN CONSTANTE</i> .....	40
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>42</b>
3.1 SEPARACIÓN POR SEDIMENTACIÓN .....	43
3.2 SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN .....	45
3.3 SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN.....	46

<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 SEPARACIÓN POR SEDIMENTACIÓN .....	48
4.2 SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN .....	56
4.3 SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN.....	60
4.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE SEPARACIÓN .....	80
4.5 CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE LA PURGA.....	82
4.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS TRES PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO EVALUADOS .....	86
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA POTABILIZADORA “VISTA BELLA” DE MORELIA .....	6
FIGURA 2. PRINCIPALES RÍOS Y FLUJOS DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	7
FIGURA 3. PICNÓMETRO .....	18
FIGURA 4. ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULA .....	18
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE AGLOMERADOS DE ARCILLA.....	19
FIGURA 6. CURVAS DE ISORENDIMIENTO.....	24
FIGURA 7. EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN .....	25
FIGURA 8. PROCEDIMIENTO GRÁFICO PARA EL MÉTODO DE KYNCH .....	27
FIGURA 9. TRAYECTORIA DE UNA PARTÍCULA EN SEDIMENTACIÓN CENTRÍFUGA .....	31
FIGURA 10. FILTRACIÓN DE TORTA .....	34
FIGURA 11. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MEDIO FILTRANTE .....	35
FIGURA 12. SUPERCENTRÍFUGA TUBULAR .....	45
FIGURA 13. FILTRO PRENSA.....	47
FIGURA 14. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS A 32 G/L.....	48
FIGURA 15. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS A 16 G/L.....	49
FIGURA 16. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS A 8 G/L .....	50
FIGURA 17. TURBIDEZ VS ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL.....	53
FIGURA 18. COLOR VS ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL .....	54
FIGURA 19. CAPACIDAD DE SEPARACIÓN VS VELOCIDAD DE CENTRIFUGACIÓN .....	56
FIGURA 20. TURBIDEZ DE LOS CLARIFICADOS A DIFERENTES RPM.....	58
FIGURA 21. COLOR DE LOS CLARIFICADOS A DIFERENTES RPM.....	58
FIGURA 22. RESULTADOS PARA “POLIESTER S-22” A 49.44 G/L.....	62
FIGURA 23. RESULTADOS PARA “321-61.5” A 49.44 G/L.....	62
FIGURA 24. RESULTADOS PARA “POLIESTER S-22” A 22.04 G/L.....	63
FIGURA 25. RESULTADOS PARA “321-61.5” A 22.04 G/L.....	63
FIGURA 26. RESULTADOS PARA “POLIESTER S-22” A 11.2 G/L.....	64
FIGURA 27. RESULTADOS PARA “321-61.5” A 11.2 G/L.....	65
FIGURA 28. RESULTADOS PARA “POLIESTER S-22” A 5.51 G/L .....	66
FIGURA 29. RESULTADOS PARA “321-61.5” A 5.51 G/L.....	66
FIGURA 30. TURBIDEZ PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 49.44 G/L .....	68
FIGURA 31. TURBIDEZ PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 22.04 G/L .....	68
FIGURA 32. TURBIDEZ PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 11.2 G/L .....	69
FIGURA 33. TURBIDEZ PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 5.51 G/L.....	69
FIGURA 34. COLOR PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 49.44 G/L.....	70
FIGURA 35. COLOR PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 22.04 G/L.....	70
FIGURA 36. COLOR PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 11.2 G/L.....	71
FIGURA 37. COLOR PARA LOS CLARIFICADOS DE LAS PRUEBAS A 5.51 G/L.....	71
FIGURA 38. RESULTADOS DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO .....	75
FIGURA 39. %REMOCIÓN EN FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO .....	76
FIGURA 40. TURBIDEZ EN FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO.....	77
FIGURA 41. COLOR EN FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO .....	77
FIGURA 42. CONDUCTIVIDAD EN FILTRACIÓN A NIVEL PILOTO.....	78
FIGURA 43. HUMEDAD EN LODOS DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO .....	79
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN DE VÁLVULAS Y MANGUERAS DE PURGA .....	83

# LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DIMENSIONES DE PROBETAS.....	44
TABLA 2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA SEDIMENTACIÓN .....	44
TABLA 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LAS PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN.....	46
TABLA 4. VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN.....	51
TABLA 5. ÁREAS DE SEDIMENTACIÓN .....	52
TABLA 6. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS MEDIANTE SEDIMENTACIÓN.....	52
TABLA 7. PH DE LOS CLARIFICADOS A DIFERENTES ÁREAS.....	54
TABLA 8. CONDUCTIVIDAD DE LOS CLARIFICADOS MEDIANTE SEDIMENTACIÓN .....	55
TABLA 9. PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LA SEDIMENTACIÓN.....	55
TABLA 10. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN.....	56
TABLA 11. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS MEDIANTE CENTRIFUGACIÓN.....	57
TABLA 12. PH DE LOS CLARIFICADOS A DIFERENTES RPM .....	59
TABLA 13. CONDUCTIVIDAD DE LOS CLARIFICADOS A DIFERENTES RPM.....	59
TABLA 14. PORCENTAJE DE HUMEDAD PROMEDIO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LA CENTRIFUGACIÓN .....	59
TABLA 15. CLARIFICADOS DE PRUEBAS CON DIFERENTES MATERIALES DE FILTRACIÓN .....	60
TABLA 16. PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA LAS PRUEBAS DE FILTRACIÓN .....	67
TABLA 17. PH DE LOS CLARIFICADOS PARA LAS PRUEBAS DE FILTRACIÓN.....	72
TABLA 18. CONDUCTIVIDAD DE LOS CLARIFICADOS PARA LAS PRUEBAS DE FILTRACIÓN.....	72
TABLA 19. PORCENTAJES DE HUMEDAD DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LA FILTRACIÓN.....	73
TABLA 20. PH DE LOS CLARIFICADOS DE FILTRACIÓN A NIVEL PILOTO .....	78
TABLA 21. PORCENTAJES DE EFICIENCIA PARA EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN .....	80
TABLA 22. PORCENTAJES DE EFICIENCIA PARA EL PROCESO DE CENTRIFUGACIÓN.....	80
TABLA 23. PORCENTAJES DE EFICIENCIA PARA LA FILTRACIÓN A NIVEL LABORATORIO.....	81
TABLA 24. PORCENTAJES DE EFICIENCIA PARA LA FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO.....	81
TABLA 25. TIEMPOS DE PURGA Y FLUJOS DE CADA VÁLVULA EN 3 DÍAS DIFERENTES .....	83
TABLA 26. SÓLIDOS Y VOLUMEN A DIFERENTES TIEMPOS DE PURGA EN LAS VÁLVULA.....	85
TABLA 27. SÓLIDOS Y VOLUMEN PARA LAS MANGUERAS DE PURGA .....	85
TABLA 28. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE LA PURGA.....	86
TABLA 29. COMPARACIÓN ENTRE PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO.....	89

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

### 1.1.1 DISTRIBUCIÓN Y USOS DEL AGUA

El agua es, después del oxígeno, la segunda sustancia más importante para sobrevivir, ya que interviene en la mayoría de los procesos biológicos que se llevan a cabo tanto en el cuerpo del ser humano, como en las plantas y los animales. Por esta razón se puede hacer la aseveración de que si no hay agua, no hay vida, lo cual ha preocupado a la sociedad en las últimas décadas, debido al paradigma de que este recurso se está agotando.

Como consecuencia, surge la interrogante de, ¿por qué se tienen problemas de abasto de agua?, si el 75% de nuestro planeta está formado por ella. Si bien es cierto que nuestro planeta consiste de tres cuartas partes de agua, ésta se distribuye de la siguiente forma: 94% es salada y está en océanos y mares, 2% se encuentra en las capas de hielo y en los glaciares, menos del 4% se encuentra como agua subterránea y solo en 0.014% se encuentra como agua disponible para consumo y utilización general. (Cortés, 2000).

Aunado al bajo porcentaje que se tiene disponible para el consumo humano, el agua se utiliza para el desarrollo de diversas actividades. En nuestro país, la mayor parte del agua que se extrae (63% proviene de fuentes superficiales y 37% fuentes subterráneas) se destina a las actividades agropecuarias (77%), le siguen el uso para abastecimiento público (14%), el industrial (4%), y el uso termoeléctrico (5%). (Conagua, 2010)

Debido al bajo porcentaje de agua para el abastecimiento público, se han generado problemáticas de escases de la misma, principalmente en las grandes ciudades, ya que la demanda es mayor que la oferta; razón por la cual se reducen las reservas de agua (Sazakly, 2007).

Por ende, se puede deducir que la verdadera problemática no es la falta de agua, sino la dificultad al acceso de ésta, con una calidad tal que pueda ser utilizada para el consumo o el desarrollo de las actividades del ser humano.

### **1.1.2 AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MORELIA**

Para el caso específico de Morelia, el sistema de agua potable en la ciudad se abastece de fuentes tanto superficiales como subterráneas, según datos del OOAPAS, las aguas superficiales aportan el 52% y las subterráneas el 48% del agua que se consume en la ciudad.

Para las fuentes antes mencionadas, la presa de Cointzio y el manantial la Mintzita son las dos principales fuentes superficiales, y para las fuentes subterráneas se tienen una serie de pozos profundos (OOAPAS, 2007).

Sin embargo, la mayoría de los manantiales se encuentran sobre explotados (COEECO, S/A), debido al crecimiento de la población y la acelerada pérdida de cobertura vegetal, lo que conlleva una alteración del ciclo hidrológico. Por ello, CONAGUA prohíbe la apertura de más pozos y que el suministro del líquido rebase la capacidad de abastecimiento de los ya existentes.

Cabe mencionar que de los 1,084.23 litros por segundo (lps) que abastece La Mintzita, el Grupo Papelero Scribe tiene concesionados 400 lps, lo que representa prácticamente el 40%.

Con los datos antes mencionados, se puede notar que la presa de Cointzio, es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable en Morelia. Dicha presa se construyó de febrero de 1936 a Julio de 1939, por administración de la extinta Comisión Nacional de Irrigación. Dentro de sus características de almacenamiento se cuenta con una capacidad del vaso total de 84 millones de m<sup>3</sup>; azolves 15 millones de m<sup>3</sup>; útil 69 millones de m<sup>3</sup>. El agua de la presa tiene características que ninguna otra presa del país posee, esto se debe al tipo de sólido que contiene, el cual es una arcilla ferruginosa en estado coloidal, llamada halloysita 7A.

Para poder utilizar el agua de la presa de Cointzio como agua potable para el consumo y uso humano, la ciudad de Morelia cuenta con la Planta Potabilizadora "Vista Bella", la cual se encarga de que dicha agua cumpla con las especificaciones físicas, químicas, bacteriológicas, organolépticas y radioactivas que se encuentran plasmadas en la MODIFICACION NOM-127-SSA1-1994,2001.

### **1.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN LA PLANTA "VISTA BELLA" DE MORELIA**

Para la realización de la descripción detallada del proceso, se tomará como base el diagrama de flujo que se muestra en la **Figura 1**.

El agua proveniente de la presa de Cointzio llega a la planta potabilizadora, a través de un canal de concreto, el cual tiene una longitud de 14 km, el control de flujo se realiza a través de una válvula de compuerta tipo Miller de 16" de diámetro, para regular el flujo a un promedio de 630 lps (corriente 1).

El proceso de potabilización se inicia con un cribado, en donde por medio de un sistema de rejillas, se realiza la remoción de partículas gruesas con tamaño superior a 2 centímetros (corriente 2).

Posterior al cribado, se realiza la dosificación de 45 ppm de Sulfato de aluminio (corriente 3) y 1.5 ppm de sílice activada (corriente 4), esto con el fin de iniciar el proceso de desestabilización de las partículas coloidales por neutralización de su carga (corriente 5). Con el fin de disminuir en lo posible la adición de sulfato de aluminio y mantener dentro de norma el contenido de aluminio en el agua potable, se adicionan 1.3 ppm de polímero catiónico (corriente 6).

La mezcla de agua con los reactivos adicionados (corriente 7), se alimenta a las cajas de mezcla rápida en donde, por medio de agitación, se genera la turbulencia suficiente, para que en tiempos del orden de segundos se lleve a cabo la difusión de reactivos y como consecuencia el correspondiente proceso de coagulación.

Después de pasar por la caja de mezcla rápida (corriente 8), el agua llega a la cámara de floculación, en donde recibe una agitación mecánica lenta para favorecer el crecimiento del floculo.

La corriente de salida de las cámaras de floculación (corriente 9), es enviada a los tanques de sedimentación en donde el agua clarificada asciende y es captada a través de una serie de canaletas rectangulares instaladas en la superficie de los tanques (corriente 11).

Los lodos sedimentados de los tanques sedimentadores (corriente 10), son purgados cada 8 horas (durante 45 min por purga), mediante sifoneo y a través de una serie de válvulas operadas manualmente que se encuentran instaladas en el fondo de estos tanques; **cabe hacer mención que actualmente estos lodos no reciben tratamiento alguno y son enviados al drenaje municipal que llega al río Chiquito de Morelia.**

El agua clarificada que produce cada uno de los tanques de sedimentación es vertida en un canal general de afluente hacia los filtros (corriente 11), es en ésta corriente en donde se agrega la cal química (CaO), para incrementar el pH a 7 unidades (corriente 12), esta adición es necesaria, debido a que el sulfato de aluminio disminuye el pH del agua, hasta un valor del orden de 6 unidades. También en ésta corriente se adiciona cloro con una concentración del orden de 1.5 ppm (corriente 13), cuya principal función es la de bactericida, dadas su propiedades de fuerte oxidante de materia orgánica.

Posterior a la etapa de neutralización y desinfección (corriente 14), el agua es enviada a filtros rápidos de arena (antracita) en donde se separan los sólidos suspendidos, microflóculos e incluso coloides presentes en el agua, que no fueron eliminados en el proceso de sedimentación. Los filtros reciben el agua por la parte superior del lecho filtrante, con lo cual se tiene un flujo descendente a través del material poroso, mientras que el retrolavado del filtro se realiza de forma ascendente.

Las aguas que salen de la etapa de filtración (corriente 15), llegan a los tanques de almacenamiento, de donde por gravedad se distribuyen a la ciudad (corriente 18).

La retención paulatina de las partículas en el lecho provoca que el material filtrante se tape debido a que se van ocupando los espacios intersticiales al pasar el agua con los sólidos, razón por la cual llega un momento en que se hace necesario lavar el filtro (retrolavarlo), con  $180\text{m}^3$  de agua limpia en cada operación de lavado (corriente 16).

De éste proceso de lavado del filtro se genera una corriente de agua residual con alto contenido de sólidos (corriente 17) que también es enviada al drenaje municipal en conjunto con la corriente de purga de sedimentadores (corriente 10).

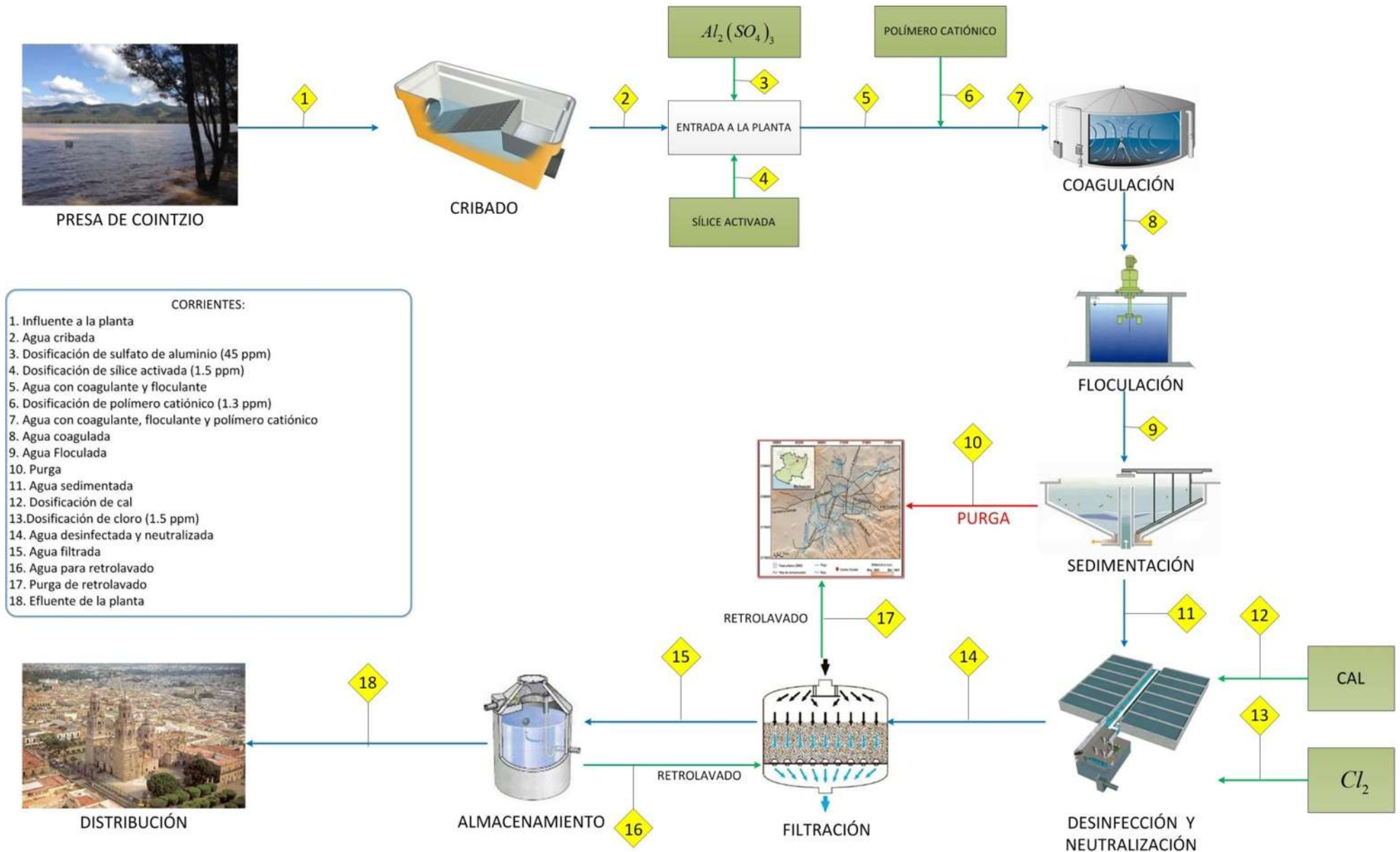
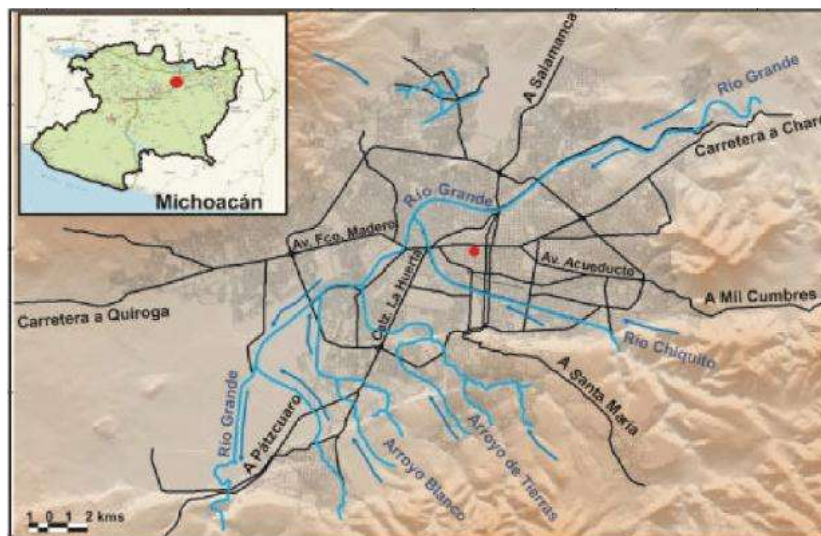


Figura 1. Diagrama de flujo de la Planta Potabilizadora "Vista Bella" de Morelia

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó en la descripción del proceso de operación de la planta potabilizadora “Vista Bella”, los lodos de los tanques de sedimentación se envían al drenaje municipal sin recibir tratamiento, lo cual causa que no se cumpla con la normatividad vigente y también genera problemas de contaminación, ya que los lodos generados en las actividades de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, así como en la operación de plantas potabilizadoras y de tratamiento de aguas residuales, en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Debido a que la planta trata en promedio 630 lps de agua proveniente de la presa de Cointzio, logrando una remoción promedio de 165.7 mg/L de sólidos, al separar estos sólidos y mandarlos al río Chiquito, que posteriormente se entronca con el río Grande y finalmente llegan al lago de Cuitzeo, provocan que al sedimentarse se depositen en promedio **3511 ton/año** en este lago, lo cual resta su capacidad de captación y va mermando poco a poco tanto su extensión como su profundidad.



**Figura 2.** Principales ríos y flujos de la ciudad de Morelia

La corriente de purga, cuyo volumen es del orden de 2400 m<sup>3</sup>/día, al tener sólidos suspendidos, que son principalmente arcillas, genera turbidez en los cuerpos de agua receptores, lo cual obstruye la penetración de luz solar (Mitchell, 1991).

Al impedirse la entrada de luz solar se dificulta el proceso de fotosíntesis en algas y plantas acuáticas, disminuyendo la producción de oxígeno, así éstas mueren y provocan mayor demanda de oxígeno al descomponerse (Wagner, 1996).

Al haber una disminución de oxígeno producido por las algas, debido a la falta de luz solar ó muerte de ellas, hay disminución del oxígeno disuelto, el cual es muy importante para mantener la vida acuática en los cuerpos de agua (Malina, 1996).

Además una disminución del oxígeno disuelto tiene efectos desfavorables sobre el metabolismo de las bacterias que degradan la materia orgánica, lo cual reduce la capacidad benéfica que tienen éstas en la purificación natural de las aguas.

Lo anterior debido a que algunas bacterias se alimentan de materia orgánica disuelta o suspendida en el agua, y éstas consumen oxígeno durante su respiración y reproducción.

Cuando las aguas contienen grandes proporciones de materia orgánica (contaminante), las bacterias tienen suficiente alimento para reproducirse en grandes cantidades y consumen el oxígeno disponible, una vez consumido el oxígeno, las bacterias aerobias mueren y se desarrollan en el cuerpo de agua otras bacterias conocidas como bacterias anaerobias, que no necesitan del oxígeno para su alimentación y reproducción.

En el proceso de alimentación las bacterias anaerobias utilizan nitratos y sulfatos en lugar de oxígeno, de la utilización de los sulfatos resulta el sulfuro de hidrógeno, el cual es un gas pestilente. Tanto las bacterias aerobias como las anaerobias destruyen la materia orgánica y la convierten en bióxido de

carbono, el cual luego se dispersa en la atmósfera junto con el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno.

Otro efecto asociado a turbidez es la obstrucción de las branquias de los peces por los sólidos suspendidos, reducción del crecimiento y la resistencia a las enfermedades, al igual que limita el desarrollo de huevos (Mitchell, 1991).

También los sólidos suspendidos aumentan la temperatura del agua, al sostener partículas que debido a su capacidad calorífica absorben el calor de la luz solar, al impedir el paso de la misma. La temperatura en un río es muy importante, ya que afecta las características físicas, biológicas y químicas del mismo, como la velocidad de fotosíntesis de algas y plantas acuáticas, la velocidad metabólica de organismos acuáticos y la sensibilidad de organismos a desechos tóxicos (Mitchell, 1991). El principal efecto de la temperatura es la disminución del oxígeno disuelto (al aumentar la temperatura disminuye el solubilidad del oxígeno).

Como consecuencia de las reacciones de coagulación-floculación, el agua de la purga tiene un pH alrededor de 6, lo cual es otro factor que genera efectos adversos en la capacidad de tratamiento y auto purificación en los cuerpos de agua, debido a que la disminución del pH, provoca que los microorganismos (bacterias) disminuyan su capacidad metabólica y como consecuencia la capacidad de biodegradación, ya que inhibe la actividad enzimática. Aunque algunas bacterias puedan vivir en condiciones ácidas, la mayor parte de los organismos se desarrollan preferentemente en un intervalo de pH de 6.5 a 8 aproximadamente.

Además, los residuos de sustancias químicas usadas en el proceso de potabilización, como el hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), genera otra problemática importante, ya que en el lago de Cuitzeo puede formar un gel impermeable al paso del oxígeno, provocando la asfixia de peces.

Aunado a esto se han encontrado publicaciones que especifican que el aluminio puede causar una serie de enfermedades neurodegenerativas, tales como demencia y Alzheimer (Exley, 2012).

El consumo del aluminio por los seres humanos puede ser debido a la ingesta de peces contaminados o directamente por beber agua contaminada con aluminio, lo cual puede suceder a los habitantes cercanos al lago de Cuitzeo.

Otra causa de ingesta es por contaminación de cultivos agrícolas de algunas zonas, ya que para el riego utilizan agua que proviene de la presa Cointzio, pero se mezcla con las descargas de aguas residuales del río Grande.

Las zonas en que se reutiliza el agua residual, son los módulos II, III y IV del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro, que abarcan parte de los municipios de Morelia, Tarímbaro, Charo, Alvaro Obregón, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro.

Esto acarrea problemas de índole social, ya que a parte de los problemas de salud que se pueden provocar debido a la contaminación del río Grande, teóricamente solo se permite a los agricultores de estas zonas regar forrajes y no es posible regar otro tipo de cultivos que pudieran ser de mayor rentabilidad para ellos; esto ha sido un gran reclamo de los propios agricultores debido a que se reducen sus utilidades (SAGARPA).

Por su parte, pescadores de la comunidad Mariano Escobedo del municipio de Cuitzeo, señalaron que las descargas del Río Grande a dicho lago dañan y contaminan las especies nativas como la tilapia y charal, que se pescan en el lugar.

Por estos motivos expuestos, la presente investigación diseñó un proceso para darle un tratamiento a las aguas residuales de la planta potabilizadora "Vista Bella", en el cual se separan el agua y la arcilla, con el objetivo de que se le dé un uso a ésta y el agua recuperada regresarla al proceso de potabilización, para que sea otro aporte al abastecimiento de agua potable a la ciudad de Morelia. El resultado será evitar que la purga de la planta se deseche al río Chiquito y evitar las problemáticas antes expuestas.

## **1.3 HIPÓTESIS**

El diseño de un proceso de tratamiento para el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella” de Morelia, proporcionará condiciones para obtener agua con la calidad necesaria para reintroducirse en el proceso de potabilización, generando así la posibilidad a que se aprovechen los lodos resultantes y evitando de ésta manera que dicha agua residual se descargue en el río Chiquito de Morelia.

## 1.4 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Diseñar un proceso de tratamiento para el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella” de Morelia, el cual proporcione condiciones para poder aprovechar tanto el agua separada como los sólidos, y evite que se siga vertiendo dicha agua residual al río Chiquito de Morelia.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Conocer las condiciones de operación de la planta potabilizadora, así como su dinámica de operación y los balances de masa correspondientes.
- ❖ Conocer los parámetros de capacidad de remoción, humedad de los lodos obtenidos y porcentaje de eficiencia para cada uno de los procesos de sedimentación, centrifugación y filtración, a nivel piloto.
- ❖ Conocer, para cada uno de los procesos antes mencionados, el costo y tamaño del equipo, que tenga la capacidad suficiente para tratar el flujo de agua residual de la planta potabilizadora.

## 1.5 ESTADO DEL ARTE

Se han encontrado un par de plantas en las cuales se tiene reporte de que le dan un tratamiento de deshidratación a los lodos que se producen, dichas plantas son la planta potabilizadora de la “Mintzita” de Morelia Michoacán y la planta de tratamiento de aguas residuales “el Creston” en Mazatlán Sinaloa.

En la planta potabilizadora de la Mintzita se mandan los lodos primero a un espesador, previamente se dosifica un polímero para ayudar a la separación de sólidos y el agua, posteriormente se mandan a un filtro banda, en donde se realiza la separación de los sólidos del agua y finalmente se les manda a un terreno como relleno sanitario (OOAPAS, 2006).

Para el caso de la planta tratadora de aguas residuales “el Creston” de Mazatlán Sinaloa, se indica que los lodos, después de los sedimentadores son enviados por gravedad hasta el tanque de almacenamiento, mismo que sirve como regulador, posteriormente el lodo pasa mediante bombeo a filtros de banda donde se le retira un importante porcentaje de agua, para posteriormente a través de bandas transportadoras ser enviados al proceso de estabilización, en éste se les aplica cal viva (CaO) para inhibir y/o eliminar los microorganismos patógenos, cumpliendo así con la normatividad vigente en la materia. Los lodos una vez estabilizados son depositados en un relleno controlado.

En ambas plantas, la separación de los lodos y el agua se lleva a cabo mediante un filtro de banda, pero aparte de no mostrar que porcentaje de remoción se logra, no justifican si éste es el mejor medio de separación, ni se indica si es el más económico o por qué motivo lo utilizan.

Por otra parte se hizo una búsqueda de artículos relacionados con la presente investigación en <http://www.sciencedirect.com/>, en donde se encontraron algunos trabajos para casos específicos, tales como el tratamiento de agua residual de una planta de elaboración de gelatinas, el comportamiento de la caída de presión durante la filtración para un material en específico, entre otros.

Los artículos que se consideraron fueron aquellos en los que se tenían estudios de casos generales relacionados con la presente investigación. A continuación se resumen los artículos considerados.

Burger, en 1999, presenta la simulación del comportamiento de un espesador, mediante la solución numérica de una ecuación parabólica-hiperbólica de la teoría fenomenológica de sedimentación.

Burger, en 2001, extiende la teoría fenomenológica para el proceso de sedimentación para la presencia de una fuerza centrífuga, incluyendo una ecuación diferencial parcial hiperbólica-parabólica para la distribución de la concentración de sólidos como función del radio y del tiempo. Posteriormente presenta un algoritmo para la solución numérica de las ecuaciones antes mencionadas y lo emplean para la resolución de algunos ejemplos del comportamiento de sedimentación por centrifugación.

Garrido, en 2003, presenta una teoría unificada para la separación sólido-líquido de suspensiones floculadas donde hacen la analogía para los procesos de sedimentación, centrifugación y filtración. Se identifican las variables y ecuaciones para cada una de las operaciones antes mencionadas

Sticklanda, en 2008, presenta resultados de compresión de un material, a partir de filtración a presión constante, produce resultados de esfuerzo de compresión y difusividad de sólidos para este material.

Florian, en 2010, estudió el proceso de sedimentación de una partícula coloidal. Este proceso se modeló matemáticamente a través de un modelo Stokes-Poisson-Nernst-Planck, resultando un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acopladas.

Como se puede observar, en todos los artículos antes mencionados sólo se muestran ecuaciones para simulación de los procesos de separación sólido-líquido, muchas veces las simulaciones no contemplan factores reales que intervienen en los procesos, además, los lodos residuales de la planta potabilizadora "Vista Bella" tienen características específicas, por tal motivo, en el presente proyecto se realizó la experimentación pertinente con dichos lodos.

# CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Como se ha mencionado, el agua es imprescindible para el ser humano, ya que además de ser benéfica para la salud, se utiliza para desarrollar diversas actividades domésticas, agrícolas, industriales, recreativas, todo tipo de actividades económicas, entre otras.

El agua desechada después de haber sido utilizada en diferentes aplicaciones se considera agua residual, la cual puede ser definida como una combinación de aguas que llevan los desechos removidos de las residencias, establecimientos industriales y comerciales, instituciones, y cuando se dé el caso, aguas subterráneas, aguas superficiales y agua de lluvia.

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Según el origen del agua residual se puede clasificar en:

**Aguas residuales domésticas.** Consisten básicamente en residuos de inodoros, lavaderos, cocinas y otros elementos domésticos, también residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares. Generalmente esta agua se encuentra compuesta por sólidos suspendidos (en su mayoría materia orgánica biodegradable), sólidos sedimentables (principalmente materia inorgánica), nutrientes (nitrógeno y fósforo) y organismos patógenos.

**Aguas residuales industriales.** Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua; son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria. Éstas presentan mayor cantidad de contaminantes que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar, ya que adicionalmente a los componentes citados anteriormente, pueden contener elementos tóxicos tales como plomo, mercurio, níquel, cobre

y otros, los cuales requieren ser removidos en vez de ser vertidos al sistema de alcantarillado.

Algunas veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial, también son habituales las variaciones de caudal y de concentración a lo largo del día.

Su elevada concentración, unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales industriales sea complicado, siendo preciso un estudio específico para cada caso.

**Aguas pluviales.** Es el agua proveniente de la lluvia, y debido a su efecto de lavado sobre tejados, calles y suelos, pueden contener una gran cantidad de sólidos suspendidos; en zonas de alta contaminación atmosférica, pueden contener algunos metales pesados y otros elementos químicos.

## **2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Cuando el agua residual sin tratamiento es acumulada, puede generar un sistema séptico, la descomposición de la materia orgánica que contiene conduce a condiciones desagradables, tales como la producción de gases malolientes, además el agua residual sin tratamiento contiene numerosos microorganismos patógenos para el ser humano, así mismo puede contener compuestos tóxicos o compuestos que sean mutagénicos o cancerígenos. Por estas razones, la remoción del agua residual de las fuentes de generación, seguidas por un tratamiento o reúso, es necesaria para proteger la salud pública y el ambiente.

Existe una gran variedad de métodos para tratar las aguas residuales, éstos se basan en las características que presente dicha agua y lo que se desea eliminar de ella, dichos métodos se pueden clasificar en tres grandes grupos: métodos físicos, métodos químicos y métodos biológicos.

**Métodos físicos.** Estos métodos no generan sustancias nuevas, sino separan los contaminantes mediante métodos mecánicos, principalmente se pretende la

remoción de los sólidos insolubles, tales como sólidos sedimentables, flotantes y coloides.

**Métodos químicos.** Utilizan agentes químicos para separar o eliminar materia orgánica e inorgánica, dando como resultado la formación de nuevas sustancias, a través de las cuales se pueden eliminar productos químicos. En el campo de tratamiento de aguas residuales, los procesos químicos usualmente son usados en conjunción con las operaciones físicas.

**Métodos biológicos.** Se basan en la utilización de microorganismos vivos, principalmente bacterias, mediante las cuales se reduce la cantidad de materia orgánica (disminución de la demanda bioquímica de oxígeno). Entre los objetivos del tratamiento biológico se encuentran transformar (oxidar) constituyentes disueltos y partículas biodegradables en productos finales aceptables, transformar o remover nutrientes, tales como nitrógeno o fósforo.

### **2.3 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA “VISTA BELLA”**

El agua residual antes mencionada, contiene gran cantidad de sólidos, los cuales se deben principalmente a la arcilla presente en la presa de Cointzio, y en mucha menor cantidad de los reactivos que son adicionados en el proceso de potabilización, tales como Sulfato de aluminio (Hidróxido de aluminio), Sílice, Polímero Catiónico y cal.

Como resultado de la inclusión del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y de la sílice activada que se adiciona en el proceso de potabilización, la arcilla presenta características especiales que dan la posibilidad de que pueda ser utilizada para elaborar productos con valor agregado, por lo anterior, solo se busca realizar la separación sólido-líquido en el agua residual.

Además, en el agua residual ya no se desarrollan reacciones químicas, no se desea eliminar ningún compuesto químico y prácticamente no posee materia orgánica a degradar, por ende no requiere de tratamientos químicos ni biológicos.

Debido a esto, se requiere proponer procesos mecánicos factibles, mediante los cuales se lleve a cabo la separación sólido-líquido en el agua residual, para ello, se llevaron a cabo las mediciones de densidad del lodo seco y distribución del tamaño de aglomerado.

La densidad del material sólido fue determinada por el método del picnómetro (Figura 3) con base en la norma UNE-103-302-94. El valor que se obtuvo fue de **2.34 g/ml**. Cabe hacer mención que este parámetro fue evaluado con el fin de determinar la factibilidad de la separación de los sólidos suspendidos por los métodos de sedimentación y/o centrifugación.



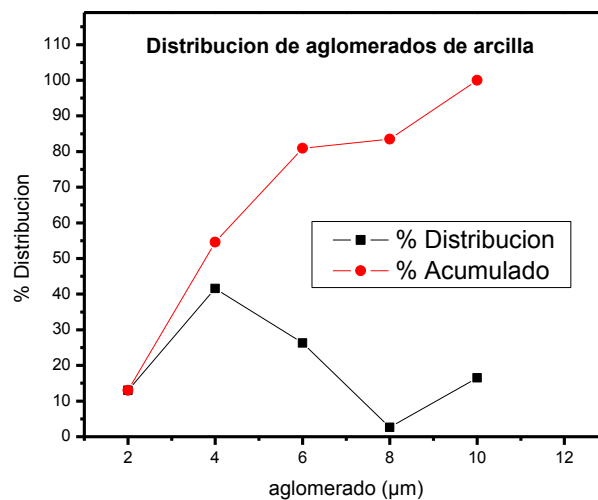
**Figura 3.** Picnómetro

La distribución del tamaño de aglomerado se realizó bajo el principio de mediciones combinadas de transmisión de luz mediante sedimentación por gravedad natural y sedimentación centrífuga, en un equipo analizador de tamaño de partícula marca Horiba, modelo Capa 3000 (Figura 4).



**Figura 4.** Analizador de tamaño de partícula

Los resultados se muestran en la **Figura 5**, en donde se observa que los aglomerados que se encuentran suspendidos en el agua residual de la planta potabilizadora exhiben diámetros en el orden de las micras con la siguiente distribución: el 13% de los aglomerados se encuentran en el tamaño de partícula menor a 2  $\mu\text{m}$ , el 41.6 % se encuentran en el intervalo de 2 a 4  $\mu\text{m}$ , el 26.3% se encuentran en el intervalo de 4 a 6  $\mu\text{m}$ , el 2.6 % se encuentra en el intervalo de 6 a 8  $\mu\text{m}$  y 16.5 % se encuentran en tamaños mayores a 8  $\mu\text{m}$ . Con respecto al cálculo del acumulado de tamaños de aglomerados, se observa que un porcentaje superior al 80% se encuentra en el intervalo de 0 a 6  $\mu\text{m}$ , mientras que el restante 20% tiene un tamaño superior a las 6  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.** Distribución de aglomerados de arcilla

Dichos resultados indican que se puede realizar la separación sólido-líquido a través del proceso de filtración de torta. Debido a los tamaños de aglomerado obtenidos no es factible llevar a cabo otros tipos de filtraciones, ya que, la ultrafiltración utiliza membranas con aberturas extremadamente pequeñas para la separación y concentración de partículas desde 0.5  $\mu\text{m}$  hasta moléculas grandes de  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$ . La hiperfiltración y nanofiltración se usan para separaciones de moléculas pequeñas o iones, así mismo, el proceso de osmosis inversa se aplica también a tales separaciones cuando la presión osmótica tiene un efecto importante sobre el flujo.

## 2.4 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es la operación unitaria que consiste en separar un sólido suspendido de un líquido, mediante la acción de la gravedad y la diferencia de densidad entre la partícula y el fluido, obteniéndose un líquido clarificado y un lodo con elevado porcentaje de sólidos.

Según la clasificación de Fitch, basada en la concentración y tendencia a la interacción de las partículas, existen cuatro tipos de sedimentación:

- Sedimentación tipo 1 ó de partículas discretas.
- Sedimentación tipo 2 ó de partículas floculantes.
- Sedimentación tipo 3 ó por zona (sedimentación impedida).
- Sedimentación tipo 4 ó por compresión.

### 2.4.1 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS

En la sedimentación de partículas discretas, éstas sedimentan de manera individual, es decir, no hay interacción de unas partículas con otras. En general son sólidos en suspensión con una masa relativamente grande y en suspensiones no muy concentradas.

El fundamento para la sedimentación de partículas discretas es la ley de Newton, en donde se considera una partícula de masa  $m$  que se mueve a través de un fluido bajo la acción de una fuerza externa  $F_e$ . Sea  $u$  la velocidad de la partícula con relación al fluido,  $F_b$  la fuerza de flotación sobre la partícula y  $F_D$  el rozamiento. Por tanto, la fuerza resultante que actúa sobre la partícula es  $F_e - F_b - F_D$ , la aceleración de la partícula es  $du/dt$  y según la segunda ley de Newton  $F = ma/g_c$ , igualando estas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{m}{g_c} \frac{du}{dt} = F_e - F_b - F_D \quad \text{Ec.(1)}$$

La fuerza externa puede expresarse como el producto de la masa por la aceleración  $a_e$  de la partícula debida a ésta fuerza,

$$F_e = \frac{m a_e}{g_c} \quad \text{Ec.(2)}$$

Según el principio de Arquímedes, la fuerza de flotación es igual al producto de la masa de fluido desplazada por la partícula y la aceleración debida a la fuerza externa. El volumen de la partícula es  $m/\rho_P$ , siendo  $\rho_P$  la densidad de la partícula, y la partícula desplaza este mismo volumen de fluido. La masa de fluido desplazado es  $(m/\rho_P)\rho$ , siendo  $\rho$  la densidad del fluido. Por tanto, la fuerza de flotación es:

$$F_b = \frac{m\rho a_e}{g_c\rho_P} \quad \text{Ec.(3)}$$

Por otra parte, derivado de la ecuación coeficiente de rozamiento, se obtiene:

$$F_D = \frac{C_D\rho u_0^2 A_P}{2g_c} \quad \text{Ec.(4)}$$

Al sustituir las ecuaciones (2), (3) y (4) en la ecuación (1), se obtiene:

$$\frac{du}{dt} = a_e - \frac{\rho a_e}{\rho_P} - \frac{C_D\rho u^2 A_P}{2m} = a_e \frac{\rho_P - \rho}{\rho_P} - \frac{C_D\rho u^2 A_P}{2m} \quad \text{Ec.(5)}$$

Si la fuerza externa es la de la gravedad,  $a_e$  es  $g$ , la aceleración de la gravedad, y la ecuación (5) se transforma en:

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_P - \rho}{\rho_P} - \frac{C_D\rho u^2 A_P}{2m} \quad \text{Ec.(6)}$$

Como en la sedimentación las partículas comienzan en reposo con respecto al fluido en el que están inmersas, y después se mueven a través de él, su movimiento se divide en 2 etapas, la primera de ellas es un periodo corto de aceleración (por lo general del orden de décimas de segundo) durante el cual la velocidad aumenta desde cero hasta una velocidad constante, que es la máxima alcanzable en estas condiciones y se denomina velocidad terminal. La segunda etapa es el periodo de dicha velocidad, que puede mantenerse durante el tiempo que las partículas estén bajo tratamiento en el equipo de sedimentación.

La ecuación (6) es aplicable durante el periodo de aceleración, mientras que la velocidad terminal se encuentra haciendo  $du/dt = 0$ . Se tiene entonces, de la ecuación (6):

$$v_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_P - \rho)m}{A_P \rho_P C_D \rho}} \quad \text{Ec.(7)}$$

Si las partículas son esferas de diámetro  $D_P$ ,

$$m = \frac{1}{6} \pi D_P^3 \rho_P \quad \text{Ec.(8)}$$

$$A_P = \frac{1}{4} \pi D_P^2 \quad \text{Ec.(9)}$$

Al sustituir las ecuaciones (8) y (9) en la ecuación (7), se obtiene la ecuación para el asentamiento de esferas por gravedad:

$$v_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_P - \rho)D_P}{3C_D \rho}} \quad \text{Ec.(10)}$$

En el caso general, la velocidad terminal se obtiene por prueba y error después de estimar  $Re_P$  para obtener un valor estimativo inicial de  $C_D$ , ya que éste es función del número de Reynolds y de la forma de la partícula.

Para valores bajos del número de Reynolds, el coeficiente de rozamiento varía de forma inversamente proporcional con  $Re_P$ , y las ecuaciones para  $C_D$ ,  $F_D$  y  $v_t$  son:

$$C_D = \frac{24}{Re_P} \quad \text{Ec.(11)}$$

$$F_D = 3\pi\mu u_t D_P \quad \text{Ec.(12)}$$

$$v_t = \frac{gD_P^2(\rho_P - \rho)}{18\mu} \quad \text{Ec.(13) (Ley de Stokes)}$$

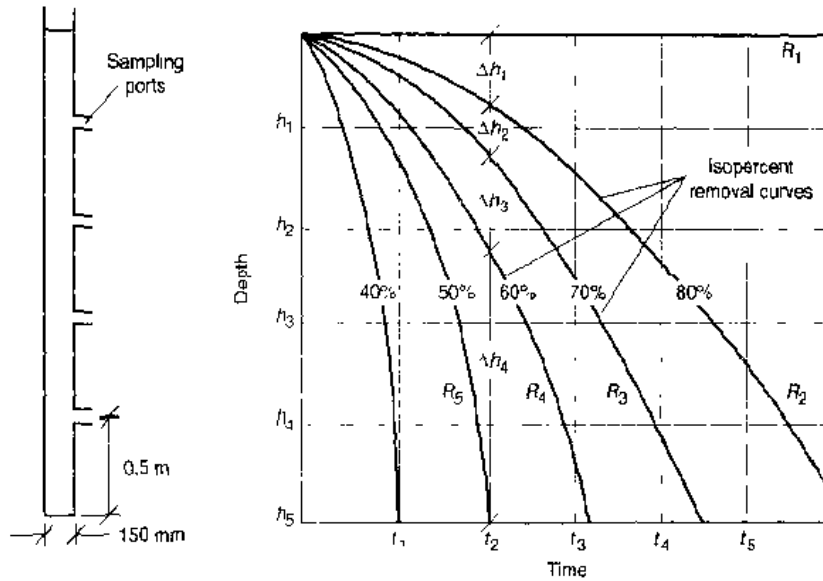
## 2.4.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULANTES

La sedimentación floculante tiene lugar cuando existen partículas mucho más pequeñas que las partículas discretas y con una mayor concentración, además, la velocidad de sedimentación aumenta, debido a la coalescencia con otras partículas, lo que produce mayor masa y tamaño. Las trayectorias de sedimentación de las partículas tienen forma curva, en lugar de las líneas rectas que se producen en la sedimentación de partículas discretas.

El grado con la cual ocurre la floculación depende de la probabilidad de contacto, la cual varía con la profundidad del tanque, gradientes de velocidad en el sistema, concentración de partículas y distribución de tamaño de partícula. Los efectos de estas variables pueden ser determinados solamente a través de pruebas de sedimentación.

Las características de sedimentación de una suspensión de partículas floculantes, pueden ser obtenidas mediante la prueba de una columna de sedimentación, la cual puede ser de cualquier diámetro, pero debe ser igual en altura, a la profundidad del tanque de sedimentación propuesto. La solución que contiene la materia suspendida debe ser introducida a la columna de tal manera que haya una distribución uniforme de concentración desde la parte superior hasta el fondo. Se debe tener cuidado en mantener una temperatura uniforme en toda la prueba, para eliminar las corrientes de convección. La sedimentación se debe realizar bajo condiciones de calma y la duración de la prueba deberá ser equivalente al tiempo de sedimentación del tanque propuesto.

El método más utilizado para la determinación de las características de sedimentación de una suspensión floculante, es utilizar una columna como la descrita arriba, adicionando válvulas para toma de muestras, insertadas aproximadamente en intervalos de distancia de 0.5 metros. A varios intervalos de tiempo, se toman muestras a través de las válvulas y se cuantifican los sólidos suspendidos. El porcentaje de remoción es registrado para cada muestra analizada y se grafica contra tiempo, para las diferentes profundidades. A partir de los datos anteriores, se construyen en otra gráfica, las curvas de igual porcentaje de remoción (isorendimiento) como se muestra en la **Figura 6**, conocida como gráfica de sedimentación.



**Figura 6.** Curvas de isorendimiento

Mediante la gráfica de sedimentación se puede obtener el rendimiento global, así como la carga superficial correspondiente, si el tiempo de detención y la profundidad del tanque de sedimentación son fijados.

El rendimiento global que se obtiene, para la profundidad H y el tiempo de residencia fijados de acuerdo a los objetivos de tratamiento, por:

$$\%R = \sum_{n-1}^n \left( \frac{\Delta h_n}{H} \right) \left( \frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right) \text{ Ec. (14)}$$

Aquí:

R= Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos

n= número de curva con igual porcentaje de remoción

$\Delta h_n$ =distancia entre las curvas con igual porcentaje de remoción

H= altura total de la columna de sedimentación

$R_n$ =número n de la curva con igual porcentaje de remoción

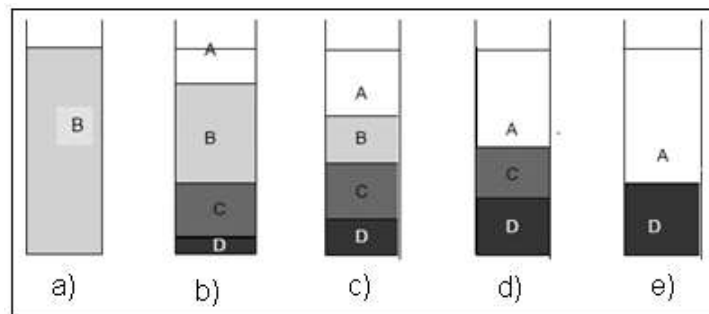
$R_{n+1}$ =número n+1 de la curva con igual porcentaje de remoción

La ventaja de éste método es que es posible obtener datos de remoción a diferentes profundidades de sedimentación.

### 2.4.3 SEDIMENTACIÓN POR ZONA

En la sedimentación por zona, debido a la elevada concentración, las partículas que sedimentan sufren interacciones entre sí, de tal forma que la posición de una partícula respecto a otra permanece prácticamente constante, sedimentando todas las partículas como una zona o unidad.

Para explicar cómo se desarrolla esta operación se recurrirá a describir un experimento de sedimentación discontinua, en la **Figura 7** se presenta una probeta con una suspensión de concentración uniforme,  $C_0$ , en el momento de iniciarse el experimento (tiempo  $t=0$ , **Figura 7-a**)



**Figura 7.** Evolución del proceso de sedimentación

Al cabo de un cierto tiempo pueden observarse algunos cambios (**Figura 7-b**); los sólidos que han sedimentado producen en la parte superior una zona de líquido claro, libre de sólidos, zona A, y en el fondo de la probeta se va formando la zona D, un lodo concentrado de sólidos sedimentados. Encima de la capa D está una zona de transición, zona C, cuyo contenido en sólidos varía desde el de la concentración original hasta el de la zona D. En la zona B, la concentración es uniforme y aproximadamente igual a la concentración inicial, puesto que la velocidad de sedimentación es uniforme a través de esta zona.

A medida que la sedimentación continúa (**Figura 7-c**), se incrementa la profundidad de las zonas D y A. La profundidad de la zona C permanece casi constante, y la zona B disminuye. La separación entre las zonas A y B suele ser bastante nítida, mientras que la separación entre las zonas C y D es menos definida y en algunos casos resulta difícil o imposible de apreciar, así como la separación B y C, cuya separación es siempre inapreciable.

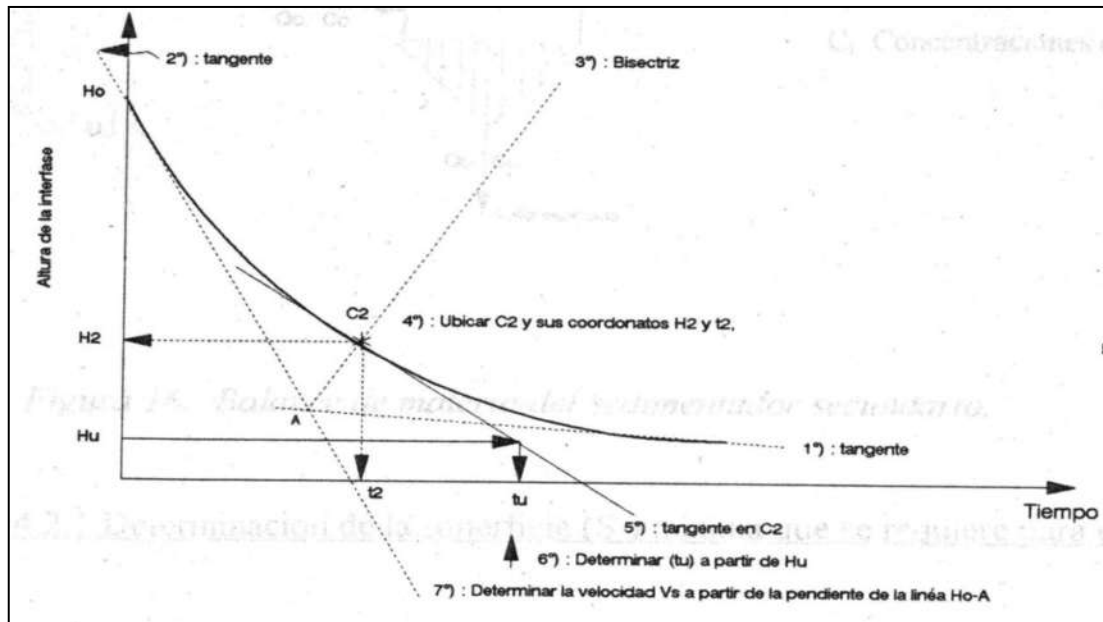
Posteriormente la zona B desaparece y todos los sólidos están en las zonas C y D, (Figura 7-d), a partir de ese instante, el espesor de la zona C va disminuyendo hasta alcanzar un valor límite (Figura 7-e).

Por otra parte, la acumulación gradual de los sólidos ejerce presión sobre el material en el fondo, comprimiendo a la capa D; esta compresión derrumba la estructura de flóculos y agregados, y el líquido atrapado se expulsa hacia zonas más altas, en algunas ocasiones como pequeños geiseres, debido a que el líquido tiende a moverse a través de los espacios intersticiales que existen entre las partículas. Finalmente cuando el peso de los sólidos está balanceado por la fuerza compresiva de los flóculos, el proceso de sedimentación se detiene.

Debido a que en cada una de las etapas antes mencionadas, la velocidad de sedimentación y la altura de cada zona son diferentes, no se han encontrado mecanismos que describan de manera simbólica la dinámica de cada una de dichas etapas, lo que se busca es predecir el comportamiento de la velocidad de sedimentación en general.

El método de Kynch, es el método más utilizado para analizar los casos en los que se presenta la sedimentación por zona, además, dicho método permite encontrar parámetros de diseño, tales como las áreas requeridas para llevar a cabo la clarificación y el espesamiento de lodos.

Para llevar a cabo éste método, el primer paso es realizar una prueba de sedimentación como la descrita anteriormente, donde una columna de altura  $H_0$  es llenada con la suspensión de concentración uniforme  $C_0$  que se desea evaluar, se toman lecturas de la variación de la interfase en función del tiempo y se grafican, obteniéndose una gráfica como la que se muestra en la Figura siguiente.



**Figura 8.** Procedimiento gráfico para el método de Kynch

La concentración crítica que controla la capacidad de manejo de sólidos, en un tanque de sedimentación, es  $C_2$ . Este punto en la curva nos da el tiempo ( $T_2$ ) y la altura ( $H_2$ ) de la interfase, aquí empieza la fase de compactación (zona de transición). Para encontrar el punto  $C_2$ , se extienden las tangentes de las regiones de compactación y de clarificación, hasta el punto donde se interceptan (punto A), posteriormente se extiende la bisectriz del ángulo formado en el punto A por las dos tangentes trazadas, hasta que toque la curva de sedimentación. Una vez ubicado el punto  $C_2$ , se extiende una tangente en este punto hasta cruzar el eje X de la gráfica.

Si se busca obtener una concentración  $C_u$  de lodos espesados, el tiempo que se necesita será  $t_u$ , mientras que el espesor de la capa de lodo será  $H_u$ . El tiempo  $t_u$  puede obtenerse de la gráfica una vez que se conoce  $H_u$ , el cual puede calcularse mediante un balance de masa en la columna, con la ecuación siguiente:

$$H_u = \frac{H_o C_o}{C_u} \quad \text{Ec. (15)}$$

Aquí:

$C_o$  = Concentración inicial de sólidos

$H_o$  = Altura de la probeta

$C_u$  = Concentración final de sólidos en el lodo resultante

$H_u$  = Altura del lodo, cuya concentración de sólidos es  $C_u$

Acto seguido se traza una línea horizontal a la altura  $H_u$ , hasta que intercepte la tangente trazada en el punto  $C_2$ , en este punto se construye una línea vertical para encontrar  $t_u$  en el eje x.

La pendiente de la tangente en la línea Ho-A corresponde a la velocidad de sedimentación ( $v_s$ ) en la zona de clarificación.

Por último se calculan las áreas requeridas para la sección de espesamiento ( $A_e$ ) y la sección de clarificación ( $A_c$ ) mediante las siguientes formulas:

$$A_e = \frac{1.5 * Q * t_u}{H_o} \quad \text{Ec. (17)}$$

$$A_c = \frac{2 * Q}{v_c} \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde Q es el flujo volumétrico de agua a tratar

#### **2.4.4 SEDIMENTACIÓN POR COMPRESIÓN**

En sistemas que contienen altas concentraciones de sólidos suspendidos, se presentan la sedimentación por zona y la sedimentación por compresión simultáneamente. En dicho sistema la velocidad inicial está en función de la concentración de la alimentación, pero en las últimas etapas, esta velocidad depende también de la altura inicial  $H_0$ , puesto que los efectos de compresión son muy importantes debido a las capas de lodo espeso.

La compresión implica la formación de una estructura de partículas y es debida al peso de las partículas que van sedimentando desde la superficie del tanque de sedimentación, cuanto mayor sea la compresión menor será el volumen de lodos que se obtengan.

Si bien se ha indicado, de una forma general cada tipo de sedimentación, estos puede tener lugar simultáneamente, citando el caso de la **Figura 7**, donde se presenta la sedimentación por zona y por compresión, así mismo, las partículas dispersas remanentes en el clarificado usualmente sedimentan como partículas discretas o floculentas.

## **2.5 TEORÍA DE LA CENTRIFUGACIÓN**

Algunas veces, la separación por gravedad es demasiado lenta, debido a la similitud de densidades de la partícula y el fluido, al pequeño tamaño de las partículas ó a las fuerzas de asociación que mantienen unidos a los componentes, como en el caso de las emulsiones.

Para aumentar la velocidad de sedimentación, la fuerza de la gravedad que actúa sobre la partícula puede sustituirse por una fuerza centrífuga mucho más intensa. Los separadores centrífugos han sustituido en buena parte a los separadores por gravedad, debido a su mayor eficiencia, ya que aumenta significativamente las fuerzas que actúan sobre partículas, por tanto, las partículas que no se precipitan o lo hacen con mucha lentitud bajo la acción de la gravedad, casi siempre se pueden separar de los fluidos por medio de fuerzas centrífugas.

### **2.5.1 FUERZAS QUE SE DESARROLLAN EN LA SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN**

Los separadores centrífugos se basan en el principio común de que la rotación de un objeto, en torno a un eje o punto central, a una distancia radial constante desde éste punto, produce una fuerza que actúa sobre dicho objeto. El objeto que gira en torno al eje cambia de dirección constantemente, con lo cual se produce aceleración, aún cuando la velocidad rotacional sea constante.

La aceleración de la fuerza centrífuga en un movimiento circular es:

$$a_e = rw^2 \text{ Ec. (19)}$$

Donde  $a_e$  es la aceleración causada por la fuerza centrífuga ( $m/s^2$  ó  $ft/s^2$ ),  $r$  es la distancia radial al centro de rotación ( $m$  ó  $ft$ ) y  $w$  es la velocidad angular en  $rad/s$ .

La fuerza centrífuga  $F_c$  ( $Nw$  ó  $lb_f$ ) que actúa sobre la partícula está dada por:

$$F_c = ma_e = mrw^2 \quad (\text{SI}) \quad \text{Ec. (20)}$$

$$F_c = \frac{mrw^2}{g_c} \quad (\text{Sistema inglés})$$

Aquí  $g_c = 32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft} / \text{lb}_f \cdot \text{s}^2$

Puesto que  $w=v/r$ , donde  $v$  es la velocidad tangencial de la partícula ( $m/s$  ó  $ft/s$ )

$$F_c = mr \left( \frac{v}{r} \right)^2 = \frac{mv^2}{r} \quad \text{Ec. (21)}$$

Las velocidades de rotación también se expresan en función de  $N$  (rpm)

$$w = \frac{2\pi N}{60} \quad \text{Ec. (22)}$$

$$N = \frac{60w}{2\pi} = \frac{60v}{2\pi r} \quad \text{Ec. (23)}$$

Sustituyendo la ecuación (23) en (21):

$$F_c (Nw) = mr \left( \frac{2\pi N}{60} \right)^2 = 0.01097 mr N^2 \quad (\text{SI}) \quad \text{Ec. (24)}$$

$$F_c (lb_f) = \frac{mr}{g_c} \left( \frac{2\pi N}{60} \right)^2 = 0.000341 mr N^2 \quad (\text{Sistema inglés})$$

La fuerza de gravedad sobre una partícula es  $F_g = mg$  Ec.(25)

Al dividir la ecuación (20) entre la (25) y sustituir la (22), se obtiene la expresión de la fuerza centrífuga en términos de la fuerza de gravedad.

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{r}{g} \left( \frac{2\pi N}{60} \right)^2 = 0.001118 r N^2 \quad (\text{SI}) \quad \text{Ec. (26)}$$

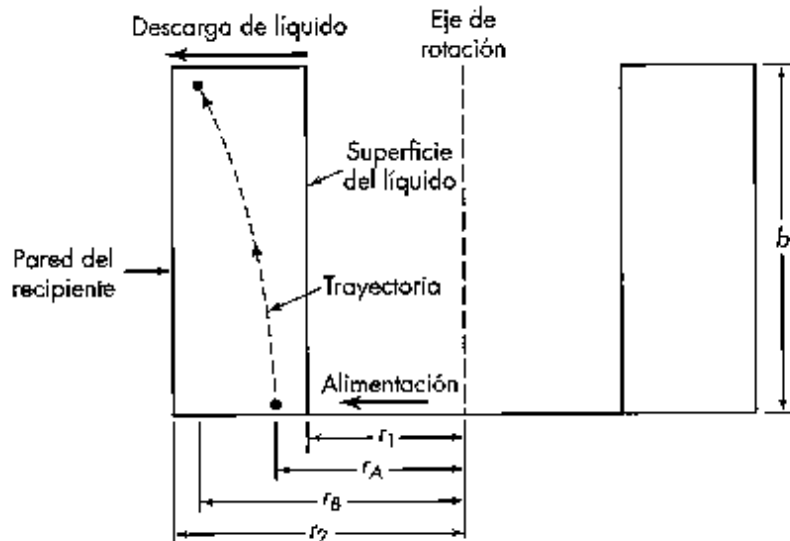
$$\frac{F_c}{F_g} = 0.000341 r N^2 \quad (\text{Sistema inglés})$$

La relación de velocidades de la partícula en la centrífuga, respecto de aquella observada con gravedad, se conoce como efecto centrífugo ó factor  $G = F_c/F_g$ . Por consiguiente, la fuerza que se desarrolla en una centrífuga es  $G$  veces mayor que la fuerza de gravedad.

## 2.5.2 FUNDAMENTOS DE LA CENTRIFUGACIÓN CONTINUA

En una centrífuga continua, la sedimentación se produce cuando las partículas que se alejan del centro de rotación colisionan con las paredes de la cesta, además, el tiempo de exposición de la fuerza centrífuga también influirá para que las partículas alcancen las paredes.

En la **Figura 9** se muestra un esquema de la dinámica de una centrífuga continua tubular, en donde el punto de alimentación está en la parte inferior y el punto de descarga en la superior. Supóngase que todo el líquido se mueve hacia arriba a través del recipiente con una velocidad constante y arrastrando consigo partículas sólidas. Una determinada partícula comienza a sedimentar en el fondo del recipiente para una cierta posición en el líquido (distancia  $r_A$  desde el eje de rotación). Su tiempo de sedimentación está limitado por el tiempo de resistencia del líquido en el recipiente, al final de este tiempo, supóngase que la partícula está a una distancia  $r_B$  del eje de rotación. Si  $r_B < r_2$ , la partícula abandona el recipiente con el líquido; si  $r_B = r_2$  se deposita en la pared del recipiente y se separa del líquido.



**Figura 9.** Trayectoria de una partícula en sedimentación centrífuga

Si la partícula sedimenta en el intervalo de la ley de Stokes, la velocidad terminal para el radio  $r$ , de acuerdo con la ecuación (13), es:

$$v_t = \frac{\omega^2 r (\rho_P - \rho) D_P^2}{18\mu} \quad \text{Ec.(27)}$$

Puesto que  $v_t$  es la velocidad de precipitación en sentido radial,  $v_t = dr/dt$

$$dt = \frac{18\mu}{\omega^2 (\rho_P - \rho) D_P^2} \frac{dr}{r} \quad \text{Ec.(28)}$$

Integrando la ecuación (28) entre los límites  $r = r_A$  a  $t = 0$  y  $r = r_B$  a  $t = t_T$  se obtiene

$$t_T = \frac{18\mu}{\omega^2 (\rho_P - \rho) D_P^2} \text{Ln} \frac{r_B}{r_A} \quad \text{Ec.(29)}$$

El tiempo de residencia  $t_T$  es igual al volumen de líquido  $V$  en el recipiente dividido entre el flujo volumétrico  $Q$ . El volumen es igual a  $\pi b (r_2^2 - r_1^2)$ . Al sustituir en la ecuación (29) y reordenando se tiene:

$$Q = \frac{\pi b \omega^2 (\rho_P - \rho) D_P^2}{18\mu} \frac{r_2^2 - r_1^2}{\text{Ln}(r_B/r_A)} \quad \text{Ec.(30)}$$

Se puede definir el punto de corte como el diámetro de la partícula que justamente alcanza la mitad de la distancia entre  $r_1$  y  $r_2$ . Si  $D_{PC}$  es el diámetro de corte, una partícula de este diámetro se desplaza una distancia  $y = (r_2 - r_1)/2$  durante el tiempo de sedimentación disponible. Si se ha de separar una partícula de diámetro  $D_{PC}$ , es preciso que alcance en el tiempo disponible la pared del recipiente. Por tanto,  $r_B = r_2$  y  $r_A = (r_1 + r_2)/2$  y la ecuación (55) se transforma entonces en:

$$Q_C = \frac{\pi b \omega^2 (\rho_P - \rho) D_{PC}^2}{18\mu} \frac{r_2^2 - r_1^2}{\text{Ln}[2r_2/(r_1 + r_2)]} \quad \text{Ec.(31)}$$

Aquí  $Q_C$  es la velocidad volumétrica de flujo correspondiente al diámetro de corte. Para esta velocidad de flujo, la mayoría de las partículas con diámetros mayores que  $D_{PC}$  serán eliminadas por la centrifuga y la mayoría de las partículas con diámetros inferiores permanecerán en el líquido.

### 2.5.3 VALORES SIGMA Y ESCALAMIENTO DE CENTRÍFUGAS

De una centrífuga tubular, se puede deducir una característica física útil, multiplicando y dividiendo la ecuación (31) por  $2g$  y luego sustituir la ecuación de la ley de Stokes.

$$Q_C = 2 \frac{(\rho_P - \rho)gD_{Pc}^2}{18\mu} \frac{\omega^2 \pi b(r_2^2 - r_1^2)}{2g \ln[2r_2/(r_1 + r_2)]} = 2v_t * \Sigma \quad \text{Ec.(32)}$$

Aquí  $v_t$  es la velocidad de sedimentación terminal en un campo gravitatorio.

$$\Sigma = \frac{\omega^2 \pi b(r_2^2 - r_1^2)}{2g \ln[2r_2/(r_1 + r_2)]} = \frac{\omega^2 V}{2g \ln[2r_2/(r_1 + r_2)]} \quad \text{Ec.(33)}$$

Donde  $V = \pi b(r_2^2 - r_1^2)$  es el volumen del líquido en el recipiente, cuya altura es  $b$  y  $\Sigma$  es una característica física de la centrífuga y no del sistema partícula-fluido que está siendo separado.

Físicamente  $\Sigma$  representa el área de la sección transversal de un dispositivo que opera bajo gravedad, pero tiene las mismas características de sedimentación que una centrífuga.

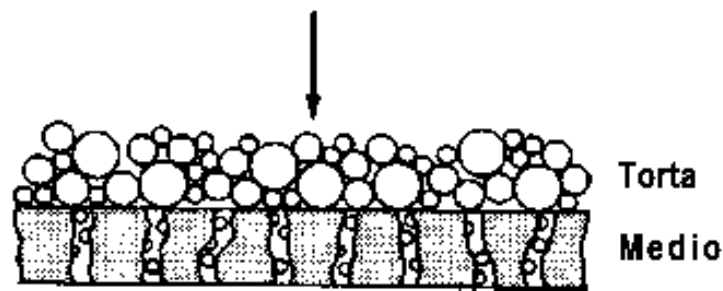
Para el escalamiento de centrífugas, se hace de la suposición de que las velocidades de sedimentación tienen que ser iguales,  $v_{t1} = v_{t2}$ , a partir de una prueba con un flujo volumétrico  $Q_1$  y un sigma  $\Sigma_1$ , hasta un flujo volumétrico  $Q_2$ , se puede usar la ecuación:

$$\frac{Q_1}{\Sigma_1} = \frac{Q_2}{\Sigma_2} \quad \text{Ec.(34)}$$

El procedimiento descrito para el escalamiento sólo se puede aplicar a centrífugas de tipo y geometrías similares, ó si las fuerzas centrífugas están dentro de un factor de 2, una de la otra. Para el caso de diferentes configuraciones, se tienen que usar factores de eficiencia ( $E$ ), donde  $Q_1 E_1 / \Sigma_1 = Q_2 E_2 / \Sigma_2$ . Estas eficiencias son determinadas experimentalmente o se pueden encontrar reportes para algunos tipos de centrífugas, en la bibliografía.

## 2.6 TEORIA DE FILTRACIÓN

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan usando un medio poroso que retiene las partículas y permite el paso del filtrado sin sólidos, el fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión.



**Figura 10.** Filtración de torta

Durante la filtración, las resistencias al flujo aumentan con el tiempo, a medida que el medio filtrante se va obstruyendo o se forma una torta de filtración. Las principales magnitudes de interés son la velocidad de flujo a través del filtro y la caída de presión en la unidad. A medida que transcurre el proceso, o bien disminuye la velocidad de flujo ó aumenta la caída de presión, en la llamada filtración a presión constante, la caída de presión permanece constante y la velocidad de flujo va disminuyendo con el tiempo, mientras que en la filtración a velocidad constante, la presión aumenta progresivamente para mantener un flujo.

En la filtración de torta (Figura 10) el líquido pasa a través de dos resistencias en serie: la de la torta y la del medio filtrante. La resistencia del medio filtrante normalmente sólo es importante durante las primeras etapas de la filtración. La resistencia de la torta es nula al principio y aumenta con el tiempo a medida que transcurre la filtración.

La caída total de presión en un instante cualquiera es la suma de las caídas de presión en el medio filtrante y en la torta. Si  $P_a$  es la presión a la entrada,  $P_b$  la presión en la salida y  $P'$  la presión en el límite de separación entre el medio filtrante y la torta, entonces:

$$\Delta P = P_a - P_b = (P_a - P') + (P' - P_b) = \Delta P_c + \Delta P_m \quad \text{Ec. (35)}$$

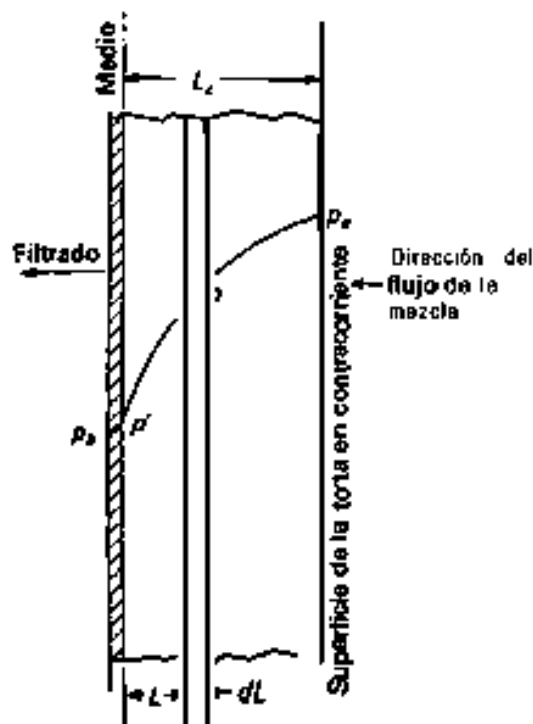
Aquí  $\Delta P$  = caída de presión global

$\Delta P_c$  = caída de presión en la torta

$\Delta P_m$  = caída de presión en el medio filtrante.

### 2.6.1 CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DE LA TORA DE FILTRACIÓN

La **Figura 11** muestra esquemáticamente la sección transversal de una torta de filtración y del medio filtrante, para un tiempo definido  $t$  a partir del comienzo del flujo de filtrado. Para este tiempo, el espesor de la torta medido desde el medio filtrante, es  $L_c$  y el área del filtro, medida perpendicularmente a la dirección de flujo, es  $A$ . Considérese la delgada capa de torta de espesor  $dL$ , situada en la torta a una distancia  $L$  del medio filtrante. Sea la presión en este punto  $p$ . Esta capa consta de un delgado lecho de partículas sólidas a través de las cuales fluye el filtrado.



**Figura 11.** Sección transversal del medio filtrante

En un lecho filtrante, la velocidad es suficientemente baja para asegurar que el flujo es laminar, en consecuencia, la caída de presión varía con la primera potencia de la velocidad y de manera inversa con el cuadrado del tamaño del

canal, de acuerdo con la ecuación de Hagen- Poiseuille para flujo laminar en tubos rectos:

$$\Delta P = \frac{32L\bar{u}\mu}{D^2} \quad \text{Ec.(36)}$$

Las ecuaciones para  $\bar{u}$  y  $D_{eq}$  se utilizan en la ecuación (36), y un factor de corrección  $\lambda_1$  se adiciona para considerar el hecho de que los canales son realmente tortuosos y no completamente rectos ni paralelos:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\bar{u}\mu}{D^2} = \frac{32\lambda_1\bar{u}_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\frac{4}{9}\varepsilon\Phi_S^2D_P^2\varepsilon^2} \quad \text{Ec.(37)}$$

ó

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72\lambda_1\bar{u}_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\Phi_S^2D_P^2\varepsilon^3} \quad \text{Ec.(38)}$$

Varios estudios han demostrado que la forma de la ecuación (38) es correcta, y los experimentos proporcionan una constante empírica de 150:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\bar{u}_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\Phi_S^2D_P^2\varepsilon^3} \quad \text{Ec. (39)}$$

La ecuación (39) se puede utilizar como punto de partida para el tratamiento de la caída de presión a través de la torta, teniendo en cuenta un cambio diferencial  $\Delta P/L=dP/dL$ . Si la velocidad del filtrado se representa por  $U$ , la Ecuación (39) se transforma en:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{150\mu u(1-\varepsilon)^2}{\Phi_S^2D_P^2\varepsilon^3} \quad \text{Ec. (40)}$$

La **Figura 11** muestra un gradiente de presión no lineal en la torta, que es típico debido a la porosidad más baja cerca del medio filtrante. A menudo la caída de presión se expresa como función de la relación superficie-volumen, en lugar del tamaño de partícula. La sustitución de  $6(V_P/S_P)$  por  $\Phi_S D_P$  en la ecuación (40) resulta:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{4.17\mu u(1-\varepsilon)^2(S_P/V_P)^2}{\varepsilon^3} \quad \text{Ec.(41)}$$

Donde:

$\frac{dP}{dL}$  = gradiente de presión para el espesor L

$\mu$ =viscosidad del filtrado

$u$ = velocidad lineal de filtrado

$S_p$ =superficie de una sola partícula

$V_p$ = volumen de una sola partícula

$\varepsilon$ = porosidad de la torta

La velocidad lineal  $u$  viene dada por:

$$u = \frac{dV/dt}{A} \quad \text{Ec.(42)}$$

Donde  $V$  es el volumen de filtrado recogido desde el comienzo de la filtración hasta el tiempo  $t$ . Puesto que el filtrado tiene que pasar a través de la torta,  $V/A$  tiene el mismo valor para todas las capas y  $u$  es independiente de  $L$ .

El volumen de sólidos en la capa es  $A(1-\varepsilon)dL$ , y si  $\rho_p$  es la densidad de las partículas, la masa  $dm$  de sólidos en la capa es:

$$dm = \rho_p(1 - \varepsilon)AdL \quad \text{Ec.(43)}$$

Dividiendo la ecuación (41) entre la ecuación (43) y despejando  $dP$  se obtiene

$$dP = \frac{k_1 \mu u(1-\varepsilon)(S_p/V_p)^2}{g_c \rho_p A \varepsilon^3} dm \quad \text{Ec.(44)}$$

Nótese que se utiliza  $k_1$  en vez del coeficiente 4.17 de la Ec. (41).

## 2.6.2 TORTAS DE FILTRACIÓN COMPRESIBLES E INCOMPRESIBLES

En la filtración a bajas caídas de presión de suspensiones que contienen partículas rígidas y uniformes, todos los factores del segundo miembro de la ecuación (44), excepto  $m$ , son independientes de  $L$ , y la ecuación es directamente integrable para el espesor de la torta. Si  $m_c$  es la masa total de sólidos en la torta, el resultado es:

$$\int_{P'}^{Pa} dP = \frac{k_1 \mu u (1-\varepsilon) (S_P/V_P)^2}{g_c \rho_P A \varepsilon^3} \int_0^{m_C} dm \quad \text{Ec.(45)}$$

$$Pa - P' = \frac{k_1 \mu u (1-\varepsilon) (S_P/V_P)^2}{g_c \rho_P A \varepsilon^3} m_C = \Delta P_C \quad \text{Ec.(46)}$$

Las tortas de filtración de este tipo reciben el nombre de **incompresibles**.

Para utilizar la ecuación (46) se define una resistencia específica de la torta,  $\alpha$ , por la ecuación

$$\alpha = \frac{\Delta P_C A}{\mu u m_C} \quad \text{Ec.(47)}$$

Aquí:

$$\alpha = \frac{k_1 (1-\varepsilon) (S_P/V_P)^2}{g_c \rho_P \varepsilon^3} \quad \text{Ec.(48)}$$

Para tortas incompresibles  $\alpha$  es independiente de la caída de presión y de la posición en la torta.

La mayor parte de las tortas que se encuentran en las operaciones industriales no están formadas por partículas rígidas individuales. La suspensión consiste en una mezcla de aglomerados, o flóculos, consistentes en débiles acoplamientos de partículas muy pequeñas, y la resistencia de la torta depende de las propiedades de los flóculos en vez de la geometría de las partículas individuales. Los flóculos se depositan sobre la cara de la torta situada aguas arriba y forma un complicado entramado de canalillos para los que la ecuación (47) no es estrictamente aplicable. La resistencia de tal suspensión depende del método utilizado en la preparación de la suspensión así como a la edad y temperatura del material. Por otra parte, los flóculos son distorsionados y rotos por las fuerzas existentes en la torta, de forma que los factores  $\varepsilon$ ,  $k_1$  y  $S_P/V_P$  varían de una capa a otra.

Una torta de filtración de este tipo se denomina **compresible**, y en ella  $\alpha$  varía de un lugar a otro; también varía con la presión aplicada y, en algunos casos, con el tiempo, en consecuencia, la ecuación (46) no es estrictamente aplicable.

Sin embargo, en la práctica, la variación de  $\alpha$  con el tiempo y la localización se suele ignorar. Un valor promedio se obtiene experimentalmente a ser filtrado, utilizando la ecuación (47).

### 2.6.3 RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE

La resistencia del medio filtrante  $R_m$ , se puede definir, por analogía con la ecuación (47), mediante la ecuación

$$R_m = \frac{P - P_b}{\mu u} = \frac{\Delta P_m}{\mu u} \quad \text{Ec. (49)}$$

La resistencia del medio filtrante  $R_m$  varía con la caída de presión, debido a que la velocidad más alta del líquido, causada por una caída de presión, hace que partículas adicionales de sólidos penetren en el medio filtrante. La resistencia  $R_m$  también varía con el tiempo y la limpieza del medio filtrante; pero como sólo es importante durante las primeras etapas de la filtración, casi siempre resulta satisfactorio suponer que es constante durante cualquier filtración y obtener su valor a partir de datos experimentales. Cuando  $R_m$  se trata como una constante empírica, incluye también cualquier resistencia al flujo que pueda existir en las líneas de acceso y salida del filtro.

A partir de las ecuaciones (47) y (49) se puede obtener:

$$\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_m = \mu u \left( \frac{m_C \alpha}{A} + R_m \right) \quad \text{Ec. (50)}$$

Estrictamente, la resistencia de la torta  $\alpha$  es una función de  $\Delta P_C$  en vez de  $\Delta P$ . Durante la etapa importante de la filtración, que es cuando la torta tiene un espesor apreciable,  $\Delta P_m$  es pequeño en comparación con  $\Delta P_C$  y el efecto sobre el valor de  $\alpha$  al efectuar la integración de la ecuación (46) sobre un intervalo de  $\Delta P$  en vez de  $\Delta P_C$ , puede ignorarse con toda seguridad.

Al utilizar la ecuación (50) es conveniente sustituir  $u$ , la velocidad lineal del filtrado, y  $m_C$ , la masa total de sólido en la torta, por funciones de  $V$ , el volumen total de filtrado recogido durante el tiempo  $t$ . La ecuación (42) relaciona  $u$  y  $V$ , y

un balance de masa relaciona  $m_c$ , y  $V$ . Si  $C$  es la masa de partículas depositadas en el filtro por unidad de volumen filtrado, la masa de sólidos en el filtro en el tiempo  $t$  es  $VC$ , y:

$$m_c = CV \quad \text{Ec.(51)}$$

La concentración del sólido en la suspensión que alimenta el filtro es levemente menor que  $C$ , dado que la torta húmeda contiene suficiente líquido como para llenar sus poros, y  $V$ , el volumen real de filtrado, es ligeramente menor que el total del líquido en la suspensión original. La corrección para esta retención de líquido en la torta se puede hacer mediante balances de masa, si así se desea. De este modo,  $m_F$  es la masa de torta húmeda, incluyendo el filtrado retenido en sus cavidades, y  $m_c$  es la masa de torta seca obtenida por lavado de la torta libre de material soluble y secado. Además,  $\rho$  es la densidad del filtrado. Entonces, si  $C_F$  es la concentración de sólidos en la suspensión, en kg por metro cúbico de líquido ingresado al filtro, el balance de masa tiene la forma:

$$C = \frac{C_F}{1 - \left(\frac{m_F}{m_c} - 1\right) \left(\frac{C_S}{\rho}\right)} \quad \text{Ec.(52)}$$

Sustituyendo  $u$  de la ecuación (42) y  $m_c$  de la ecuación (51) en la ecuación (50) se obtiene:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A\Delta P} \left( \frac{\alpha c V}{A} + R_m \right) \quad \text{Ec.(53)}$$

#### 2.6.4 FILTRACIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

Cuando  $\Delta P$  es constante, las únicas variables de la ecuación (53) son  $V$  y  $t$ . Cuando  $t=0$ ,  $V=0$  y  $\Delta P=\Delta P_m$ , se obtiene una constante de valor inicial:

$$\frac{\mu R_m}{A\Delta P} = \left( \frac{dt}{dV} \right)_0 = B \quad \text{Ec.(54)}$$

La ecuación (53) puede escribirse así:

$$\frac{dt}{dV} = K_C V + B \quad \text{Ec.(55)}$$

Donde

$$K_C = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} \quad \text{Ec.(56)}$$

La integración de la ecuación (55) entre los límites (0,0) y (t,V) resulta:

$$\frac{t}{V} = \left( \frac{K_C}{2} \right) V + B \quad \text{Ec.(57)}$$

Por lo tanto, una representación gráfica de  $t/V$  frente a  $V$  será una línea recta cuya pendiente será  $\frac{K_C}{2}$  y la ordenada al origen será  $B$ . A partir de una representación gráfica y de las ecuaciones (54) y (56) se calculan los valores de  $\alpha$  y  $R_m$ .

Realizando experimentos a presión constante para diferentes caídas de presión, se puede encontrar la variación de  $\alpha$  en función de  $\Delta P$ . Si  $\alpha$  es independiente de  $\Delta P$ , la torta es incompresible. Por lo general  $\alpha$  aumenta con  $\Delta P$ , ya que la mayor parte de las tortas son, por lo menos en alguna medida, compresibles. Para tortas altamente compresibles  $\alpha$  aumenta rápidamente con  $\Delta P$ .

Se pueden utilizar ecuaciones empíricas para ajustar los datos experimentales de  $\Delta P$  en función de  $\alpha$ , siendo la más frecuente

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^s \quad \text{Ec.(58)}$$

Aquí  $\alpha_0$  y  $s$  son constantes empíricas. La constante  $s$  se conoce como coeficiente de compresibilidad de la torta, es cero para tortas incompresibles y positivo para compresibles.

# CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Como se ha mencionado, la purga de lodos no es constante y se realiza cada 8 horas, con un volumen total del orden de  $800 \text{ m}^3$ , en un tiempo de purga de 30 a 45 minutos.

Durante el drenado de la purga, se presenta una estratificación en la concentración de arcilla en lodo, tanto en los diferentes tanques de sedimentación, como en las diferentes válvulas de cada tanque, siendo al inicio la mayor concentración y disminuyendo paulatinamente conforme se da el drenado.

Dada la estratificación en la concentración de lodos en la purga, fue necesario realizar la evaluación de los procesos de separación propuestos (sedimentación, centrifugación y filtración) a diferentes concentraciones de lodo, esto con el fin de establecer la dinámica de separación de los sólidos suspendidos.

Las concentraciones con las cuales se evaluó la capacidad de separación, se realizaron tomando muestra de lodo al inicio de la descarga ( $C_0$ ), para posteriormente realizar diluciones a un 50% ( $C_0/2$ ), un 25% ( $C_0/4$ ) y a un 12.5% ( $C_0/8$ ) de la concentración inicial.

Lo anterior debido a que no era práctico tomar muestras a diferentes tiempos de descarga y en las diferentes descargas del día para realizar la experimentación con cada una de estas muestras. De esta manera se encontró como varía cada proceso con la concentración de sólidos, ya que aparte de las variaciones que se tienen en las descargas, hay variación en las épocas de lluvias y las épocas de estiaje a lo largo del año.

La capacidad de remoción de sólidos de cada prueba de separación evaluada, se realizó cuantificando la concentración inicial y final de sólidos totales con base a la norma NMX-AA-034-SCFI-200. Además, con el fin de determinar en cual punto de la planta potabilizadora es factible recircular el agua recuperada, se le evaluó al clarificado los parámetros de color, turbidez, pH y conductividad,

siguiendo la metodología de las normas NMX-AA-045-SCFI-2001, NMX-AA-038-SCFI-2001, NMX-AA-008-SCFI-2011 y NMX-AA-093-SCFI-2000 respectivamente.

Adicionalmente, con el fin de corroborar el balance de masa y evaluar la posible aplicación del lodo, en la manufactura de productos con valor agregado, se evaluó la humedad de este, de acuerdo a la siguiente técnica:

- Poner una cápsula de porcelana a peso constante ( $W_p$ ).
- Pesarse la cápsula de porcelana con una cantidad de torta ( $W_{pt}$ ).
- Llevar la cápsula de porcelana con torta a una estufa, para evaporar el agua presente en la muestra, por alrededor de 16 horas a una temperatura de 110°C.
- Posteriormente se coloca la cápsula de porcelana en un desecador, en donde se estabilizará su contenido de humedad, aproximadamente por 2 horas.
- Una vez concluido este período de tiempo se procede a pesar la cápsula de porcelana con la muestra restante ( $W_s$ ).
- Concluyendo el análisis, se realiza el cálculo con la siguiente ecuación y se obtiene el porcentaje de humedad presente en la muestra.

$$\%H = \left(1 - \frac{W_s - W_p}{W_{pt} - W_p}\right) \times 100 \quad \text{Ec.(59)}$$

A continuación se describirá la metodología para cada uno de los procesos de separación propuestos.

### 3.1 SEPARACIÓN POR SEDIMENTACIÓN

La evaluación de la separación por sedimentación se realizó con las concentraciones de 32 g/L ( $C_o$ ), 16 g/L ( $C_o/2$ ) y 8 g/L ( $C_o/4$ ), a diferentes condiciones de áreas de sección transversal y longitud de sedimentación, mediante probetas con las dimensiones que se muestran en la **Tabla 1**. Cabe hacer mención que la concentración de 32 g/L, fue la que obtuvo al inicio del muestreo de la purga en el mes de noviembre.

**Tabla 1.** Dimensiones de probetas

Número de probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)
1	5.0	26.5
2	6.1	34.3
3	7.7	21.5
4	9.0	90.0
5	16.0	22.0

Debido a que para este proceso sólo se identificaron dos variables que afectan la velocidad de sedimentación, las cuales fueron concentración y área de sección transversal, se realizó un diseño de experimentos factorial. El diseño de experimentos para las pruebas de sedimentación se muestra en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Diseño de experimentos para la sedimentación

	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>
<b>A1</b>	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5
<b>A2</b>	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5
<b>A3</b>	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5
<b>A4</b>	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5

Aquí:

A: Concentración de sólidos totales ( $C_o$ ,  $C_o/2$ ,  $C_o/4$  y  $C_o/8$ )

B: Área de sección transversal (Probetas con diámetro (cm): 5, 6.1, 7.7, 9 y 16)

Para las concentraciones en las cuales se evaluó la velocidad de sedimentación, se presentó una capa límite entre la zona de los sólidos concentrados y el clarificado conforme transcurrió la prueba, comportamiento que indica que las partículas se clasifican como Tipo III (sedimentación por zona) y Tipo IV (zona de compresión o compactación), fenómeno que se presenta por la alta interacción entre ellas.

Como se mencionó en el marco teórico, lo que se requiere para estimar la velocidad de sedimentación a determinada área y concentración de sólidos totales son datos de la altura de la interfase y el tiempo que tarda en llegar a tal altura, para posteriormente graficarlos y analizar dicha gráfica por el método de Kynch.

### 3.2 SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN

Para la evaluación de la separación de los lodos por centrifugación, se realizaron pruebas a nivel planta piloto en una supercentrífuga tubular marca Sharples, modelo T 41, cuya imagen se muestra en la **Figura 12**.



**Figura 12.** Supercentrífuga Tubular

La realización de las pruebas se llevó a cabo considerando tres velocidades (7, 000 rpm, 10, 000 rpm y 15,000 rpm) y 4 concentraciones de lodo ( $C_0$ ,  $C_0/2$ ,  $C_0/4$  y  $C_0/8$ ), considerando la concentración inicial de 48.5 g/L. El diseño del experimento se muestra en la **Tabla 3** y los parámetros de seguimiento de la eficiencia de separación fueron; sólidos totales, turbidez, color, conductividad y pH, en el clarificado.

**Tabla 3.** Diseño de experimentos para las pruebas de centrifugación

Velocidades (A)	7.7 g/L (B1)	13.7 g/L (B2)	25.6 g/L (B3)	48.5 g/L (B4)
7000 (A1)	A1 B1	A1 B2	A1 B3	A1 B4
10000 (A2)	A2 B1	A2 B2	A2 B3	A2 B4
15000 (A3)	A3 B1	A3 B2	A3 B3	A3 B4

La evaluación de la operación del equipo de centrifugación se realizó a través de la medición del flujo volumétrico y volumen de suspensión tratado. El tiempo de residencia fue evaluado mediante la relación del volumen del rotor y el flujo volumétrico. El factor G fue otro parámetro determinado, el cual es la relación entre la fuerza centrífuga y la fuerza gravitatoria, dicha determinación se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$G=0.001118 r N^2 \text{ Ec. (26)}$$

Aquí:

r = radio (m) = 0.0225m

N= revoluciones por minuto (rpm)

### 3.3 SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN

Para la evaluación de la separación sólido-líquido a través del proceso de filtración, se realizaron algunas pruebas preliminares en un filtro prensa, utilizando un material de filtración con tamaño de poro de 0.75  $\mu\text{m}$ , dicho material se utilizó debido a que se tomó como referencia la distribución de tamaño de aglomerado plasmado en la **Figura 5**, donde se observa que un porcentaje superior al 80%, se encuentra en el intervalo de 0 a 6  $\mu\text{m}$ .

Al llevar a cabo las pruebas, se presentó la problemática de la rápida formación de una torta demasiado compacta y delgada, lo que impedía que se siguiera llevando a cabo el proceso de filtración de una manera correcta.

Debido a la problemática antes mencionada, se realizaron pruebas a presión atmosférica y a una sola concentración de sólidos, donde se evaluaron siete diferentes materiales industriales de filtración, y se utilizó caolín como filtro ayuda en 3 diferentes concentraciones (5%, 10% y 15%), lo anterior con el fin

de determinar la condición mediante la cual se llevará a cabo una mejor separación, dichas pruebas fueron llevadas a cabo a nivel laboratorio.

Debido a que dos de los siete materiales utilizados, presentaron resultados similares en las pruebas realizadas, se procedió a efectuar una segunda etapa de pruebas, en donde con éstos dos materiales se llevaron a cabo separaciones a diferentes concentraciones de sólidos, diferentes concentraciones de caolín y diferente caída de presión ( $\Delta P$ ).

Una vez encontrado el material que logró una mejor separación, se procedió a realizar pruebas con éste, llevando a cabo filtraciones a presión constante y con diferentes concentraciones de sólidos. Dichas pruebas se efectuaron a nivel piloto, en el filtro prensa que se muestra en la siguiente Figura.



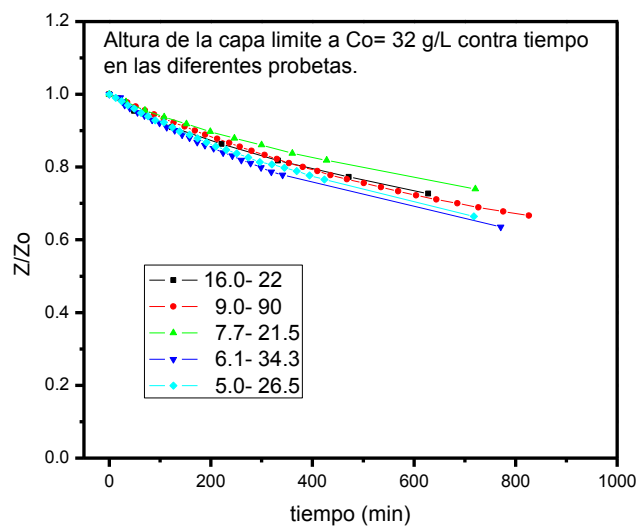
**Figura 13.** Filtro Prensa

# CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 4.1 SEPARACIÓN POR SEDIMENTACIÓN

### Sedimentación a 32 g/L

Los resultados de las velocidades de sedimentación a 32 g/L se muestran en la **Figura 14**, en donde el eje X, representa el tiempo durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra la altura adimensionalizada ( $Z/Z_0$ ) de la capa límite de sólidos. El comportamiento de la velocidad de sedimentación es típico de la zona de compactación (Tipo IV), en donde prácticamente no existe dependencia con el diámetro y altura del recipiente de prueba, esto debido a la elevada concentración de sólidos.

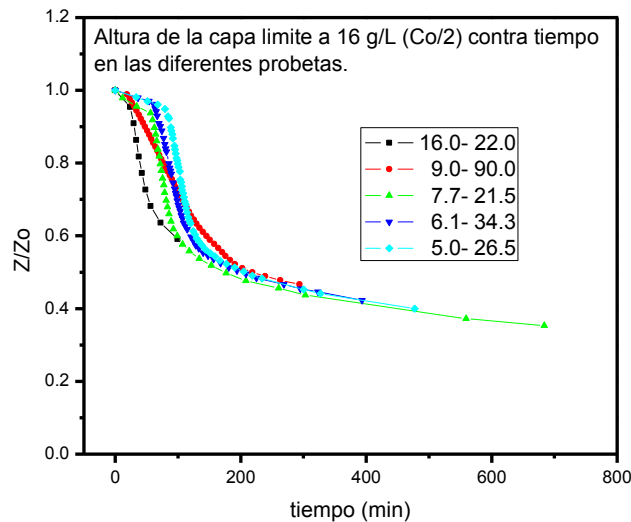


**Figura 14.** Sedimentación de partículas a 32 g/L

### Sedimentación a 16 g/L

Los resultados de las velocidades de sedimentación a 16 g/L se muestran en la **Figura 15**, en donde el eje X, representa el tiempo durante el cual se realizó la

prueba y en el eje Y, se muestra la altura adimensionalizada ( $Z/Z_0$ ) de la capa límite de sólidos.



**Figura 15.** Sedimentación de partículas a 16 g/L

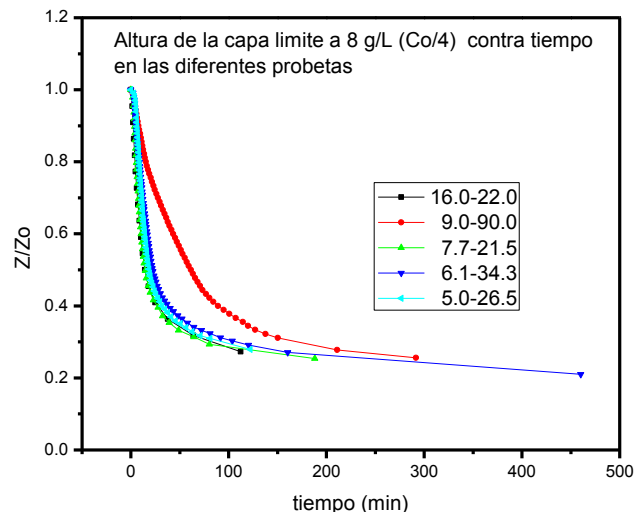
En ésta, se observa que en las primeras etapas de la prueba existe un periodo de “resistencia”, en el cual el desplazamiento de la capa límite es “lento”, debido a que la velocidad de ascensión del agua se ve impedida por la interacción con la capa de sólidos superficiales; una vez que el agua ha logrado generar cavidades a través de las cuales puede ascender, la velocidad de los sólidos empieza a aumentar por efecto de la aglomeración de los mismos, hasta la zona denominada de transición en donde la velocidad de sedimentación disminuye por efecto de las fuerzas de empuje del agua, hasta llegar a la última zona (de compactación) en donde la concentración es lo suficientemente alta, para que la sedimentación de los sólidos se ve impedida por la capa de sólidos que se encuentra en el fondo.

La velocidad de desplazamiento de la capa límite en ésta prueba en términos generales depende del diámetro de la probeta, siendo directamente proporcionales, ya que se presenta mayor velocidad de sedimentación conforme aumenta el área, hasta llegar al punto de transición en donde prácticamente se igualan éstas. Una particularidad que se presenta en ésta prueba es en la probeta de 9.0 centímetros de diámetro y 90 centímetros de altura, en la cual prácticamente no se observa la resistencia inicial y el

comportamiento de la capa límite es diferente al observado en las otras probetas, fenómeno que puede ser explicado debido a que al tener mayor altura la probeta, existe más espacio para el desplazamiento de las partículas con menor interacción entre ellas, lo que a su vez provoca menor aglomeración y como consecuencia menor velocidad de sedimentación.

### Sedimentación a 8 g/L

Los resultados de las velocidades de sedimentación a 8 g/L se muestran en la **Figura 16**, en donde el eje X, representa el tiempo durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra la altura adimensionalizada ( $Z/Z_0$ ) de la capa límite de sólidos.



**Figura 16.** Sedimentación de partículas a 8 g/L

En la **Figura 16** se observa que, las velocidades de sedimentación son altas y los perfiles de sedimentación, a ésta concentración, son similares e independientes del diámetro, ya que se presenta un perfil similar de la capa límite, lo cual es debido a que la concentración de sólidos es tan baja, que no existe impedimento en la velocidad de ascensión del agua en la probeta. De igual manera que para la sedimentación de partículas a 16 g/L, la sedimentación de la probeta de 9 cm de diámetro y 90 cm de altura, tiene un comportamiento diferente de las demás debido a la altura, lo cual, como ya se mencionó anteriormente provoca menor aglomeración y por lo tanto menor velocidad de sedimentación.

Existe una concentración final mínima en la cual se da la sedimentación por zona, y esa concentración es 8 g/L, ya que al querer hacer pruebas por debajo de esta concentración, ya no se formaba una capa límite definida, dicha capa se comenzaba a denotar ya a alturas muy bajas en cada una de las diferentes probetas en las cuales se realizó la experimentación.

### Cálculo del área de sedimentación

Para determinar el área de sedimentación necesaria para la separación de las partículas a cada concentración en función del diámetro evaluado, fue necesario primeramente determinar las velocidades de sedimentación de cada curva característica, para la zona de clarificado ( $V_c$ ) y la zona de transición ( $V_u$ ). Estas velocidades fueron obtenidas a partir del método de Kynch (**Anexo 1**), y los resultados se muestran en la **Tabla 4**, en donde se observa que a medida que disminuye la concentración de sólidos, aumentan las velocidades de sedimentación, debido a los motivos antes mencionados. Comparando los valores de las velocidades de clarificado y transición, se observa que las velocidades en la zona de clarificación son superiores a las de la zona de transición. También se observa que los cambios de velocidad con respecto al diámetro de la probeta son directamente proporcionales; es decir conforme aumenta el diámetro también se incrementa la velocidad, excepto para la probeta 4 en la cual la profundidad provoca variaciones en la velocidad de sedimentación.

**Tabla 4.** Velocidades de sedimentación

Diámetro	32 g/L		16 g/L		8 g/L	
Probeta(cm)	$V_c$ (cm/min)	$V_u$ (cm/min)	$V_c$ (cm/min)	$V_u$ (cm/min)	$V_c$ (cm/min)	$V_u$ (cm/min)
5.0	0.059	0.037	0.333	0.102	0.981	0.084
6.1	0.075	0.042	0.344	0.064	1.039	0.110
7.7	0.043	0.028	0.358	0.049	1.075	0.146
9.0	0.118	0.045	0.450	0.142	1.525	0.249
16.0	0.051	0.017	0.356	0.074	1.294	0.221

Utilizando los datos de las velocidades de sedimentación, mediante las ecuaciones 17 y 18, se realizó el cálculo del área necesaria para el espesamiento ( $A_e$ ) y clarificación ( $A_c$ ) de la corriente residual de la planta, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Áreas de sedimentación

Diámetro	32 g/L		16 g/L		8 g/L	
	Ac(m <sup>2</sup> )	Ae(m <sup>2</sup> )	Ac(m <sup>2</sup> )	Ae(m <sup>2</sup> )	Ac(m <sup>2</sup> )	Ae(m <sup>2</sup> )
5.0	5606.90	4741.40	997.20	1326.46	338.67	809.05
6.1	4428.77	3895.77	966.28	1780.71	319.80	617.80
7.7	7730.23	6736.90	927.47	2319.07	309.21	521.79
9.0	2810.63	2974.98	738.67	739.59	217.91	290.85
16.0	6572.45	<b>9473.40</b>	933.89	1552.46	256.85	362.62

Se observa que a medida que disminuye la concentración de sólidos, se requiere de áreas menores, tanto para la clarificación como para el espesamiento, lo cual es debido a que por las razones antes expuestas, a medida que disminuye la concentración, aumentan las velocidades de sedimentación.

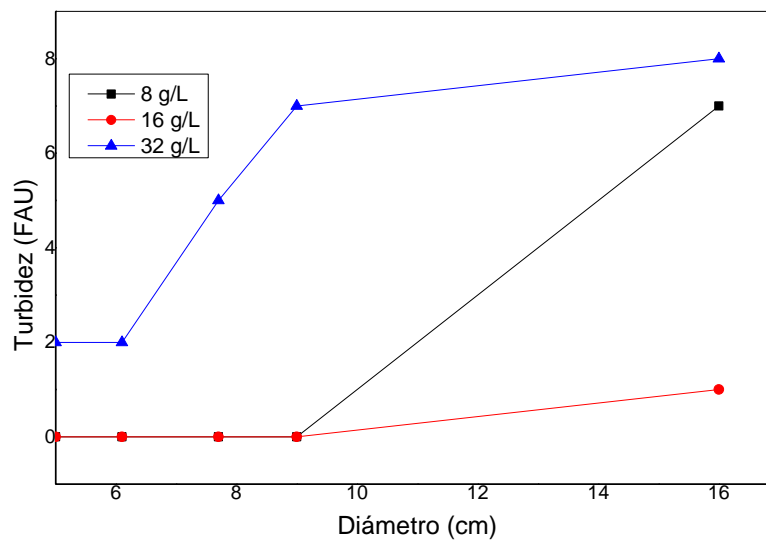
Como se requiere de un área para la clarificación y otra área para el espesamiento, el diseño del sedimentador se tiene que hacer con el área mayor, que por lo general en todos los casos antes mencionados, es el área de espesamiento.

En los resultados de las áreas se puede observar que, para la condición crítica que es la de mayor concentración de sólidos ( $C_o=32$  g/L), se presenta el mayor requerimiento de área para lograr la separación del clarificado.

**Tabla 6.** Porcentaje de remoción de sólidos mediante sedimentación

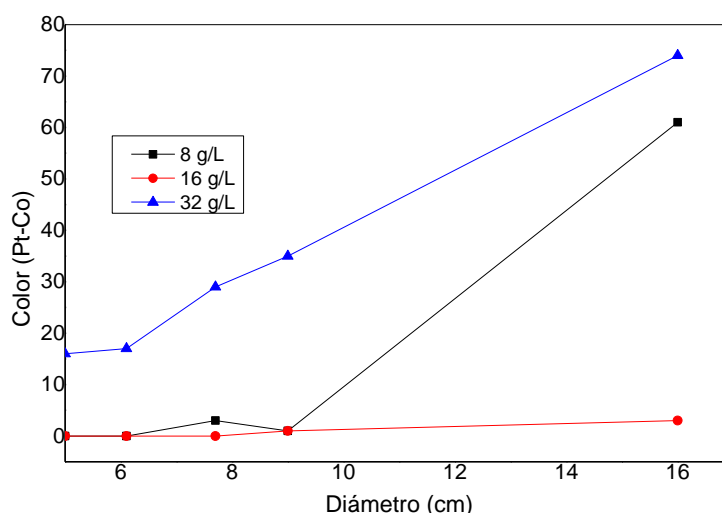
Diámetro	%REMOCIÓN		
	8 g/L	16 g/L	32 g/L
5	96.77	98.81	99.56
6.1	96.54	98.73	99.59
7.7	96.21	98.68	99.52
9	96.31	98.64	99.41
16	96.09	98.66	99.50
<b>promedio</b>	<b>96.38</b>	<b>98.71</b>	<b>99.52</b>

En la **Tabla 6** se observa que conforme se incrementa la concentración de sólidos, aumenta el porcentaje de remoción de los mismos, esto es debido a que al existir mayor número de partículas sólidas, se lleva a cabo un mejor barrido entre las mismas, aunado a esto, hay más posibilidades de que se aglomeren y formen flóculos de mayor tamaño que puedan sedimentar más fácilmente.



**Figura 17.** Turbidez vs Área de sección transversal

En la **Figura 17** se puede apreciar que para las tres diferentes concentraciones de sólidos, existe una relación directamente proporcional entre el diámetro de las probetas y los valores de turbidez de los clarificados provenientes de ellas, lo cual se debe a que al existir un diámetro menor, se forma una capa límite de sólidos más compacta, lo que provoca mejor efecto de barrido entre las partículas, como consecuencia, los clarificados tienen menor cantidad de sólidos y se tornan menos turbios.



**Figura 18.** Color vs Área de sección transversal

La **Figura 18** denota que conforme se incrementa el diámetro de las probetas, aumentan los valores de color aparente en los clarificados, debido a que se presenta un fenómeno similar al de la turbidez, es decir, al incrementar el diámetro de las probetas, la interacción entre las partículas de la capa límite es menor, motivo por el cual no se lleva a cabo un buen barrido, lo que también provoca que el líquido que asciende encuentre menos resistencia y puedan pasar partículas sólidas hacia el clarificado con mayor facilidad.

**Tabla 7.** pH de los clarificados a diferentes áreas

Diámetro Probeta(cm)	pH		
	8 g/L	16 g/L	32 g/L
5	6.4	6.7	6.7
6.1	6.5	6.2	6.6
7.7	6.3	6.3	6.6
9	6.6	6.4	6.7
16	6.6	6.5	6.6

En la **tabla 7** se puede observar que los valores de pH para todos los clarificados, están por debajo del punto neutro, lo cual se debe a los iones subproductos de las reacciones de coagulación-floculación que se llevan a cabo en el proceso de potabilización del agua (**Anexo 2**).

**Tabla 8.** Conductividad de los clarificados mediante sedimentación

Diámetro Probeta(cm)	Conductividad $\mu\text{s/cm}$		
	8 g/L	16 g/L	32 g/L
5	474	341	326
6,1	475	344	326
7,7	475	344	329
9	479	346	333
16	481	352	335

En la **Tabla 8** se puede observar que al aumentar la concentración de sólidos, disminuye la conductividad en los clarificados, lo cual se atribuye a que conforme aumenta la concentración de sólidos, existe mayor remoción de los mismos y por consecuencia los clarificados poseen una menor conductividad eléctrica, ya que los silicatos (compuestos inorgánicos, generalmente buenos conductores) presentes en la arcilla del agua residual sedimentan hacia el fondo de las probetas, dejando a los clarificados libre de ellos.

**Tabla 9.** Porcentaje de humedad de los lodos provenientes de la sedimentación

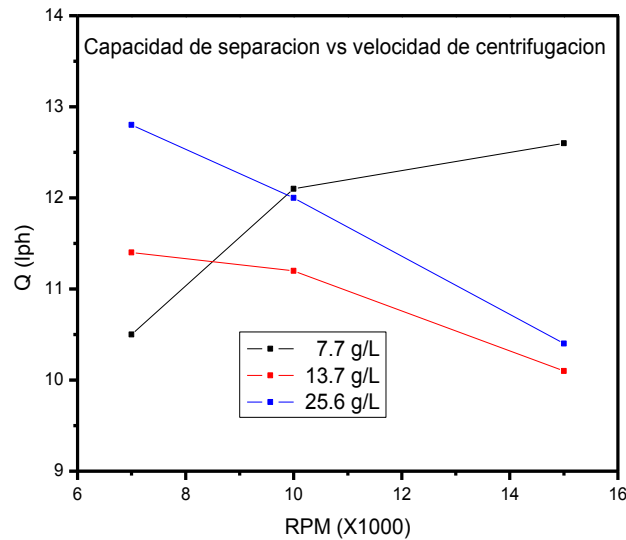
Diámetro Probeta(cm)	% HUMEDAD DEL LODO		
	8 g/L	16 g/L	32 g/L
5	96.93	97.02	95.52
6.1	96.94	98.09	95.23
7.7	97.26	96.46	95.78
9	97.17	96.22	95.08
16	97.48	96.50	95.28
<b>promedio</b>	<b>97.15</b>	<b>96.86</b>	<b>95.38</b>

En la **Tabla 9** se observa que existe una relación inversamente proporcional entre la concentración de sólidos y el porcentaje de humedad que tienen los lodos provenientes de la separación, esto se debe a que al haber menor concentración de sólidos, disminuye la fuerza de gravedad ejercida sobre ellos, por lo tanto hay una menor fuerza de compactación en las zonas bajas, lo que conlleva a que no haya una correcta expulsión del agua atrapada entre los flóculos pertenecientes a dichas zonas, consecuentemente, queda más agua en la zona inferior de las probetas (más humedad en el lodo) y menos agua en el clarificado (menor remoción).

## 4.2 SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN

**Tabla 10.** Resultados de las pruebas de centrifugación

rpm	7.7 g/L		13.7 g/L		25.6 g/L		48.5 g/L		G
	Q(lph)	Tr(min)	Q(lph)	Tr(min)	Q(lph)	Tr(min)	Q(lph)	Tr(min)	
7000	10.48	1.74	11.43	1.59	12.82	1.42			1232.6
10000	12.07	1.51	11.18	1.66	12.04	1.52			2515.5
15000	12.62	1.44	10.11	1.81	10.41	1.76			5659.8
32000							11.22	1.64	25758.7



**Figura 19.** Capacidad de separación vs velocidad de centrifugación

En la **Figura 19** se observa el comportamiento de la capacidad de tratamiento de la centrífuga tubular en función de la velocidad de centrifugación, en la cual se observa que cuando se tiene la concentración de 7.7 g/L, a medida que aumentan las revoluciones de la centrífuga aumenta el flujo volumétrico, esto es debido a que a la concentración tan baja que se tiene de sólidos, la fuerza centrífuga no tiene efecto significativo que desplace la solución hacia las paredes del rotor y por ende la suspensión tiende a salir más rápido del equipo de centrifugación.

En dicha figura también se observa que para las concentraciones de 13.7 g/L y 25.6 g/L, la relación entre velocidad de centrifugación y la capacidad de tratamiento es inversamente proporcional, lo cual se debe a que al tener una concentración de sólidos más elevada, la fuerza centrífuga que actúa sobre la solución se intensifica a medida que aumenta la velocidad de centrifugación, por tal motivo los sólidos se desplazan con mayor fuerza hacia la pared del rotor para separarse y provocan una resistencia al flujo ascendente de la solución. Aunado a esto, la capa de sólidos que se depositan en la pared del rotor aumenta paulatinamente, lo cual va disminuyendo el diámetro mediante el cual puede circular la solución y por ende también limita su paso.

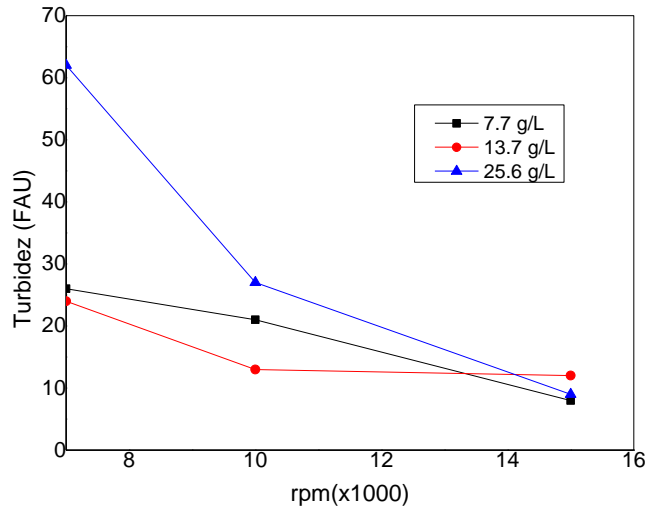
Cabe mencionar que en la gráfica de la **Figura 19** no aparecen resultados del comportamiento que se tuvo para la concentración de 48.5 g/L, debido a que a ésta concentración sólo se pudo llevar a cabo la separación a 32000 rpm, por la misma razón se muestra solo este resultado en la **Tabla 10**.

A través de la evaluación de sólidos totales al inicio de la corrida experimental y del clarificado, se determinó el porcentaje de remoción de cada prueba, dichos resultados se muestran en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Porcentajes de remoción de sólidos mediante centrifugación

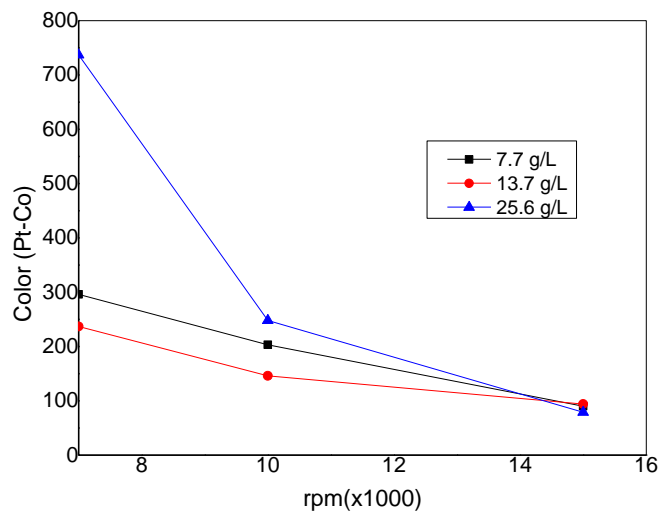
rpm	%REMOCIÓN			
	7.7 g/L	13.7 g/L	25.6 g/L	48.5 g/L
<b>7000</b>	95.3	97.7	98.9	
<b>10000</b>	95.7	97.7	99.0	
<b>15000</b>	95.6	97.9	99.1	
<b>32000</b>				99.6

En la **Tabla 11** se puede observar que a medida que se incrementan las revoluciones por minuto y la concentración de sólidos, aumenta el porcentaje de remoción de los mismos, esto es debido a que la fuerza centrífuga es directamente proporcional a la masa y a la aceleración, lo que conlleva a que se logre una separación mayor al elevar la concentración y la velocidad, tanto por el desarrollo de una fuerza superior, como por efecto de barrido que generan las propias partículas al desplazarse radialmente hacia la pared.



**Figura 20.** Turbidez de los clarificados a diferentes rpm

En la **Figura 20** se puede observar que para todas las concentraciones de sólidos, las lecturas de turbidez de los clarificados disminuyeron a medida que se aumenta la velocidad de centrifugación, lo cual se debe a que al incrementar las revoluciones de la centrífuga se logra una mayor separación de sólidos suspendidos y por ende el clarificado se torna menos turbio.



**Figura 21.** Color de los clarificados a diferentes rpm

En la **Figura 21** se puede observar que para el caso de las lecturas de color aparente de los clarificados, se presenta un fenómeno similar al de la turbidez, en donde para cada una de las concentraciones de sólidos, existe una relación inversamente proporcional entre la velocidad de centrifugación y el color, teniendo la misma razón, es decir, al aumentar la velocidad de la centrifuga se

logra una mayor remoción de sólidos, lo que provoca que clarificado sea más transparente.

**Tabla 12.** pH de los clarificados a diferentes rpm

rpm	pH			
	7.7 g/L	13.7 g/L	25.6 g/L	48.5 g/L
<b>7000</b>	6.4	6.8	7.0	
<b>10000</b>	6.3	6.3	6.9	
<b>15000</b>	6.1	6.8	6.5	
<b>32000</b>				5.8

En la **Tabla 12** se observa que por lo general se tienen pH ácidos en los clarificados, esto es debido a que en las reacciones de coagulación-floculación que se llevan a cabo en el proceso de potabilización del agua, se generan iones H<sup>+</sup>.

**Tabla 13.** Conductividad de los clarificados a diferentes rpm

rpm	Conductividad (µs/cm)			
	7.7 g/L	13.7 g/L	25.6 g/L	48.5 g/L
<b>7000</b>	511	482	400	
<b>10000</b>	511	486	411	
<b>15000</b>	514	487	411	
<b>32000</b>				312

En la **Tabla 13** se observa que a medida que se incrementa la concentración de sólidos, disminuye la conductividad en los clarificados, esto se debe a que existe una mayor remoción de sólidos al elevar la concentración de los mismos (como se plasma en la tabla 7) y consecuentemente los clarificados tienen menor conductividad eléctrica.

**Tabla 14.** Porcentaje de humedad promedio de los lodos provenientes de la centrifugación

	%Humedad lodo
<b>7.7 g/L</b>	75.83
<b>13.7 g/L</b>	73.01
<b>25.6 g/L</b>	72.78
<b>48.5 g/L</b>	58.03

En la **Tabla 14** se observa que existe una relación inversamente proporcional entre la concentración de sólidos y el porcentaje de humedad que tienen los lodos provenientes de la separación, como se ha mencionado, se logra una mejor remoción de sólidos cuando se incrementa la concentración de los mismos, por dicha razón una mayor cantidad de agua se desplaza al clarificado y los lodos producidos contienen menor humedad.

### 4.3 SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN

**Tabla 15.** Clarificados de pruebas con diferentes materiales de filtración

Material	Caolín	%Remoción	Conductividad ( $\mu\text{S}$ )	Turbidez (FAU)	Color (Pt-Co)
<b>Poliéster S-22</b>	0%	93.56	470	30	390
	5%	93.56	530	54	338
	10%	94.10	540	40	222
	15%	93.86	550	23	127
<b>321-61.5</b>	0%	93.17	460	60	673
	5%	93.68	530	83	715
	10%	93.92	530	35	194
	15%	93.02	720	34	260
<b>Poliéster F-4629</b>	0%	89.07	470	25	194
	5%	87.38	540	401	2545
	10%	91.46	540	198	1485
	15%	90.21	550	240	1880
<b>Nylon 840-466</b>	0%	36.38	440	15900	25000
	5%	89.95	530	243	1825
	10%	90.64	530	170	1570
	15%	93.17	550	187	1575
<b>Polipropileno</b>	0%	67.85	450	1374	13450
	5%	75.88	510	2986	11600
	10%	74.70	530	1006	10325
	15%	66.66	520	1625	15635
<b>P.P.-3000</b>	0%	12.12	450	4510	33900
	5%	36.47	490	3394	24250
	10%	40.80	510	1714	23000
	15%	30.40	490	3774	35450
<b>Poliéster Ahujado</b>	0%	17.08	450	4371	29600
	5%	1.08	490	5276	37700
	10%	0.61	500	5249	37400
	15%	5.10	510	5302	45200

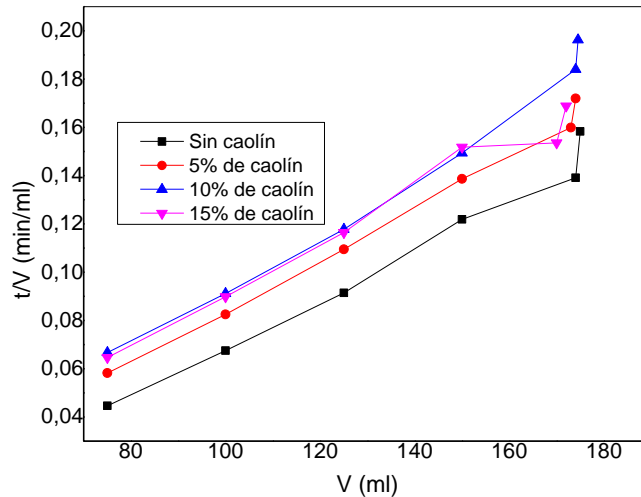
En la **Tabla 15**, se muestran para todos los materiales de filtración evaluados, los porcentajes de remoción promedio y los parámetros de turbidez, color y conductividad en los clarificados, dichas pruebas se llevaron a cabo a presión atmosférica y a una sola concentración de sólidos.

En la **Tabla 15** se puede observar que los materiales “Poliéster S-22” y “321-61.5” presentan resultados similares, estos dos materiales fueron los que lograron mayores porcentajes de remoción y por ende menores valores de turbidez, color y conductividad en los clarificados. Debido a esto se realizó una segunda etapa de pruebas, en donde con los dos materiales antes mencionados, se realizaron pruebas de filtración a muestras con diferentes concentraciones de sólidos, éstas pruebas se llevaron a cabo a una presión de vacío de 15 inHg.

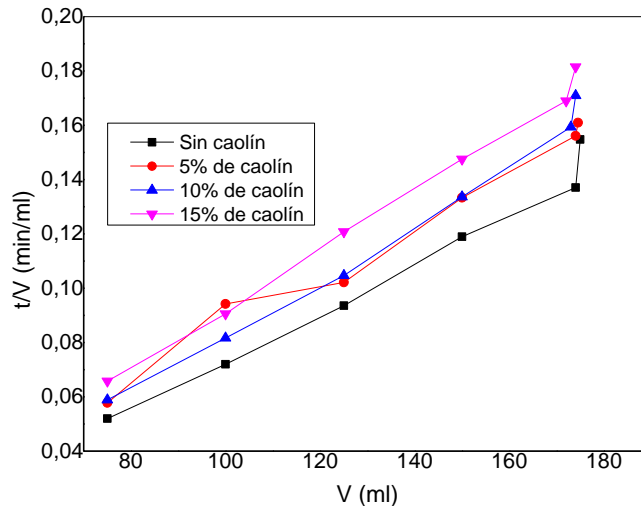
Los resultados de la segunda etapa de pruebas, se presentan a continuación, para cada concentración de sólidos y para los dos materiales que dieron mejor resultados en las primeras pruebas.

#### **Filtración a 49.44 g/L**

Los resultados para los materiales de filtración “Poliéster S-22” y “321-61.5” a 49.44 g/L se muestran en las **Figuras 22** y **23**, respectivamente, en donde el eje X, representa el volumen de filtrado recolectado a diferente tiempo, durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra el tiempo en el cual se realiza la prueba dividido por el volumen de clarificado recolectado en dicho tiempo (t/V).



**Figura 22.** Resultados para "Poliéster S-22" a 49.44 g/L



**Figura 23.** Resultados para "321-61.5" a 49.44 g/L

En las **Figuras 22 y 23** se observa el comportamiento esperado de una línea recta, según la ecuación (57), para cada una de las concentraciones de caolín, con las cuales se llevó a cabo la prueba de filtración. En dichas figuras se observa el mismo comportamiento, es decir, conforme aumenta el porcentaje de caolín, aumenta la pendiente de la curva de operación, lo cual conlleva a que exista una resistencia mayor de la torta de filtración y se pueda lograr una mejor separación sólido-líquido. En ambas figuras también se observa que, para la concentración de 49.44 g/L de sólidos en las muestras, las curvas de operación se encuentran muy cercanas, lo cual indica que no existe una

diferencia significativa en la filtración, cuando se adiciona caolín como filtro ayuda.

### Filtración a 22.04 g/L

Los resultados para los materiales de filtración “Poliéster S-22” y “321-61.5” a 22.04 g/L se muestran en las Figuras 24 y 25, respectivamente, en donde el eje X, representa el volumen de filtrado recolectado a diferente tiempo, durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra el tiempo en el cual se realiza la prueba dividido por el volumen de clarificado recolectado en dicho tiempo ( $t/V$ ).

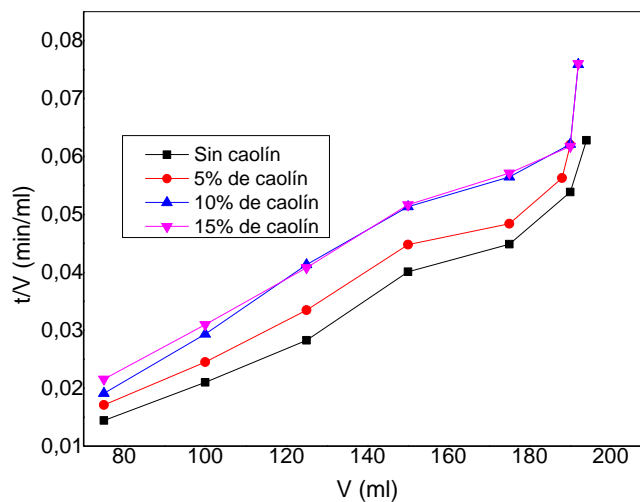


Figura 24. Resultados para “Poliéster S-22” a 22.04 g/L

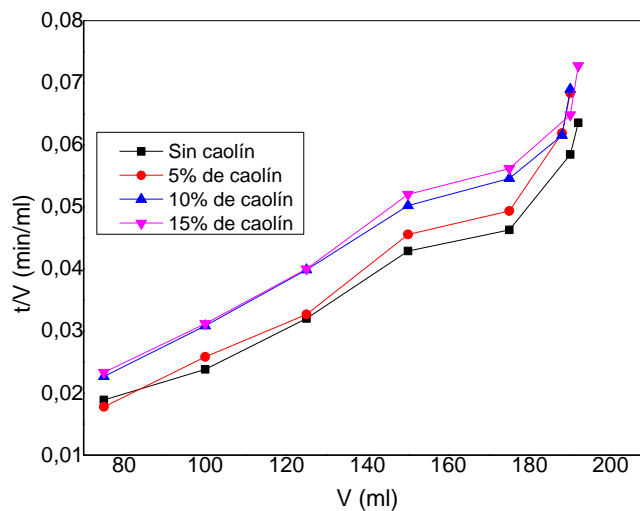
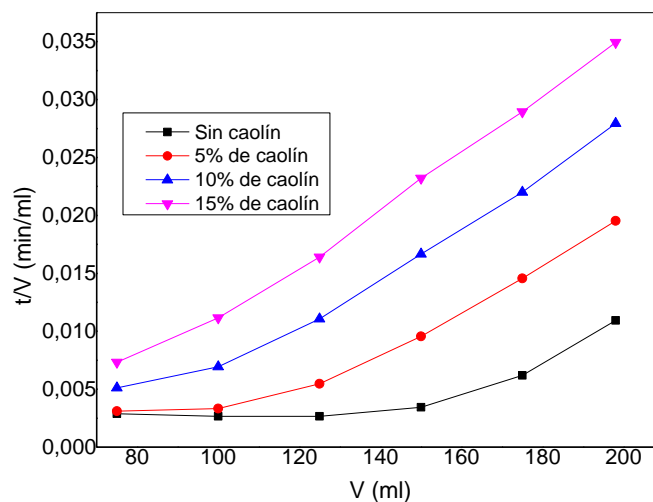


Figura 25. Resultados para “321-61.5” a 22.04 g/L

En estas dos figuras se puede observar un comportamiento similar al de las dos figuras anteriores, ya que al aumentar el porcentaje de caolín, aumenta la pendiente de la curva de operación (resistencia de la torta de filtración), además se observa también que las curvas cumplen con el comportamiento esperado y que en ambas figuras las curvas de operación se encuentran muy cercanas, denotando de nuevo, que para la concentración de 22.04 g/L, no existe diferencia significativa en la operación de filtración cuando se agrega caolín como filtro ayuda.

### Filtración a 11.2 g/L

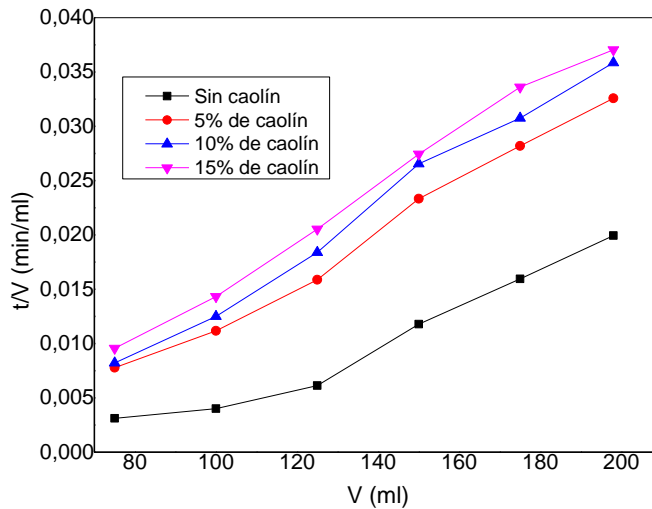
Los resultados para los materiales de filtración “Poliéster S-22” y “321-61.5” a 11.2 g/L se muestran en las Figuras 26 y 27, respectivamente, en donde el eje X, representa el volumen de filtrado recolectado a diferente tiempo, durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra el tiempo en el cual se realiza la prueba dividido por el volumen de clarificado recolectado en dicho tiempo ( $t/V$ ).



**Figura 26.** Resultados para “Poliéster S-22” a 11.2 g/L

En la Figura 26 se puede apreciar que para la concentración de sólidos de 11.2 g/L, existe una diferencia significativa entre la curva de operación de la filtración que se llevó a cabo con 15% de caolín y la filtración que se realizó sin este. Esto puede atribuirse a que debido a la baja concentración de sólidos que tenía

la muestra a separar, el caolín tiene una influencia mayor, en comparación con las concentraciones anteriores de sólidos, lo cual provoca que con la presencia del caolín se aglomeren en mayor proporción éstos y se pueda realizar una mejor separación.

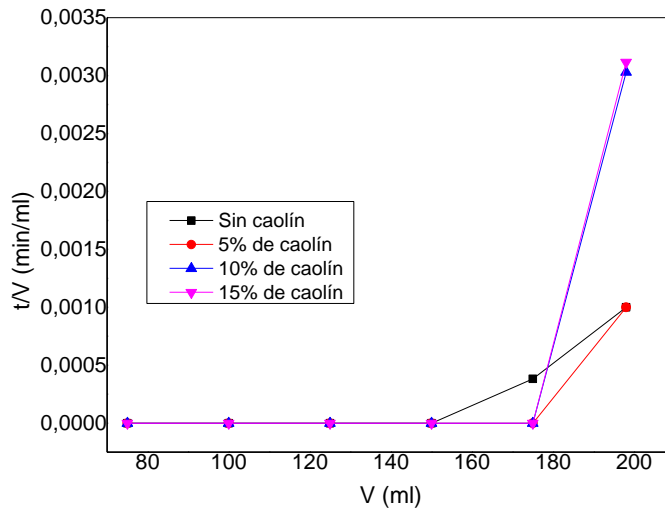


**Figura 27.** Resultados para “321-61.5” a 11.2 g/L

La **Figura 27** muestra de nuevo que para la concentración de 11.2 g/L de sólidos, existe una diferencia más marcada entre las filtraciones que se llevaron a cabo con caolín y sin él, la explicación para este fenómeno es la misma, es decir, al ser baja la concentración de sólidos, el caolín comienza a jugar un papel apreciable en la separación. También, se puede apreciar que para las curvas de operación donde se utilizó caolín, no existe una diferencia significativa.

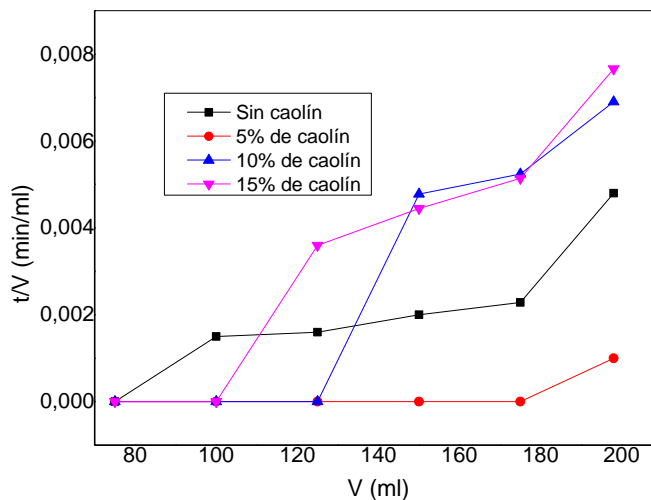
### Filtración a 5.51 g/L

Los resultados para los materiales de filtración “Poliéster S-22” y “321-61.5” a 5.51g/L se muestran en las **Figuras 28** y **29**, respectivamente, en donde el eje X, representa el volumen de filtrado recolectado a diferente tiempo, durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra el tiempo en el cual se realiza la prueba dividido por el volumen de clarificado recolectado en dicho tiempo (t/V).



**Figura 28.** Resultados para "Poliéster S-22" a 5.51g/L

En la **figura 28**, se observa que durante las primeras etapas de la filtración, es muy corto el tiempo en el cual se recolecta mucho volumen, por ende no se lleva a cabo de manera correcta el proceso, lo anterior se debe a que al ser muy baja la concentración de sólidos, tarda mucho en formarse una torta de filtración que sea capaz de ofrecer una resistencia, y ésta ayude a la separación sólido-líquido.



**Figura 29.** Resultados para "321-61.5" a 5.51 g/L

Los resultados mostrados en la **Figura 29**, ratifican que el proceso de filtración a concentraciones de sólidos bajas, se lleva a cabo de manera correcta hasta

que se forma una torta de filtración apreciable, la cual ofrezca una resistencia que ayude a llevar a cabo la separación sólido-líquido.

Las dos Figuras anteriores también denotan que la formación de la torta, para bajas concentraciones de sólidos, se lleva a cabo a velocidad variable, además de que no cumple con un patrón en relación con las concentraciones de caolín adicionadas.

Con esta información también se puede inferir que las resistencias que ofrecen los materiales filtrantes son muy pequeñas, ya que en el análisis gráfico se observa que las ordenadas al origen de las curvas tienden a cero; queda claro que la resistencia que ofrece la torta es la que juega el papel crucial en el proceso de filtración.

**Tabla 16.** Porcentajes de remoción para las pruebas de filtración

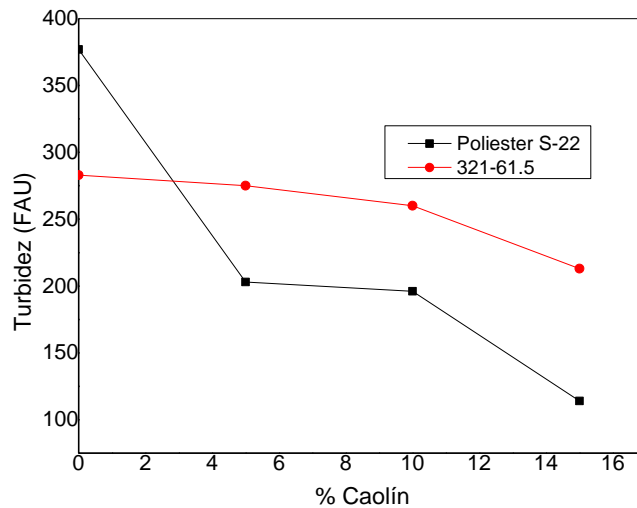
MATERIAL	CAOLIN	%REMOCIÓN			
		5.51 g/L	11.2 g/L	22.04 g/L	49.44 g/L
Poliéster S-22	0%	91.78	36.58	87.62	98.94
	5%	36.46	59.73	91.52	99.21
	10%	40.25	72.69	95.11	99.13
	15%	51.33	83.21	95.86	99.21
321-61.5	0%	85.07	71.15	93.30	99.09
	5%	76.18	82.71	95.90	99.06
	10%	76.97	86.60	96.89	98.93
	15%	81.56	89.49	97.19	99.01

En la **Tabla 16** se puede observar que, para las diferentes concentraciones de sólidos y para ambos materiales de filtración, a medida que se incrementa el porcentaje de caolín, aumenta el porcentaje de remoción, lo anterior se debe a que la presencia de caolín coadyuva a la aglomeración de los sólidos, por ende se forma de una mejor manera una torta de filtración que opone resistencia al paso de los mismos y por tanto se nota una mejor filtración.

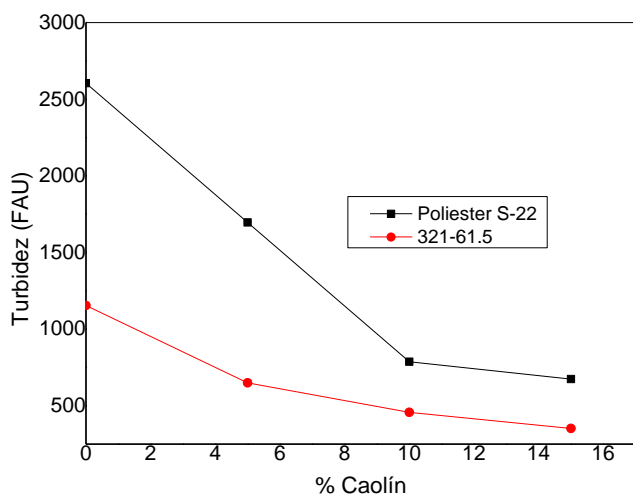
Estos resultados concuerdan con los plasmados en las **Figuras 22 a 27**, en donde al elevar el porcentaje de caolín, se incrementó la pendiente de las curvas de operación, indicando una mayor resistencia de la torta, derivando una mayor remoción de sólidos. Al igual que en dichos resultados, como el

incremento en la pendiente de las curvas no era muy significativo, el aumento en el porcentaje de remoción tampoco lo es.

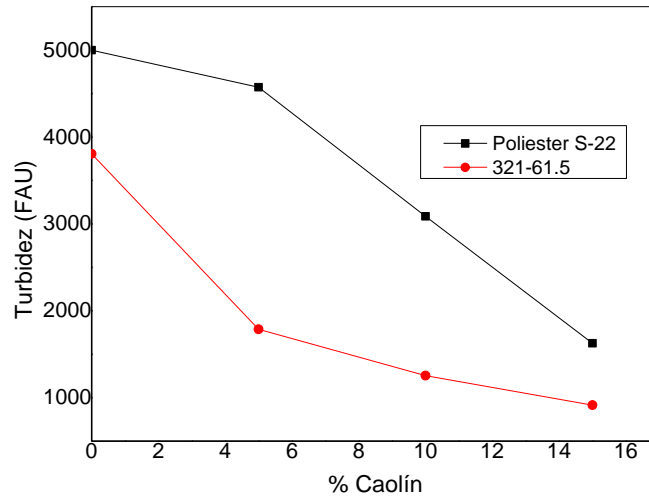
En la misma tabla también queda plasmado que a medida que se incrementa la concentración de sólidos, se incrementan los porcentajes de remoción, como ya se comentó, esto se debe a que a bajas concentraciones, tarda en formarse la torta de filtración, permitiendo el paso de muchos sólidos al inicio de la operación. Caso contrario, a altas concentraciones, la formación de la torta es demasiado rápida, permitiendo que desde un principio se lleve a cabo de manera correcta la separación.



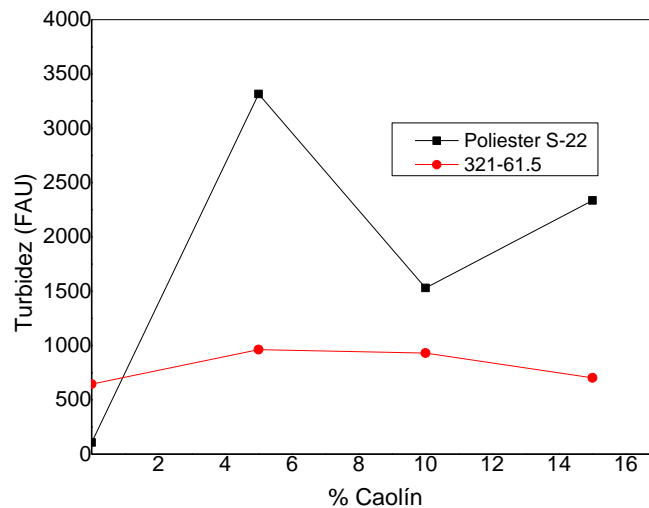
**Figura 30.** Turbidez para los clarificados de las pruebas a 49.44 g/L



**Figura 31.** Turbidez para los clarificados de las pruebas a 22.04 g/L



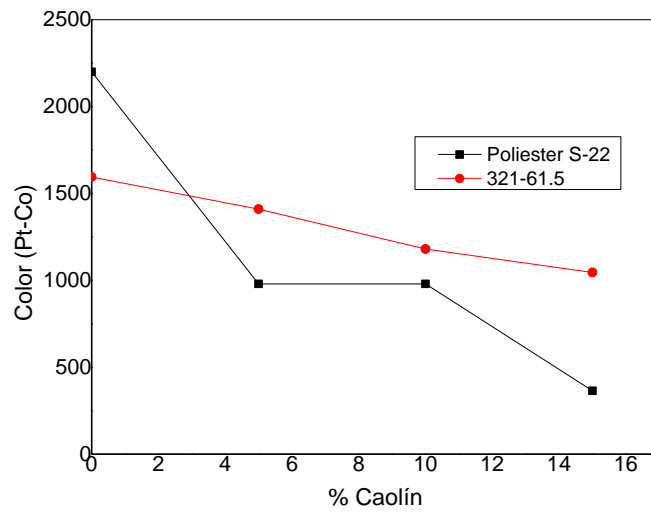
**Figura 32.** Turbidez para los clarificados de las pruebas a 11.2 g/L



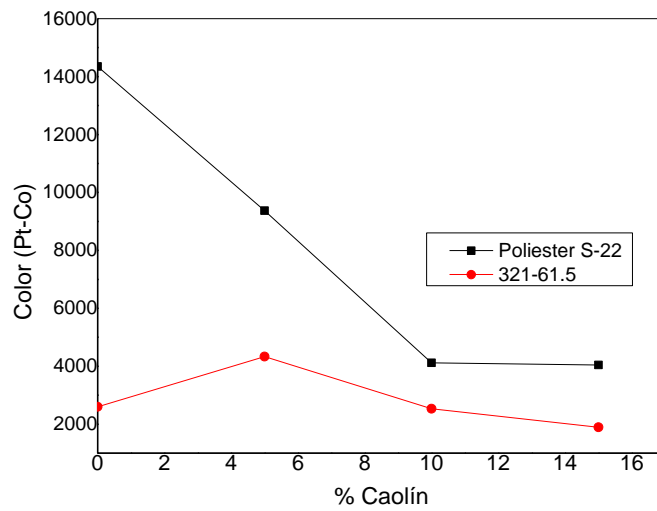
**Figura 33.** Turbidez para los clarificados de las pruebas a 5.51 g/L

Las Figuras 30, 31, 32 y 33 muestran que, para las diferentes concentraciones de sólidos y para ambos materiales filtrantes, los valores de turbidez exhiben una relación inversamente proporcional con el porcentaje de remoción, es por tal motivo que en dichas figuras se observa que cuando se incrementa el porcentaje de caolín, disminuyen los valores de turbidez, incluso para la concentración de 5.51 g/L, que no tiene una tendencia definida, se observa que donde se presenta una mayor remoción, existen bajos valores de turbidez, lo

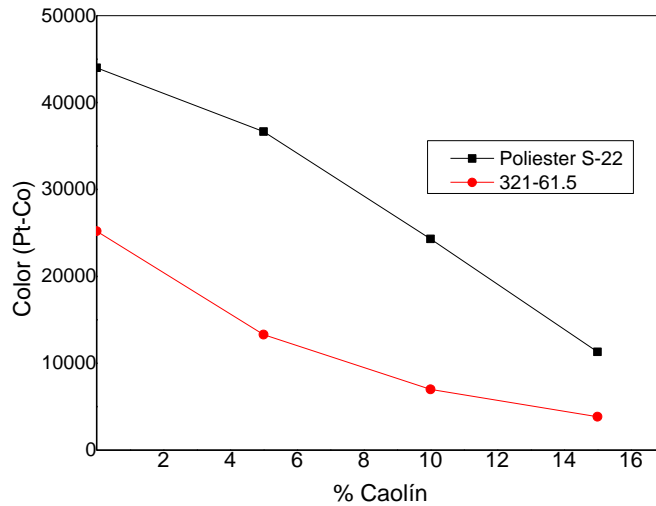
cual es consecuencia de que al haber mayor remoción de sólidos, se tienen clarificados menos turbios.



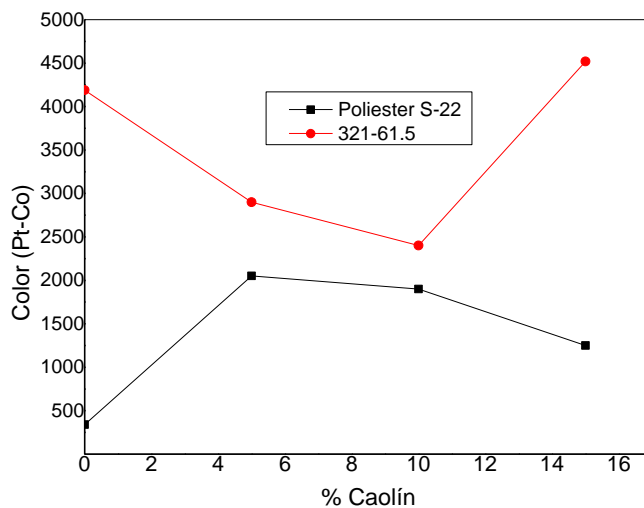
**Figura 34.** Color para los clarificados de las pruebas a 49.44 g/L



**Figura 35.** Color para los clarificados de las pruebas a 22.04 g/L



**Figura 36.** Color para los clarificados de las pruebas a 11.2 g/L



**Figura 37.** Color para los clarificados de las pruebas a 5.51 g/L

En las Figuras 34, 35, 36 y 37 se observa que los valores de color aparente en los clarificados, para las pruebas realizadas a diferentes concentraciones de sólidos, siguen una tendencia idéntica a los resultados mostrados para la turbidez, es decir, conforme aumenta el porcentaje de caolín, disminuyen los valores de color aparente, lo anterior como consecuencia de que al aumentar el porcentaje de caolín, aumenta el porcentaje de remoción, como consecuencia existen clarificados con menos color.

**Tabla 17.** pH de los clarificados para las pruebas de filtración

MATERIAL	CAOLIN	pH			
		5.51 g/L	11.2 g/L	22.04 g/L	49.44 g/L
<b>Poliéster S-22</b>	0%	6.59	6.19	6.68	6.67
	5%	6.48	6.2	6.49	6.72
	10%	6.63	6.27	6.76	6.7
	15%	7.08	6.77	6.8	6.71
<b>321-61.5</b>	0%	6.4	6.2	6.34	6.95
	5%	6.68	6.54	6.69	6.75
	10%	6.61	6.32	6.73	6.82
	15%	6.66	6.88	6.75	6.86

La **Tabla 17** denota que todos los pH de los clarificados se encuentran por debajo de 7, como ya se comentó, esto es debido a que las reacciones de coagulación-floculación que se llevan a cabo en el proceso de potabilización, generan como subproductos iones  $H^+$ , lo que provoca un sistema ácido.

**Tabla 18.** Conductividad de los clarificados para las pruebas de filtración

MATERIAL	CAOLIN	CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )			
		5.51 g/L	11.2 g/L	22.04 g/L	49.44 g/L
<b>Poliéster S-22</b>	0%	620	605	400	300
	5%	560	645	450	345
	10%	380	665	500	430
	15%	590	730	520	490
<b>321-61.5</b>	0%	750	660	450	330
	5%	640	690	649	380
	10%	630	730	458	460
	15%	640	775	352	525

En la **Tabla 18**, para ambos materiales de filtración, se puede observar la tendencia de que a medida que se eleva la concentración de sólidos en la solución a filtrar, disminuyen los valores de conductividad en los clarificados, lo anterior es debido a que, por las razones antes expuestas en el análisis del porcentaje de remoción, al incrementar la concentración de sólidos, aumenta el porcentaje de remoción de los mismos, teniendo como consecuencia que haya clarificados con menor conductividad, lo cual se debe a que los silicatos presentes en la arcilla del agua residual quedan retenidos en la torta.

También se observa que para cada concentración de sólidos y en ambos materiales filtrantes, la adición de caolín causa un aumento en los valores de conductividad, este incremento se debe a que el caolín utilizado está formado por compuestos inorgánicos como el óxido de silicio y el óxido de aluminio, los cuales son buenos conductores, por ende aumentaron los valores de conductividad.

**Tabla 19.** Porcentajes de humedad de los lodos provenientes de la filtración

MATERIAL	CAOLÍN	%HUMEDAD PROMEDIO DE LOS LODOS			
		5.51 g/L	11.2 g/L	22.04 g/L	49.44 g/L
Poliéster S-22	0%	39.90	43.81	37.78	41.81
	5%	45.36	38.74	41.58	42.06
	10%	42.56	36.38	39.60	42.06
	15%	43.75	34.67	39.54	42.54
321-61,5	0%	40.49	36.65	39.75	41.80
	5%	41.30	34.76	41.26	41.80
	10%	41.23	34.16	41.19	42.07
	15%	40.80	33.73	39.43	42.07

En la **Tabla 19** se aprecia que los porcentajes de humedad de los lodos resultantes en las pruebas se encuentran alrededor del 40%, dicho valor es menor que los porcentajes de humedad obtenidos en las pruebas de sedimentación y centrifugación, lo cual se atribuye a que en las pruebas de filtración a nivel laboratorio, el tiempo que se aplicó la presión de vacío fue suficiente para que se extrajera la mayor cantidad de agua de la torta de sólidos formada, es decir, las pruebas se detuvieron hasta que ya no se observaba ninguna gota de clarificado.

De acuerdo con los resultados de las pruebas de filtración a nivel laboratorio presentados, se puede concluir que el material filtrante que finalmente se puede utilizar es el “321-61.5”, ya que por lo general presenta mejores porcentajes de remoción en las mismas condiciones que el “Poliéster S-22”, de la misma manera presenta menores valores de color y turbidez en los clarificados.

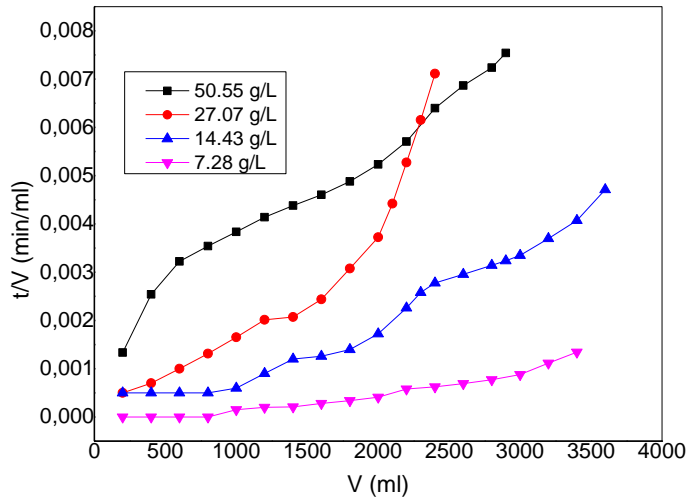
También se puede concluir que los porcentajes caolín adicionados, no son suficientes para obtener mejoramientos sustantivos en la separación de los

sólidos, dichos porcentajes no se pueden incrementar debido a que los productos que se desean elaborar con los sólidos separados, requieren como mínimo 70% de dichos sólidos, máximo 15 % de caolín y el porcentaje restante de algún barro y otros reactivos.

Otra desventaja que presenta la adición de caolín tiene que ver con problemas operativos, ya que para obtener los resultados deseados, los porcentajes en peso de caolín se adicionan en base a los sólidos secos, para ello se tendría que hacer la medición de sólidos totales de la purga de la planta, dicha prueba requiere como mínimo 36 horas, y la planta purga cada 8 horas, es decir, no es posible adicionar de manera adecuada el caolín, se tendría que buscar otra opción, tal como adicionar una cantidad fija promedio de caolín, pero debido a que el contenido de sólidos es variable en la purga, no se tendría una correcta operación.

Por las razones antes expuestas, para las pruebas de filtración a nivel piloto, se utilizó el material "321-61.5" y no se adicionó caolín como filtro ayuda, dichas pruebas se llevaron a cabo a la presión constante de 0.5 Kg/cm<sup>2</sup> y con diferentes concentraciones de sólidos, las cuales fueron 50.55 g/L ( $C_0$ ), 27.07 g/L ( $C_0/2$ ), 14.43 g/L ( $C_0/4$ ) y 7.28 g/L ( $C_0/8$ ).

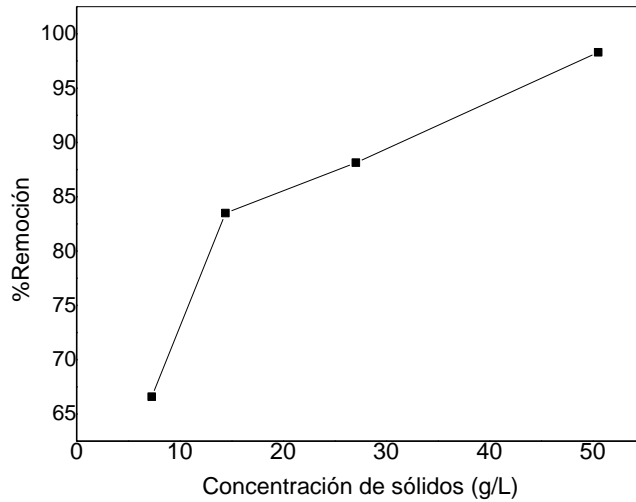
Los resultados se muestran en la **Figura 38**, en donde de nuevo el eje X, representa el volumen de filtrado recolectado a diferente tiempo, durante el cual se realizó la prueba y en el eje Y, se muestra el tiempo en el cual se realiza la prueba dividido por el volumen de clarificado recolectado en dicho tiempo ( $t/V$ ), en esta figura se muestran los resultados para todas las concentraciones de sólidos.



**Figura 38.** Resultados de filtración a escala piloto

En la **Figura 38** se puede observar que para las pruebas a nivel piloto, se tiene la misma tendencia que para las pruebas realizadas a nivel laboratorio, es decir, conforme aumenta la concentración de sólidos, aumenta la pendiente de la curva de operación, lo cual conlleva a que exista una resistencia mayor de la torta de filtración y se pueda lograr una mejor separación sólido-líquido.

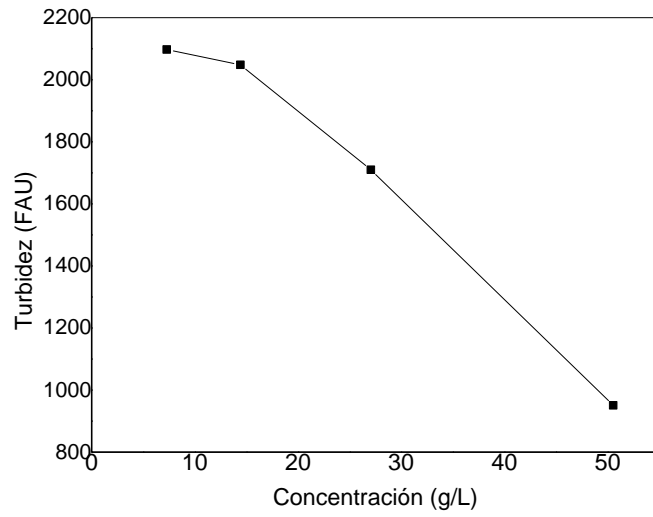
También se observa en la misma Figura, que a diferencia de las pruebas de filtración realizadas a nivel laboratorio, las curvas de operación no tienen un comportamiento lineal tan marcado, debido a que a escala piloto es más difícil estabilizar la operación, sin embargo, estas curvas tienden a seguir el comportamiento esperado, según la ecuación (57), para cada una de las concentraciones de sólidos.



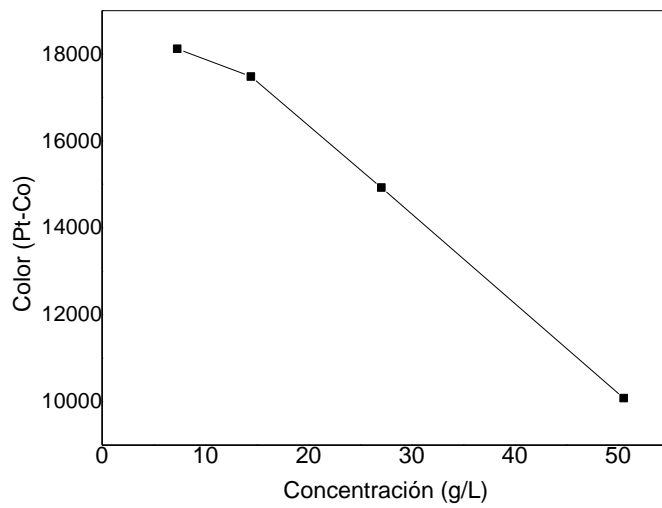
**Figura 39.** %Remoción en filtración a escala piloto

En la **Figura 39** se muestran los porcentajes de remoción para las diferentes concentraciones de sólidos, dicha figura denota que a medida que se incrementa el contenido de estos, aumenta el porcentaje de remoción, lo anterior se debe a que se forma de manera más rápida la torta de sólidos que ofrece la resistencia necesaria para remover los mismos, caso contrario, a bajas concentraciones, tarda en formarse la torta de filtración, permitiendo el paso de muchos sólidos al inicio de la operación.

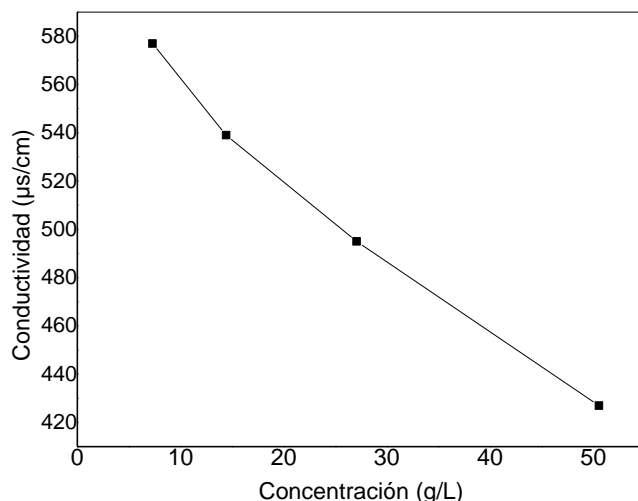
Estos resultados concuerdan con los plasmados en la **Figura 38**, en donde al elevar la concentración de sólidos, se incrementó la pendiente de las curvas de operación, indicando mayor resistencia de la torta, derivando en una mayor remoción de sólidos.



**Figura 40.** Turbidez en filtración a escala piloto



**Figura 41.** Color en filtración a escala piloto



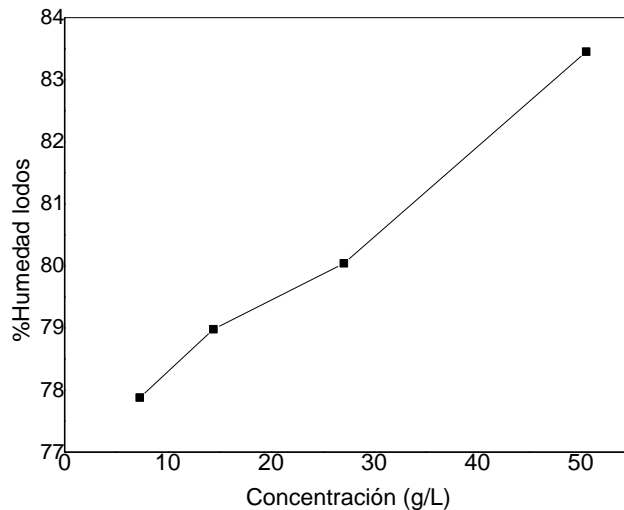
**Figura 42.** Conductividad en filtración a escala piloto

En las Figuras 40, 41 y 42, se puede apreciar que a medida que aumenta la concentración de sólidos, disminuye la turbidez, el color y la conductividad, respectivamente, en los clarificados obtenidos, lo cual se debe a que al haber mayor concentración de sólidos, existe una resistencia mayor de las tortas de filtración, por ende hay mayor remoción de sólidos, provocando que los clarificados obtenidos sean de mayor calidad, es decir, tengan menor turbidez, menor color y debido a que los silicatos presentes en la arcilla del agua residual quedan retenidos en la torta, presentan menor conductividad.

**Tabla 20.** pH de los clarificados de filtración a escala piloto

	pH
7.28 g/L	6,8
14.43 g/L	7
27.07 g/L	6,92
50.55 g/L	6,52

En la Tabla 20 se aprecia que de nuevo, los valores de pH en los clarificados tienden a ser ácidos, lo cual, como ya se ha comentado, es causa de las reacciones de coagulación-floculación que se son llevadas a cabo en el proceso de potabilización.



**Figura 43.** Humedad en lodos de filtración a escala piloto

En la **Figura 43** se observa que existe una relación directamente proporcional entre la concentración de sólidos y el contenido de humedad en los lodos resultantes de la separación, lo cual se atribuye a que al ser mayor el espesor de la torta de sólidos formada, existe mayor resistencia para que fluya el agua a través de dicha torta, quedando atrapada en ella y provocando una mayor humedad.

También se puede apreciar que los valores de humedad van desde 77.8% hasta 83.5%, siendo superiores a los porcentajes de humedad de las pruebas de filtración realizadas a nivel laboratorio, los cuales oscilaban alrededor de 40%, como se comentó, en las pruebas a nivel laboratorio la filtración se llevó a cabo a vacío hasta que ya no cayera ni una gota de filtrado, lo cual no se puede hacer a nivel piloto ni a nivel industrial, ya que cuando se termina la mezcla a separar en el tanque de almacenamiento y en la tubería de succión de la bomba, se tiene que detener la operación, ya que de lo contrario se puede averiar la bomba.

#### 4.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE SEPARACIÓN

De manera adicional, para cada proceso de separación evaluado (sedimentación, centrifugación y filtración), se obtuvieron los parámetros de porcentaje de eficiencia, es decir, del volumen total de muestra tratado, cuanto volumen de clarificado se recupera. En las siguientes Tablas se muestran los resultados para cada proceso de separación.

**Tabla 21.** Porcentajes de eficiencia para el proceso de sedimentación

Diámetro Probeta(cm)	%EFICIENCIA		
	8 g/L	16 g/L	32 g/L
5	68.0	54.0	33.0
6.1	78.0	57.0	36.0
7.7	74.0	64.0	26.0
9	74.4	61.1	41.1
16	68.2	50.0	36.4

En la **Tabla 21** se observa que existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de sólidos y el porcentaje de eficiencia en el proceso de sedimentación, lo cual se debe a que conforme es mayor la cantidad de sólidos, existe una mayor compactación de los mismos, y por ende hay menor posibilidad de que el agua pueda ascender a la zona de clarificación.

**Tabla 22.** Porcentajes de eficiencia para el proceso de centrifugación

rpm	%EFICIENCIA			
	7.7 g/L	13.7 g/L	25.6 g/L	48.5 g/L
7000	90.0	95.0	93.5	
10000	93.7	93.1	90.5	
15000	94.5	96.3	92.8	
32000				93.7

Para el proceso de centrifugación, se observa que todos los porcentajes de eficiencia se encuentran arriba del 90%, dichos porcentajes son mucho mejores que los del proceso de sedimentación. Cabe hacer la aclaración que el valor de eficiencia para la prueba realizada a 32000 rpm, seguramente debería ser mayor, en dicha prueba no se pudo cuantificar el agua que se escapó debido a la brisa generada a causa de la elevada velocidad.

**Tabla 23.** Porcentajes de eficiencia para la filtración a nivel laboratorio

MATERAL	CAOLIN	%EFICIENCIA			
		5.51 g/L	11.2 g/L	22.04 g/L	49.44 g/L
Poliéster S-22	0%	99.0	99.0	97.0	87.5
	5%	99.0	99.0	95.0	87.0
	10%	99.0	99.0	96.0	87.0
	15%	99.0	99.0	96.0	86.0
321-61.5	0%	99.0	99.0	96.0	87.5
	5%	99.0	99.0	95.0	87.5
	10%	99.0	99.0	95.0	87.0
	15%	99.0	99.0	96.0	87.0

**Tabla 24.** Porcentajes de eficiencia para la filtración a escala piloto

	%EFICIENCIA
7.28 g/L	76
14.43 g/L	72
27.07 g/L	68
50.55 g/L	63

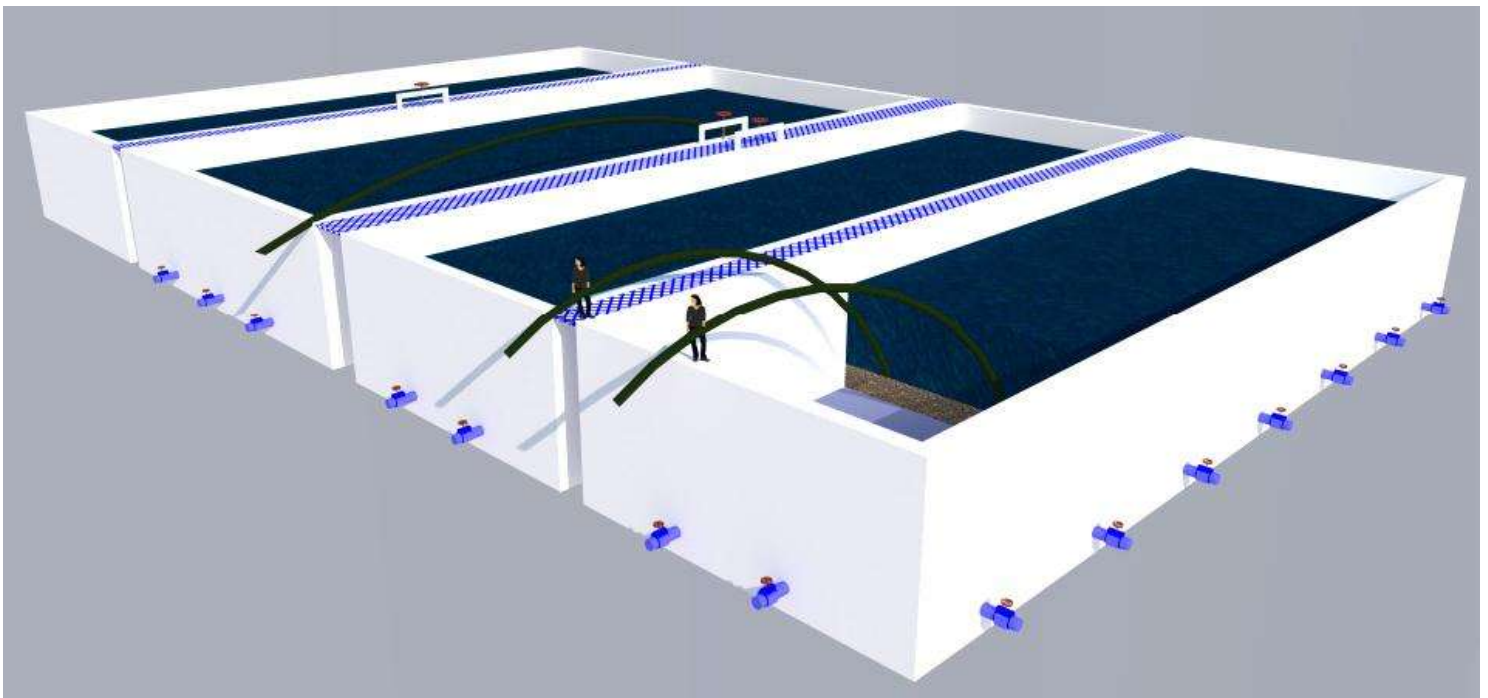
Las **Tablas 23** y **24**, muestran que los porcentajes de eficiencia en la filtración, exhiben una relación inversa con la concentración de sólidos, lo cual es consecuencia de que al incrementar el contenido de estos, se forma una torta de espesor mayor, por dicha razón, se presenta una mayor resistencia al transporte de agua a través de la misma, aunado a esto, existe una mayor compactación y consecuentemente más agua queda atrapada en los espacios intersticiales que existen entre los sólidos.

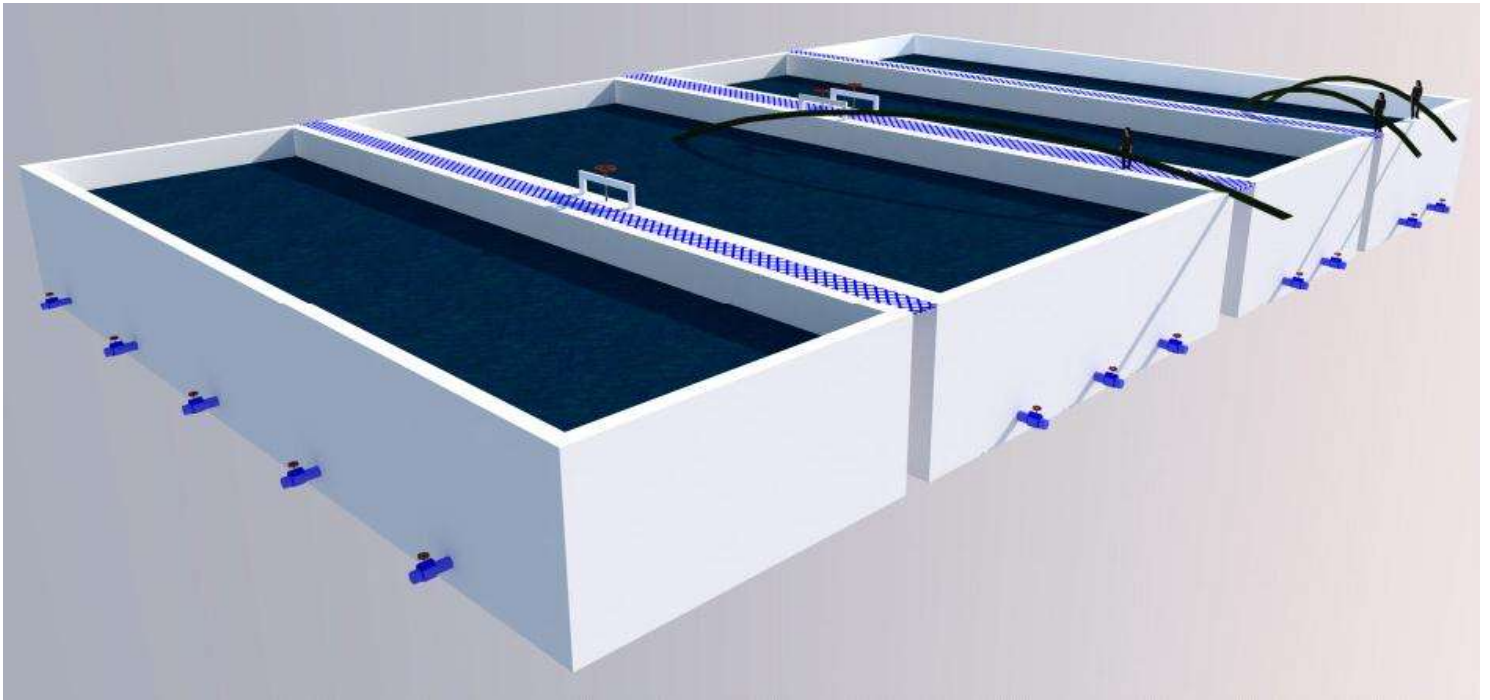
Se puede apreciar que existe una diferencia significativa entre las eficiencias de las pruebas a nivel laboratorio y a escala piloto, lo cual se debe a que en las pruebas realizadas en el laboratorio, no existía posibilidad de fuga y el tiempo de la prueba era suficiente para asegurar que el agua que no fuera clarificado, estuviera en la torta, por otro lado, en las pruebas a escala piloto, puede quedar agua en la tubería, en las placas y marcos, y debido a la presión puede fugarse una pequeña cantidad de agua entre los espacios existentes en las placas y los marcos, así como también puede haber pérdidas en la recolección del filtrado.

#### 4.5 CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE LA PURGA

Los cuatro tanques sedimentadores, con los que cuenta la planta, purgan a través de una serie de válvulas y algunas mangueras, mediante las cuales se realiza la purga por sifoneo, cada tanque tiene un número diferente de válvulas, se cuenta en total con tres mangueras; tanto las válvulas como las mangueras tienen tiempo de purga diferente, además algunas válvulas tienen 6 pulgadas de diámetro, otras 8 pulgadas de diámetro, las mangueras 3 pulgadas de diámetro, razón por la cual se cuenta con diferentes flujos volumétricos de purga, aunado a esto, como ya se mencionó, la concentración de sólidos en la purga al inicio es muy elevada y va disminuyendo paulatinamente, interrumpiéndose el proceso de purga en cada válvula y manguera, cuando los operadores observan que el agua sale clara.

En la **Figura 44** se muestra un esquema de la distribución de las válvulas y mangueras de purga con las cuales cuenta la planta.





**Figura 44.** Distribución de válvulas y mangueras de purga

**Tabla 25.** Tiempos de purga y flujos de cada válvula en 3 días diferentes

Tanque	Válvula	Flujo(L/seg)	Tiempo de purga (min:seg)		
			12/09/2014	25/09/2014	18/10/2014
Sur	1	53.5	0:38	0:47	0:32
	2	53.5	1:16	0:50	1:02
	3	53.5	0:44	0:41	0:41
	4	53.5	0:36	0:41	0:40
	5	53.5	0:25	0:28	0:12
	6	53.5	0:20	0:28	0:11
	7	53.5	0	0	0
	8	21	0:27	0:27	0:45
	9	21	0:33	0:35	0:36
Centro	1	53.5	0:43	0:25	0:32
	2	21	0:29	1:25	0:15
	3	21	0:18	0:29	0:22
Norte	1	53.5	1:37	3:20	3:17
	2	21	1:44	0:23	5:31
	3	21	1:38	1:03	0:45
	4	21	1:22	0:45	0:54
	5	53.5	0:12	0:20	0:30
Nuevo	1	21	0	0	0
	2	21	0:29	0:24	0:35
	3	21	2:26	2:55	4:53
	4	21	4:44	4:54	7:16
	5	21	1:35	2:17	2:12

La **Tabla 25** muestra los flujos volumétricos y los tiempos de purga de todas las válvulas en tres fechas diferentes, la válvula 7 del tanque sur y la válvula 1 del tanque nuevo prácticamente nunca se abren, debido a que pertenecen a los floculadores. También se puede observar que aún para una misma válvula, se tienen variaciones en el tiempo que tardan en purgar.

Debido a estas razones, es imprescindible construir un tanque de ecualización, ya que para darle un tratamiento al agua residual en cuestión, se necesita homogenizar las características y juntar todos los flujos de purga en un solo lugar. Como resultado de juntar todos los flujos, se obtendrá una concentración promedio, valor que también es requerido para poder diseñar el equipo final de tratamiento que proporcione la separación sólido-líquido.

Para obtener ésta concentración promedio, se analizó de qué manera se podrían tomar muestras representativas de las válvulas de cada tanque y las mangueras, en intervalos de tiempo que permitieran hacer una evaluación de todas las válvulas. Para las muestras tomadas, se midieron los sólidos totales contenidos, para poder hacer una evaluación posterior.

**Tabla 26.** Sólidos y volumen a diferentes tiempos de purga en las válvulas

	Tiempo de purga								
Tanque	10 seg	30 seg	60 seg	90 seg	180 seg	270 seg	360 seg	450 seg	
Sur	8354.93	8989.78	5141.35						
	13592.12	18402.22	13947.45	3616.60					
	8354.93	8989.78	5141.35						
	8354.93	8989.78	5141.35						
	8354.93	8989.78							
	8354.93	8989.78							
	962.15	1330.00	764.93						
	962.15	1330.00	764.93						
Centro	12988.46	9694.20	2856.90						
	2104.55	463.05							
	2104.55	463.05							
Norte	13702.69	21302.81	29434.36	27354.55	74126.51	62410.01			
	5378.63	8361.85	11553.67						
	5378.63	8361.85	11553.67						
	5378.63	8361.85	11553.67						
	8354.93	8989.78							
Nuevo	4188.06	6336.32							
	5378.63	8361.85	11553.67	10737.30	29096.39				
	5378.63	8361.85	11553.67	10737.30	29096.39	24497.39	18106.20	9005.85	
	4188.06	6336.32	8385.30	5930.93	6679.58				
	6383.70	4662.00	2346.30						
	6383.70	4662.00	2346.30						
	6383.70	4662.00	2346.30						
									<b>TOTAL</b>
<b>gr totales</b>	<b>150966.60</b>	<b>175391.91</b>	<b>136385.19</b>	<b>58376.68</b>	<b>138998.86</b>	<b>86907.40</b>	<b>18106.20</b>	<b>9005.85</b>	<b>774138.68</b>
<b>V(L) total</b>	<b>7530.00</b>	<b>15060.00</b>	<b>15885.00</b>	<b>5100.00</b>	<b>10485.00</b>	<b>6705.00</b>	<b>1890.00</b>	<b>1890.00</b>	<b>64545.00</b>

**Tabla 27.** Sólidos y volumen para las mangueras de purga

Manguera 1	Sur	1915110	1398600	703890	
Manguera 2	Sur	1915110	1398600	703890	
Manguera 3	Norte	574533	419580	211167	<b>TOTAL</b>
	<b>gr totales</b>	<b>4404753</b>	<b>3216780</b>	<b>1618947</b>	<b>9240480</b>
	<b>V(L) total</b>	<b>93150</b>	<b>186300</b>	<b>279450</b>	<b>558900</b>

En la **Tabla 26** se muestra el contenido de sólidos y el volumen a diferentes tiempos, para las válvulas de los diferentes tanques de sedimentación; la **Tabla 27** muestra los sólidos y el volumen para las mangueras de sifoneo, en este caso, debido a que en la mayoría de las veces, dos mangueras purgan

alrededor de cinco horas consecutivas al día y la otra alrededor de una hora y media, se prefiere mostrar los datos en tres etapas durante las cuales se da el proceso.

**Tabla 28.** Concentración promedio de la purga

	g sólidos	V(L)	C(g/L)
válvulas	774138.68	64545.00	
mangueras	9240480.00	558900.00	
<b>TOTAL</b>	<b>10014618.68</b>	<b>623445.00</b>	<b>16.06</b>

La **Tabla 28** muestra un resumen de los gramos de sólidos y los volúmenes de agua que provienen tanto de las válvulas como de las mangueras, haciendo la división de los gramos de sólidos totales entre el volumen total, se obtiene la concentración promedio total de sólidos en la purga de la planta. Cabe mencionar que este estudio se llevó a cabo tomando las muestras en época de lluvias, por lo que seguramente dicha concentración promedio, será menor en época de estiaje, el valor obtenido será utilizado como parámetro de diseño, ya que se tiene que diseñar con las condiciones más críticas, de lo contrario el equipo no operará de manera correcta en épocas de lluvias, caso contrario, asegurando la correcta operación en estas épocas, se asegurará la operación deseada en las épocas de estiaje.

#### **4.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS TRES PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO EVALUADOS**

Una vez evaluados los procesos de sedimentación, centrifugación y filtración, todos a diferentes concentraciones de sólidos en el agua residual, se pueden observar las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos, para de esta manera elegir el mejor proceso que satisfaga las necesidades de separación sólido-líquido del agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella”, y así poder aprovechar el residuo sólido y el agua obtenida.

En cuanto a la capacidad de remoción de sólidos se refiere, se tiene que la sedimentación presentó remociones entre 96% y 99.59%, la centrifugación entre 95.3% y 99.6%, mientras que la filtración mostró remociones entre

66.58% y 98.29%, estos rangos se presentaron debido a las diferentes condiciones experimentales de concentración de sólidos y otras variables propias de cada proceso de separación.

La eficiencia en la separación, es uno de los factores más importantes, ya que denota cuánta agua se recupera como clarificado, del total de agua tratada. Para la centrifugación, se presentan eficiencias arriba del 90%; para la sedimentación los valores superiores son del orden de 78%, presentando inclusive eficiencias de 26%; mientras que en la filtración se obtienen valores de entre 63% y 76% de eficiencia. De acuerdo con los resultados, el proceso que presenta mejores eficiencias en la separación sólido-líquido del agua residual de la planta potabilizadora "Vista Bella" es la centrifugación.

Para que los sólidos separados puedan ser utilizados en la elaboración de productos con valor agregado, se requiere que contengan un bajo contenido de agua. Los contenidos de humedad en los lodos provenientes de la sedimentación se encuentran por arriba del 95%, por lo que se tendría que buscar un proceso de secado adicional, el cual tendría que ser grande y consumir mucha energía, debido a la cantidad de agua que tiene que retirar y el volumen que se tendría que manejar. En el proceso de filtración, las humedades de los lodos obtenidos están entre 77.88% y 83.45%, mientras que para los lodos provenientes de la centrifugación, el contenido de humedad se encuentra entre 58% y 75.83%, siendo los más bajos en comparación con los otros procesos de separación; además, para este proceso se puede buscar menor humedad de los mismos dando mayor tiempo de residencia, aumentando las rpm en el equipo de centrifugación o jugando con otros elementos de un decantador centrífugo, tales como el ángulo del rotor cónico, la diferencia de velocidades entre el rotor y el tornillo sinfín transportador de sólidos, entre otros.

Las velocidades de sedimentación y las áreas requeridas para la misma, exhiben una elevada dependencia con la concentración de sólidos, así mismo, los porcentajes de remoción para la filtración, indican que para obtener buena remoción se necesitan concentraciones de sólidos elevadas, aunado a esto, existe una diferencia apreciable entre los porcentajes de remoción de una

concentración a otra, considerando constantes las otras variables. A diferencia de estos dos procesos de separación, en el proceso de centrifugación no se observan diferencias significativas entre los porcentajes de remoción a diferentes concentraciones de sólidos, lo cual indica que es un proceso que no requiere un control riguroso, siendo esta una ventaja importante, ya que la concentración de sólidos tiene muchas variaciones a lo largo del año. En este aspecto, otra ventaja que presenta la centrifugación es que su operación puede ser modificada de acuerdo a las necesidades, mientras que para la sedimentación y filtración, no es posible.

Debido a la evaluación de la concentración promedio de la purga, se deduce que la filtración no presentará buenas remociones de los sólidos, ya que las pruebas muestran que se requiere una elevada concentración de sólidos para que se forme rápidamente una torta, de espesor tal que obtenga separaciones eficientes.

Para que sea viable la separación por filtración, se requiere de un equipo de filtración continua, por ejemplo un filtro banda, lo cual presenta los inconvenientes de que dichos equipos retiran constantemente la torta formada, provocando que no se pueda llevar a cabo la separación deseada. Además, este tipo de equipos requieren de un sistema de retrolavado del material filtrante, con lo cual se estaría consumiendo agua y por lo tanto disminuyendo el volumen de agua recuperado.

Una manera de ayudar al proceso de filtración, sería adicionando un polímero al agua residual para provocar el crecimiento del floculo, sin embargo, la adición de cualquier tipo de polímero cambiaría las características que presenta la arcilla, provocando que no pudiera ser utilizada para la elaboración de productos con valor agregado y el agua separada también sufriría cambios.

En cuanto al tamaño el equipo, un decantador centrífugo no excede las dimensiones 4m de largo, 1.5 m de ancho y 2 m de altura; de acuerdo con la concentración promedio calculada, para la sedimentación se requiere de un área de 2300 m<sup>2</sup>. Este factor también es muy importante, ya que la planta presenta algunos problemas de espacio.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las comparaciones hechas en diferentes aspectos, los cuales son los más importantes para la determinación del mejor método de separación sólido-líquido para el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella” de la ciudad de Morelia.

**Tabla 29.** Comparación entre procesos de separación sólido-líquido

	<b>SEDIMENTACIÓN</b>	<b>CENTRIFUGACIÓN</b>	<b>FILTRACIÓN</b>
<b>REMOCIÓN DE SÓLIDOS</b>	96%-99.59%	95.3%-99.6%	66.58%-98.29%
<b>EFICIENCIA</b>	26%-78%	90%-97%	63%-76%
<b>HUMEDAD LODOS</b>	95%-98%	58%-75.83%	77.88%-83.45%
<b>CONTROL RIGUROSO</b>	SI	NO	SI
<b>ADECUACIONES DE OPERACIÓN</b>	NO	SI	NO
<b>ADICIÓN POLÍMERO</b>	NO	NO	SI
<b>ESPACIO</b>	2300 m <sup>2</sup>	4m X 1.5m X 2m (LXAXH)	FILTRO BANDA Ó 3 PRENSA 180 P-M

En la **Tabla 29** se observa que los procesos de sedimentación y centrifugación presentan porcentajes de remoción similares, mientras que el proceso de filtración tiene menores porcentajes de remoción. En cuanto a la eficiencia se refiere, existe una marcada superioridad de la centrifugación sobre la sedimentación y la filtración.

La centrifugación también presenta los menores porcentajes de humedad en los lodos, siendo ésta una condición deseada, además se pueden reducir dichas humedades. Éste proceso no requiere un control riguroso en cuanto a la concentración de sólidos, se pueden ajustar las condiciones de operación de acuerdo a las necesidades presentadas, no requiere la adición de ningún polímero y el espacio necesario para la implementación de dicho proceso es menor a los que requieren la sedimentación y la filtración.

# CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede aceptar la hipótesis planteada en el presente trabajo, ya que se logró diseñar el proceso idóneo de tratamiento para el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella” de Morelia, el cual genera condiciones para poder aprovechar el agua recuperada, los sólidos separados y evita que se siga vertiendo el agua residual al río Chiquito de Morelia.
- ❖ En el agua residual ya no se desarrollan reacciones químicas, no se desea eliminar ningún compuesto químico y prácticamente no posee materia orgánica a degradar, por ende no requiere de tratamientos químicos ni biológicos, solo físicos.
- ❖ Debido a las variaciones que se tienen en los flujos y concentraciones de las diferentes válvulas y mangueras de purga, además de que dichas descargas se realizan en sitios diferentes, es imprescindible la construcción de un tanque de ecualización, con una capacidad de 800 m<sup>3</sup>.
- ❖ En el tanque de ecualización se puede dar de manera natural la sedimentación, con lo cual se concentrará el lodo en la parte inferior, generando de nuevo condiciones no homogéneas. Para evitar dicha sedimentación y mantener homogénea el agua residual, se pueden buscar opciones tales como un sistema de recirculación, un sistema de agitación, construir el tanque de ecualización con un área de sección transversal tal que no sea suficiente para que se tenga una velocidad de sedimentación alta. Se sugiere la primera opción.
- ❖ Debido a los estudios y comparaciones antes expuestas, se concluye que el mejor proceso de separación para el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella” de Morelia, es la centrifugación, por lo cual se propone utilizar un decantador centrífugo.

- ❖ Se propone que el agua recuperada se recircule al principio del proceso de potabilización, ya que dicha agua contiene iones  $Al^{3+}$  y en un trabajo de Tesis previo se comprobó que ayuda al proceso de coagulación para el agua proveniente de la presa de Cointzio, propiciando una disminución en el consumo de sulfato de aluminio como coagulante, lo cual representa un ahorro económico en la planta, logrando además menor impacto ambiental.

# BIBLIOGRAFÍA

- A.D. Sticklanda, P. H. (2007). Scaling filtration time initial dependencies of wastewater sludges.
- COEECO. (S/A). Consejo Estatal de Ecología de Michoacan.
- CONAGUA. (2010). Comisión Nacional de Agua, Subdirección General de Administración del Agua .
- Cortes, J. A. (2000). Eliminación de color de una agua residual por medio de la adición de una arcilla y usando  $Al_2(SO_4)_3$  como coagulante. Tesis de Maestría . Monterrey, Nuevo Leon, Mexico.
- Exley, C. (2012). The coordination chemistry of aluminium in neurodegenerative disease. *Coordination Chemistry Reviews* .
- Foust, A. S. (1960). Principios de operaciones unitarias. Primera Edición.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera Edición. CECSA.
- Gonzalez Ramirez, J. (Agosto de 2012). Evaluación de la capacidad de filtración del material "Filtro" para partículas de 0.75nm de diámetro en un filtro prensa. Tesis de Licenciatura . Morelia, Michoacan, Mexico.
- INE. Presas de Mexico. Instituto Nacional de Ecología. clasificación: AE 627.80972M425-16.
- Keller, F., Feist, M., Nirschl, H., & Dörfler, W. (2010). Investigation of the nonlinear effects during the sedimentation process of a charged colloidal particle by direct numerical simulation. *Journal of Colloid and Interface Science* .
- Malina, J. (1996). Water quality. in. Mays, L. eds. *Water resources Handbook*. McGraw-Hill.
- McCabe, W. L. (2007). Operaciones básicas de ingeniería química. Séptima Edición. Mc Graw Hill.
- Metcalf, & Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales. McGraw-Hill.
- Mitchell, M., Stapp, W., & Bixby, K. (1991). Proyecto del Río. Manual de campo de Proyecto del Río: una guía para monitorear localidad del agua en el Río Bravo. Segunda edición . USA: New Mexico.

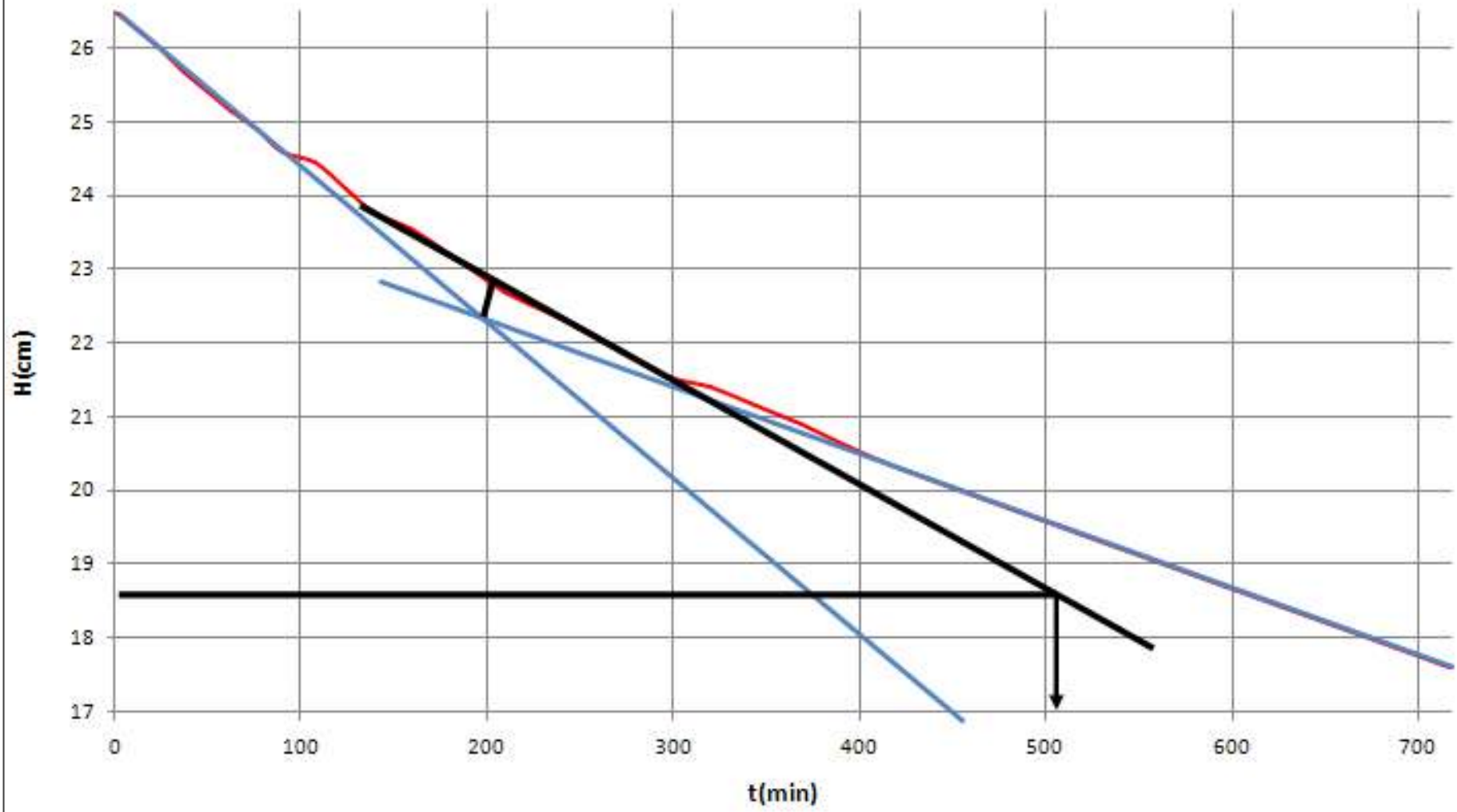
- NMX-AA-034-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUA - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981).
- NOM-004-SEMARNAT-2002. (s.f.). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- .
- NOM-127-SSA1-1994, M. A. (2001). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización .
- OOAPAS. (2006). Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia. Planta Potabilizadora de la Mintzita en Morelia, Mich. Morelia.
- Plan Municipal de Desarrollo, Morelia 2012-2015 .
- P. Garrido, F. C. (2003). Settling velocities of particulate systems: 14. Unified model of sedimentation, centrifugation and filtration of flocculated suspensions.
- R. Bürger, F. C. (2001). Settling velocities of particulate systems: 12. Batch centrifugation of flocculated suspensions.
- R. Bürger, M. B. (1999). Settling velocities of particulate systems: 9. Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behaviour of flocculated suspensions in an ideal batch or continuous thickener.
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sazakly, E., Alexopoulos, A., & Leotsinidis, M. (2007). Rainwater Harvesting, Quality Assessment and Utilization in Kefalonia Island, Greece. Water Research .
- Stickland, A. D., Burgess, C., Dixon, D. R., Harbour, P. J., & Scales, P. J. (2008). Fundamental dewatering properties of wastewater treatment sludges from filtration and sedimentation testing. Chemical Engineering Science .
- Wagner, T. (1996). Contaminación: causas y efectos. Primera edición. Mexico D.F.: Ediciones Garnika.

**ANEXOS**

## **ANEXO 1**

# **GRAFICOS DE ALTURA VS TIEMPO PARA LA CAPA LIMITIE EN LAS PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN**

# Co-1



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 26,5**

**Co(mg/ml)= 32,8416667**

**Cu(mg/ml)= 46,86**

**Hu(cm)= 18,5724321**

**tu(min)= 504**

**Vu(cm/min)= 0,03685006**

**Ae(m2)= 4741,40377**

**t(min)= 457**

**Vc(cm/min)= 0,05798687**

**Ac(m2)= 5732,33208**

---

**CsA(mg/ml)= 32,8416667**

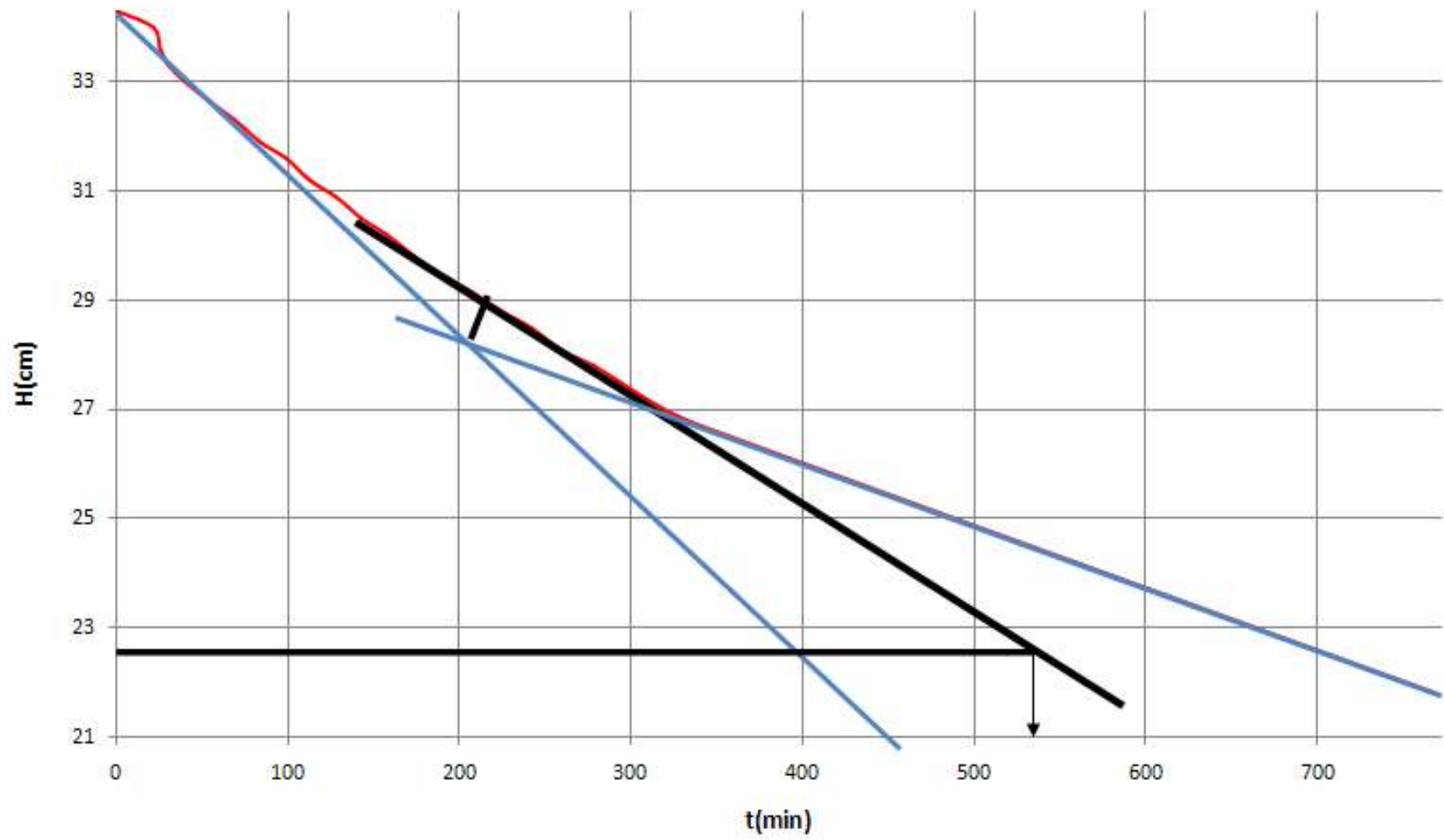
**CsB(mg/ml)= 0,145**

**%Remoción= 99,5586389**

**%H lodo= 95,5237568**

---

# Co-2



---

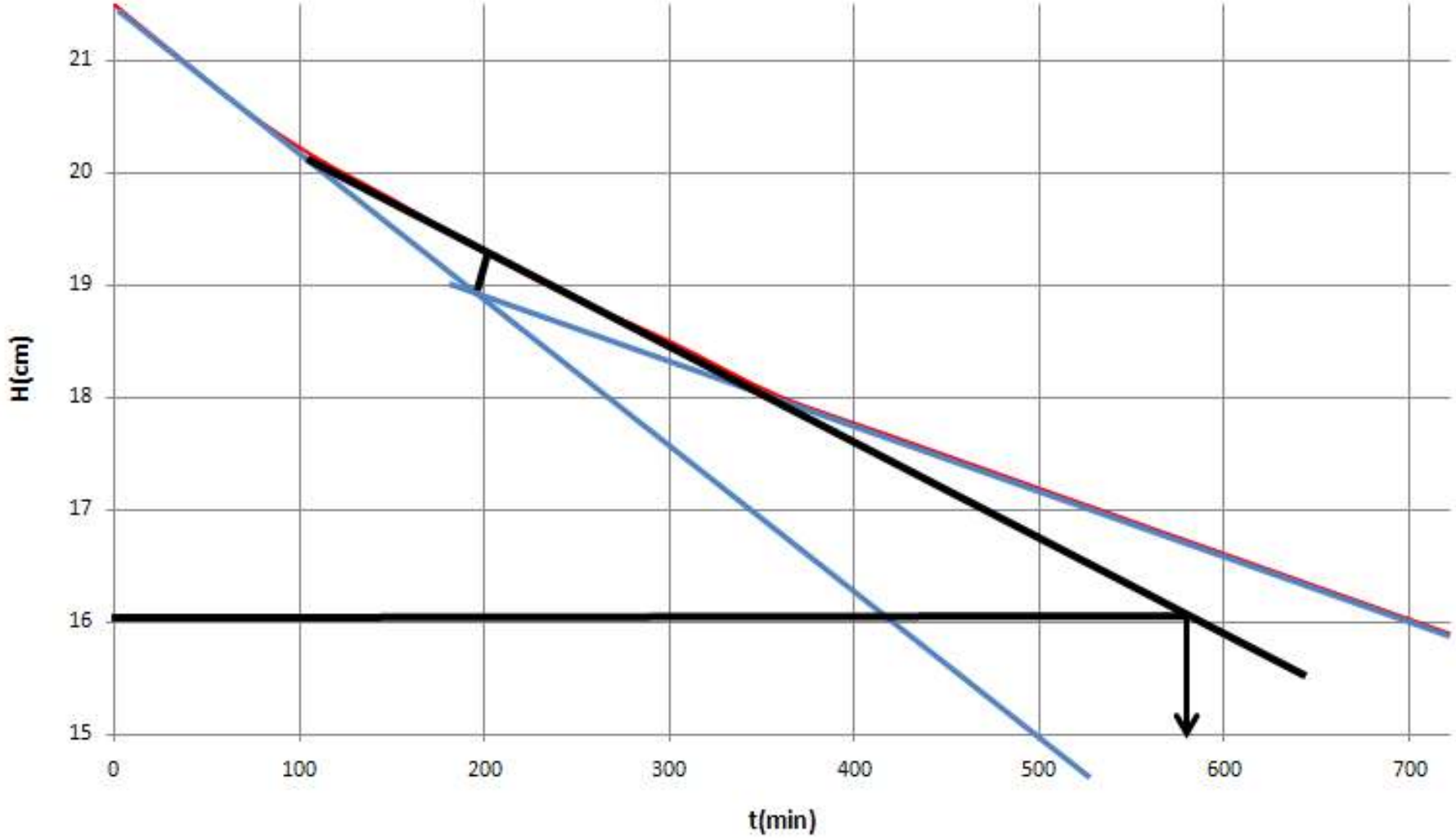
<b>Qo(m3/dia)=</b>	<b>2393,28</b>
<b>Ho(cm)=</b>	<b>34,3</b>
<b>Co(mg/ml)=</b>	<b>32,865</b>
<b>Cu(mg/ml)=</b>	<b>50,0433333</b>
<b>Hu(cm)=</b>	<b>22,5258676</b>
<b>tu(min)=</b>	<b>536</b>
<b>Vu(cm/min)=</b>	<b>0,04202587</b>
<b>Ae(m2)=</b>	<b>3895,76676</b>
<b>t(min)=</b>	<b>457</b>
<b>Vc(cm/min)=</b>	<b>0,0750547</b>
<b>Ac(m2)=</b>	<b>4428,76968</b>

---

<b>CsA(mg/ml)=</b>	<b>32,865</b>
<b>CsB(mg/ml)=</b>	<b>0,135</b>
<b>%Remoción=</b>	<b>99,5891397</b>
<b>%H lodo=</b>	<b>95,2341649</b>

---

Co-3



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 21,5**

**Co(mg/ml)= 32,8416667**

**Cu(mg/ml)= 44,0083333**

**Hu(cm)= 16,0445939**

**tu(min)= 581**

**Vu(cm/min)= 0,02761548**

**Ae(m2)= 6736,89767**

**t(min)= 500**

**Vc(cm/min)= 0,043**

**Ac(m2)= 7730,23256**

---

**CsA(mg/ml)= 32,8416667**

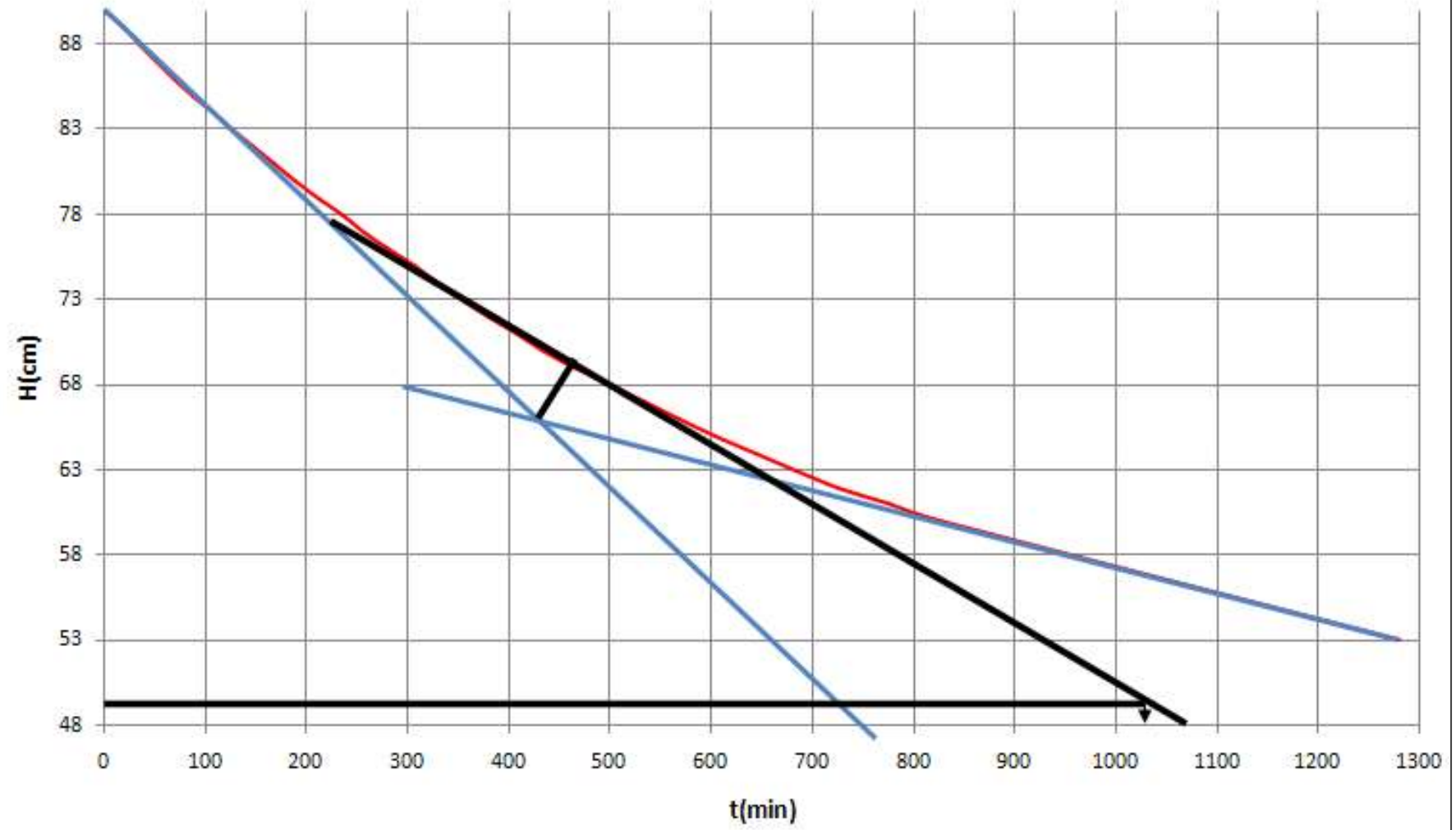
**CsB(mg/ml)= 0,15666667**

**%Remoción= 99,5230105**

**%H lodo= 95,784676**

---

# Co-4



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 90**

**Co(mg/ml)= 28,0266667**

**Cu(mg/ml)= 51,7783333**

**Hu(cm)= 48,7153572**

**tu(min)= 1074**

**Vu(cm/min)= 0,04535881**

**Ae(m2)= 2974,98**

**t(min)= 761**

**Vc(cm/min)= 0,11826544**

**Ac(m2)= 2810,62667**

---

**CsA(mg/ml)= 28,0266667**

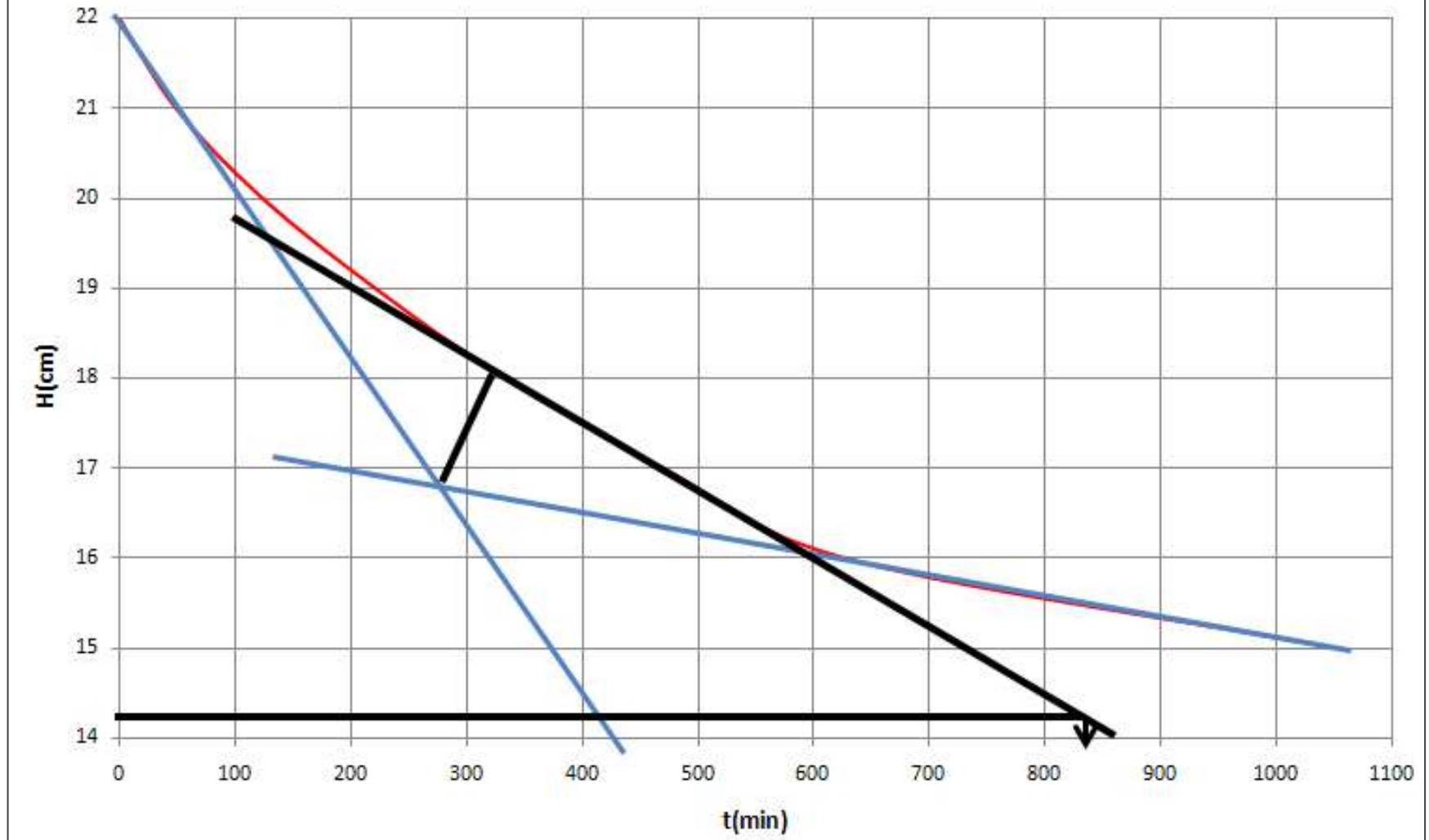
**CsB(mg/ml)= 0,165**

**%Remoción= 99,4112532**

**%H lodo= 95,0770679**

---

# Co-5



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 22**

**Co(mg/ml)= 31,9233333**

**Cu(mg/ml)= 49,5316667**

**Hu(cm)= 14,1790773**

**tu(min)= 836**

**Vu(cm/min)= 0,01696062**

**Ae(m2)= 9473,4**

**t(min)= 435**

**Vc(cm/min)= 0,05057471**

**Ac(m2)= 6572,45455**

---

**CsA(mg/ml)= 31,9233333**

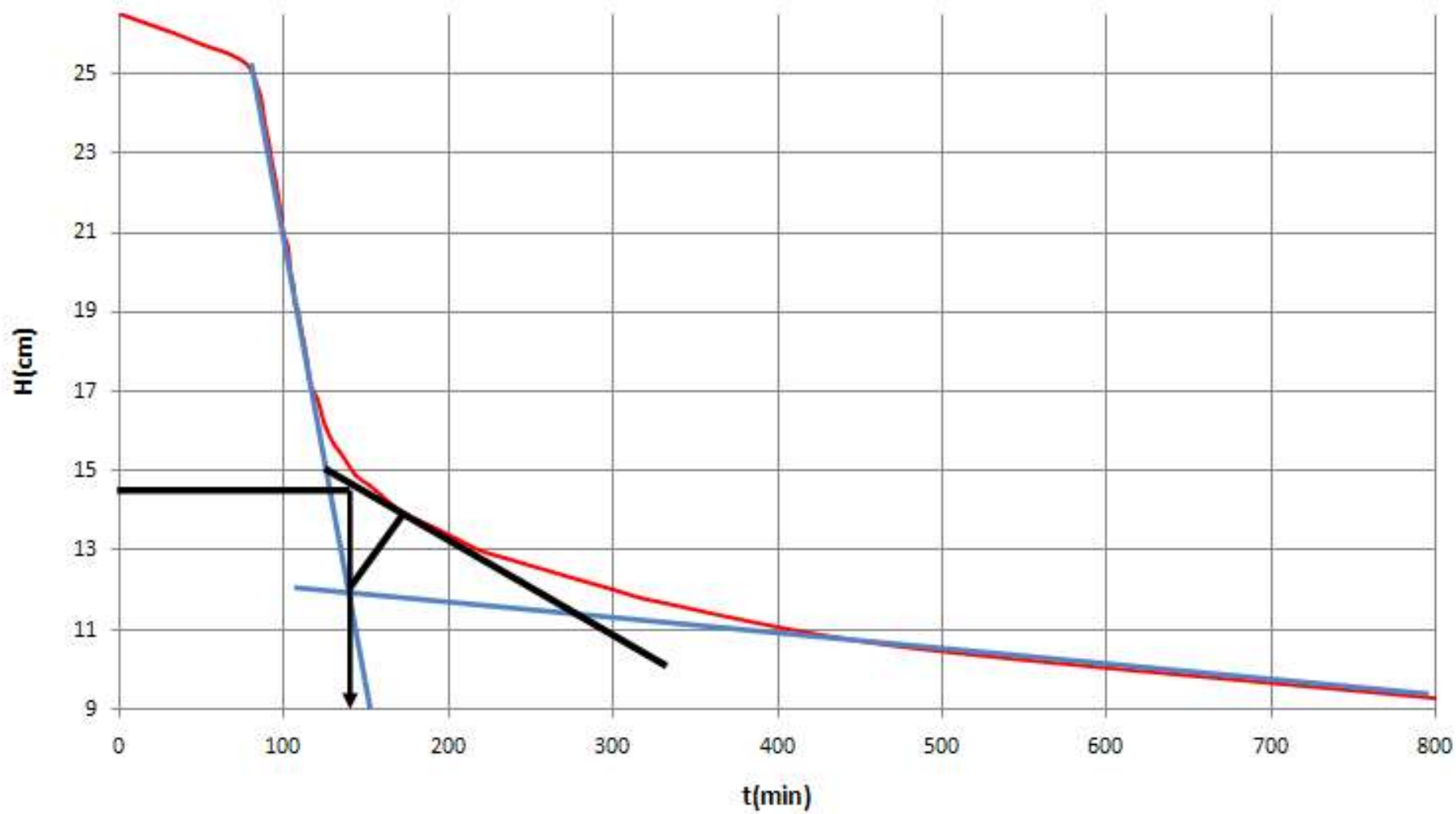
**CsB(mg/ml)= 0,16097701**

**%Remoción= 99,5039777**

**%H lodo= 95,2805934**

---

Co/2-1



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 26,5**

**Co(mg/ml)= 16,7116667**

**Cu(mg/ml)= 30,6833333**

**Hu(cm)= 14,4332157**

**tu(min)= 141**

**Vu(cm/min)= 0,10236323**

**Ae(m2)= 1326,46415**

**t(min)=**

**Vc(cm/min)= 0,33333333**

**Ac(m2)= 997,2**

---

**CsA(mg/ml)= 16,7116667**

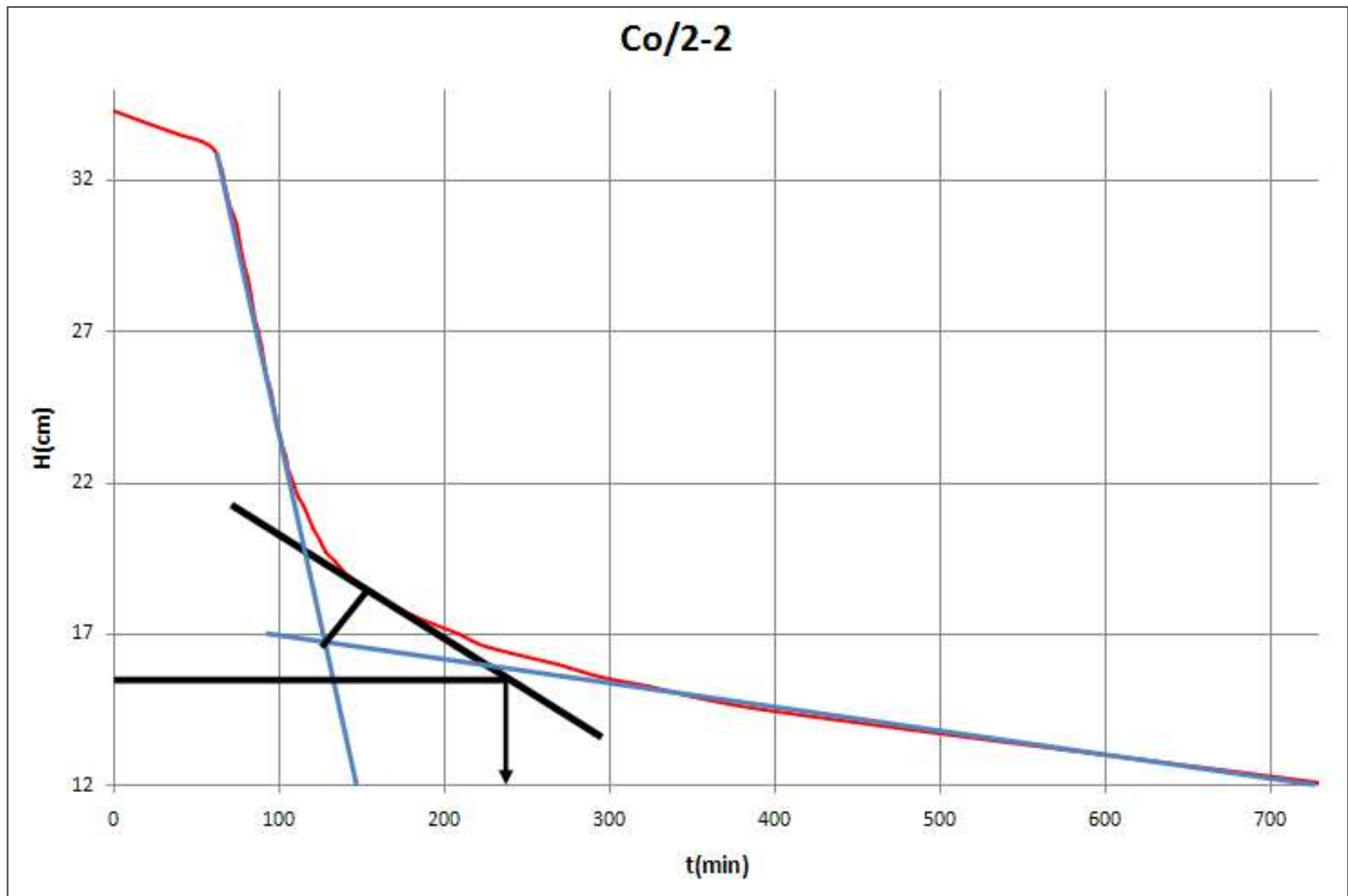
**CsB(mg/ml)= 0,19833333**

**%Remoción= 98,8130847**

**%H lodo= 97,0230106**

---

# Co/2-2



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 34,3**

**Co(mg/ml)= 16,7116667**

**Cu(mg/ml)= 36,7298**

**Hu(cm)= 15,6061337**

**tu(min)= 245**

**Vu(cm/min)= 0,0636985**

**Ae(m2)= 1780,71429**

**t(min)=**

**Vc(cm/min)= 0,344**

**Ac(m2)= 966,27907**

---

**CsA(mg/ml)= 16,7116667**

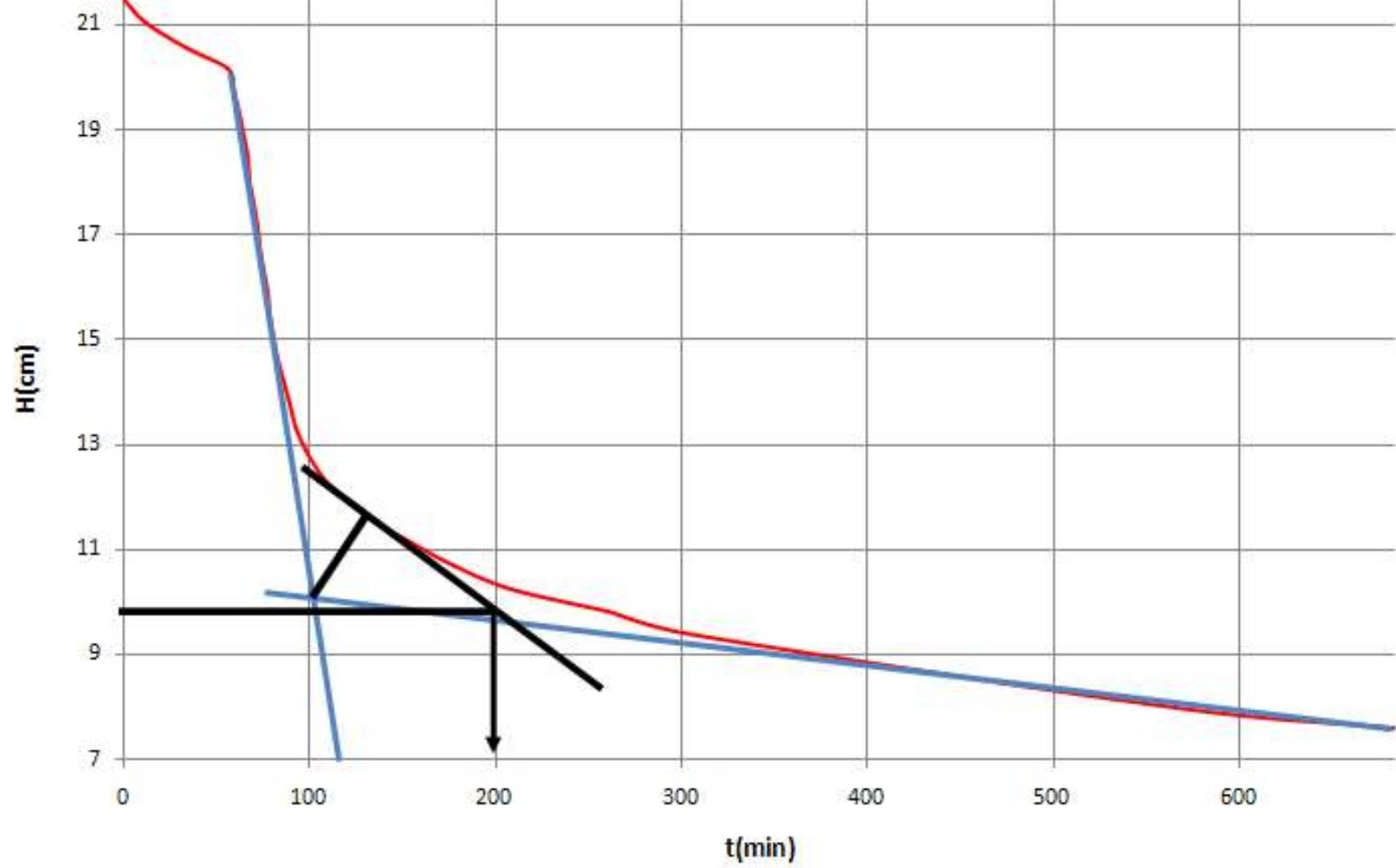
**CsB(mg/ml)= 0,21166667**

**%Remoción= 98,7334299**

**%H lodo= 98,0882598**

---

### Co/2-3



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 21,5**

**Co(mg/ml)= 16,7116667**

**Cu(mg/ml)= 36,7083333**

**Hu(cm)= 9,78799092**

**tu(min)= 200**

**Vu(cm/min)= 0,04893995**

**Ae(m2)= 2319,06977**

**t(min)=**

**Vc(cm/min)= 0,35839286**

**Ac(m2)= 927,473842**

---

**CsA(mg/ml)= 16,7116667**

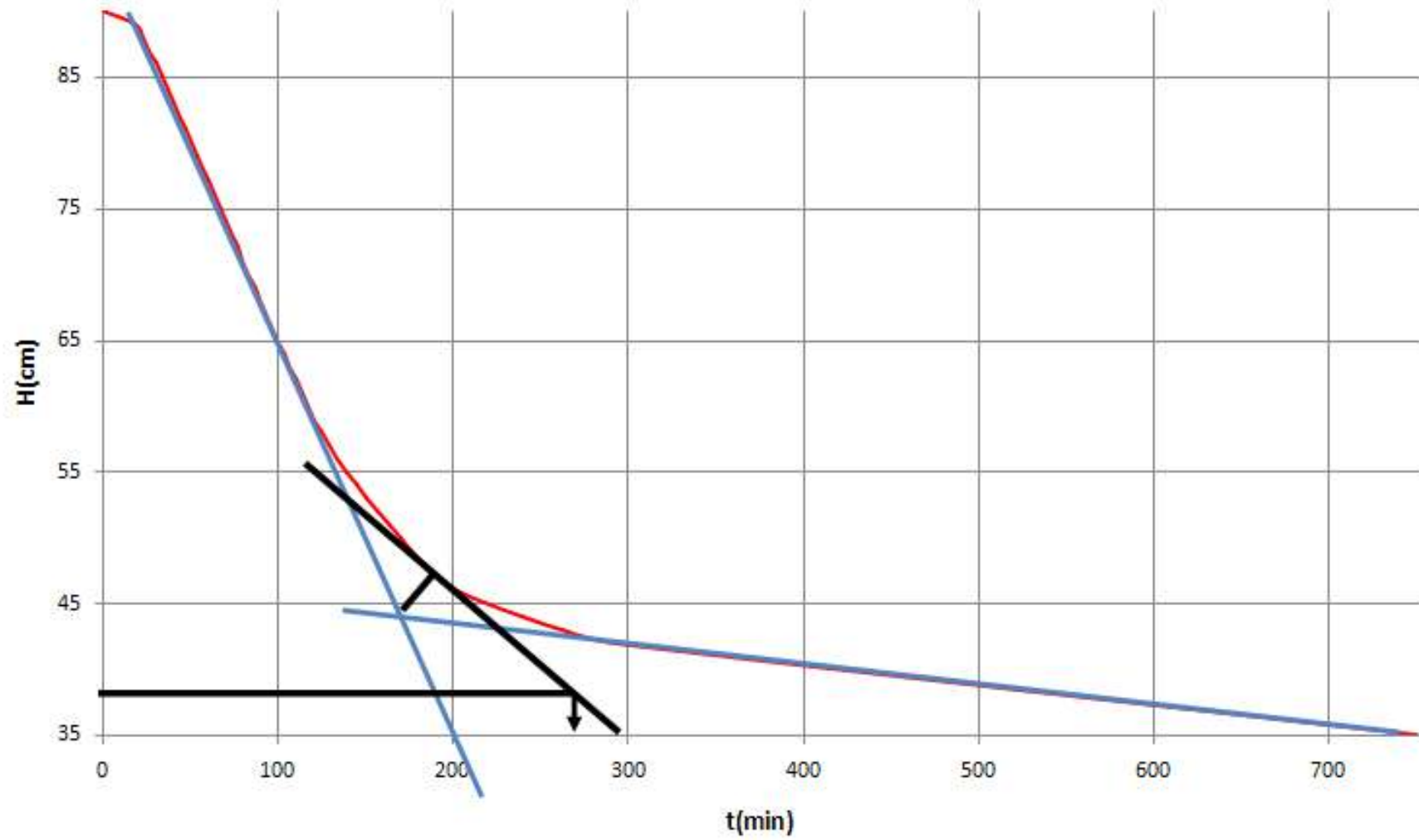
**CsB(mg/ml)= 0,22**

**%Remoción= 98,6836289**

**%H lodo= 96,4591455**

---

Co/2-4



---

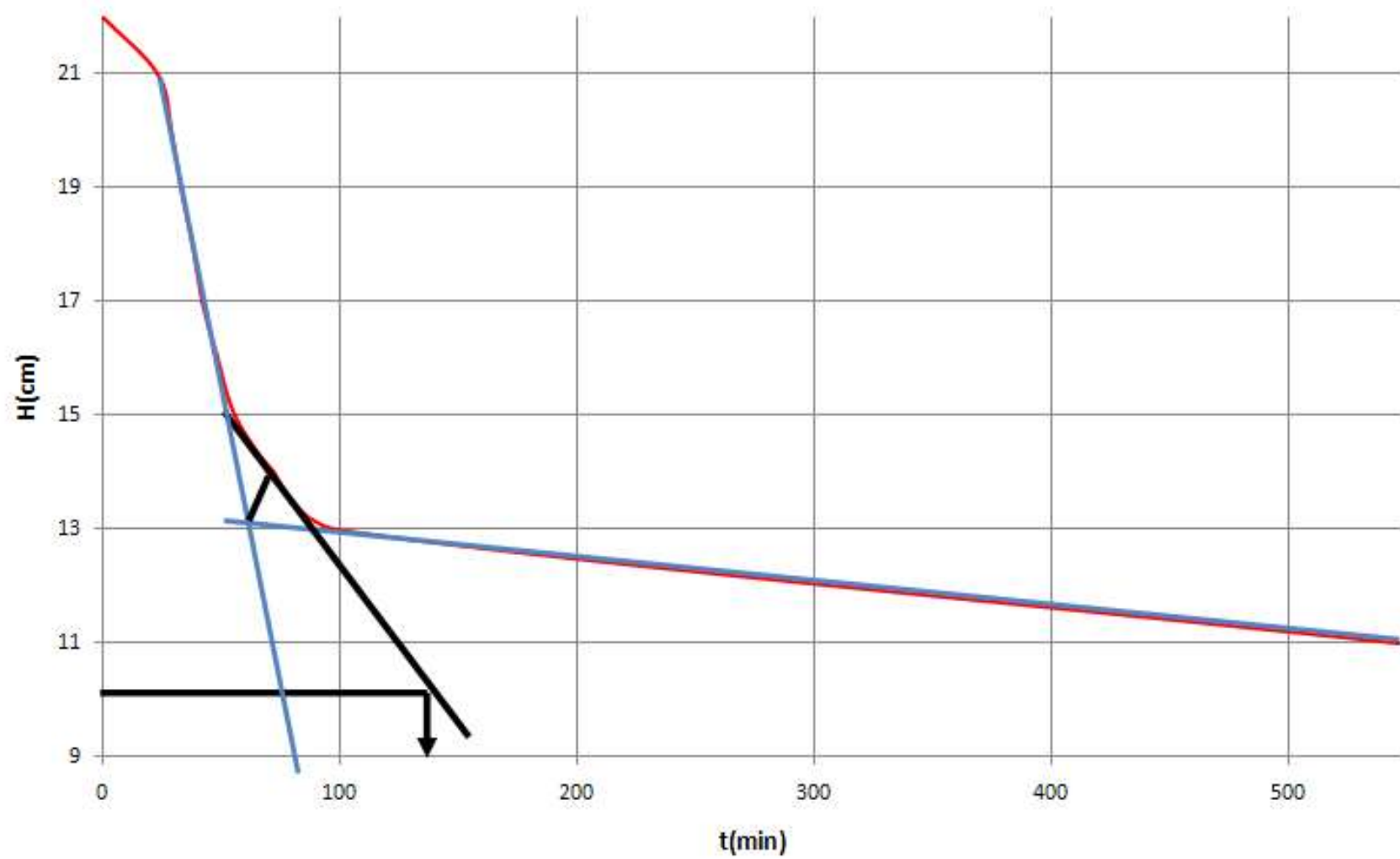
<b>Qo(m3/dia)=</b>	<b>2393,28</b>
<b>Ho(cm)=</b>	<b>90</b>
<b>Co(mg/ml)=</b>	<b>16,5366667</b>
<b>Cu(mg/ml)=</b>	<b>39,3316667</b>
<b>Hu(cm)=</b>	<b>37,839739</b>
<b>tu(min)=</b>	<b>267</b>
<b>Vu(cm/min)=</b>	<b>0,14172187</b>
<b>Ae(m2)=</b>	<b>739,59</b>
<b>t(min)=</b>	<b>200</b>
<b>Vc(cm/min)=</b>	<b>0,45</b>
<b>Ac(m2)=</b>	<b>738,666667</b>

---

<b>CsA(mg/ml)=</b>	<b>16,5366667</b>
<b>CsB(mg/ml)=</b>	<b>0,225</b>
<b>%Remoción=</b>	<b>98,6393872</b>
<b>%H lodo=</b>	<b>96,2156771</b>

---

Co/2-5



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 22**

**Co(mg/ml)= 16,6883333**

**Cu(mg/ml)= 36,2866667**

**Hu(cm)= 10,1178578**

**tu(min)= 137**

**Vu(cm/min)= 0,07385298**

**Ae(m2)= 1552,45909**

**t(min)=**

**Vc(cm/min)= 0,3559322**

**Ac(m2)= 933,885714**

---

**CsA(mg/ml)= 16,6883333**

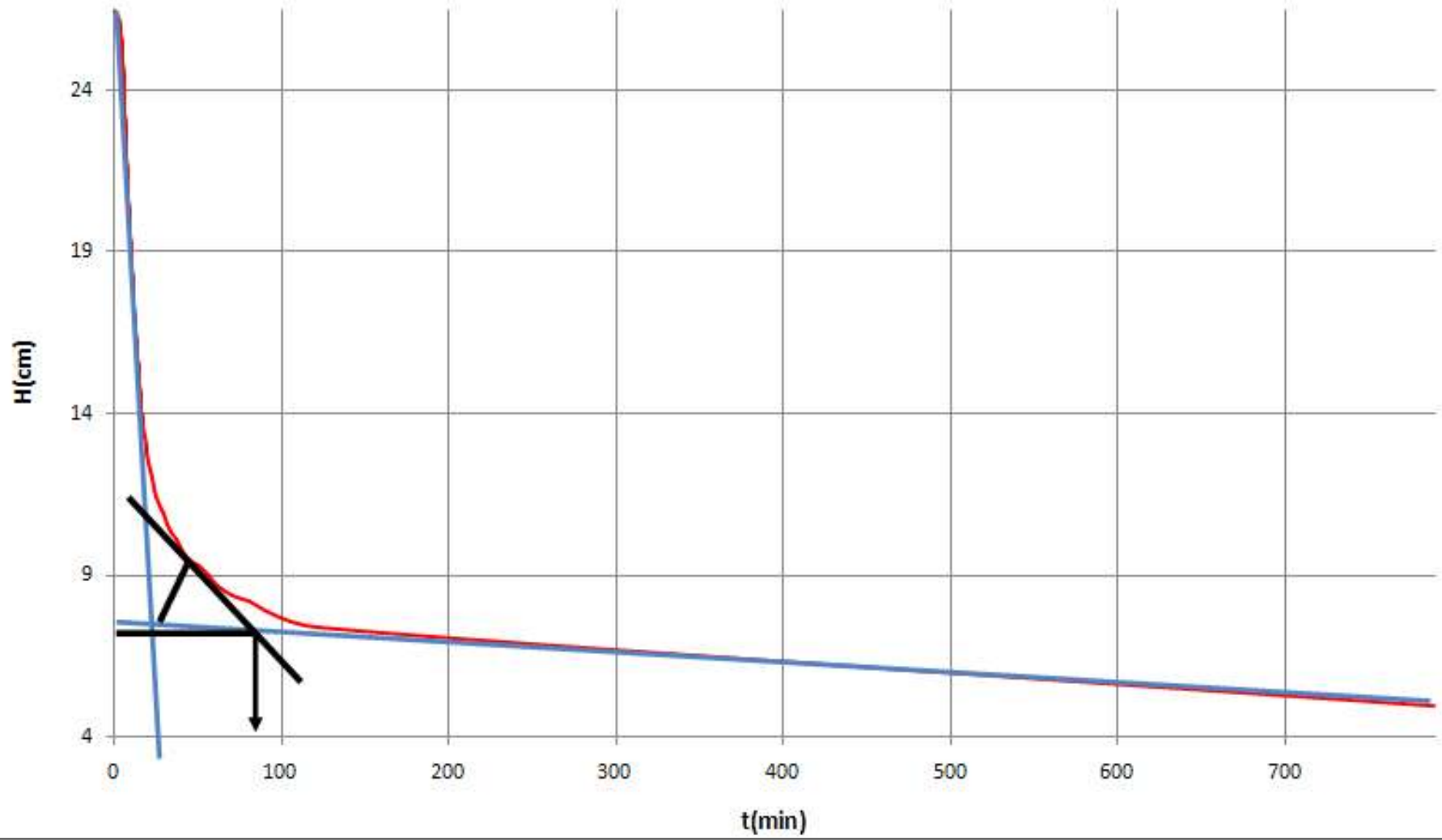
**CsB(mg/ml)= 0,22333333**

**%Remoción= 98,6617077**

**%H lodo= 96,4983949**

---

Co/4-1



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 26,5**

**Co(mg/ml)= 8,61333333**

**Cu(mg/ml)= 31,6633333**

**Hu(cm)= 7,20875882**

**tu(min)= 86**

**Vu(cm/min)= 0,08382278**

**Ae(m2)= 809,049057**

**t(min)= 27**

**Vc(cm/min)= 0,98148148**

**Ac(m2)= 338,671698**

---

**CsA(mg/ml)= 8,61333333**

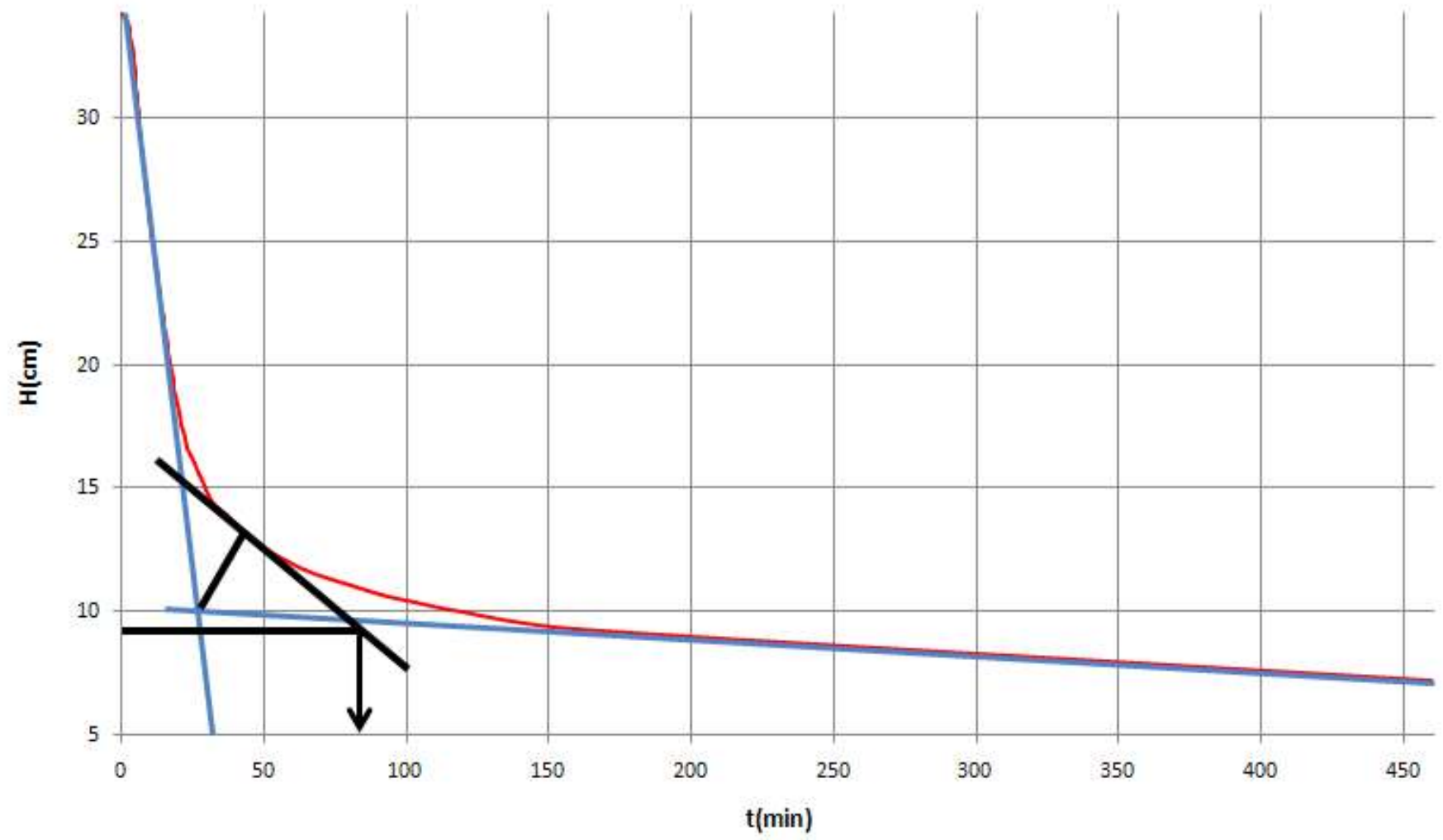
**CsB(mg/ml)= 0,27833333**

**%Remoción= 96,768532**

**%H lodo= 96,9308463**

---

# Co/4-2



---

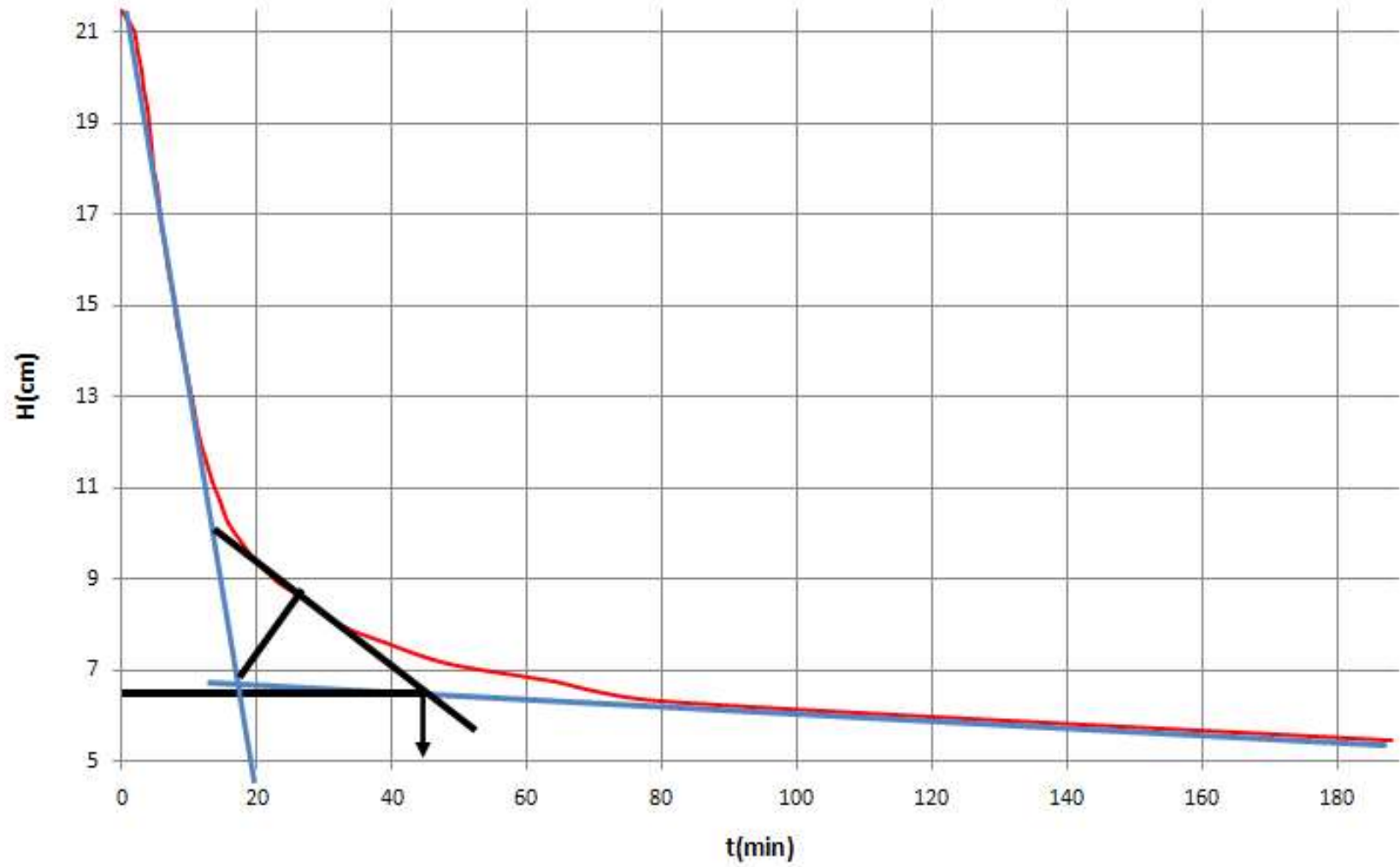
<b>Qo(m3/dia)=</b>	<b>2393,28</b>
<b>Ho(cm)=</b>	<b>34,3</b>
<b>Co(mg/ml)=</b>	<b>8,61333333</b>
<b>Cu(mg/ml)=</b>	<b>31,615</b>
<b>Hu(cm)=</b>	<b>9,34484685</b>
<b>tu(min)=</b>	<b>85</b>
<b>Vu(cm/min)=</b>	<b>0,10993937</b>
<b>Ae(m2)=</b>	<b>617,798834</b>
<b>t(min)=</b>	<b>33</b>
<b>Vc(cm/min)=</b>	<b>1,03939394</b>
<b>Ac(m2)=</b>	<b>319,801749</b>

---

<b>CsA(mg/ml)=</b>	<b>8,61333333</b>
<b>CsB(mg/ml)=</b>	<b>0,29833333</b>
<b>%Remoción=</b>	<b>96,5360204</b>
<b>%H lodo=</b>	<b>96,9353877</b>

---

# Co/4-3



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 21,5**

**Co(mg/ml)= 8,61333333**

**Cu(mg/ml)= 28,2116667**

**Hu(cm)= 6,56418738**

**tu(min)= 45**

**Vu(cm/min)= 0,14587083**

**Ae(m2)= 521,790698**

**t(min)= 20**

**Vc(cm/min)= 1,075**

**Ac(m2)= 309,209302**

---

**CsA(mg/ml)= 8,61333333**

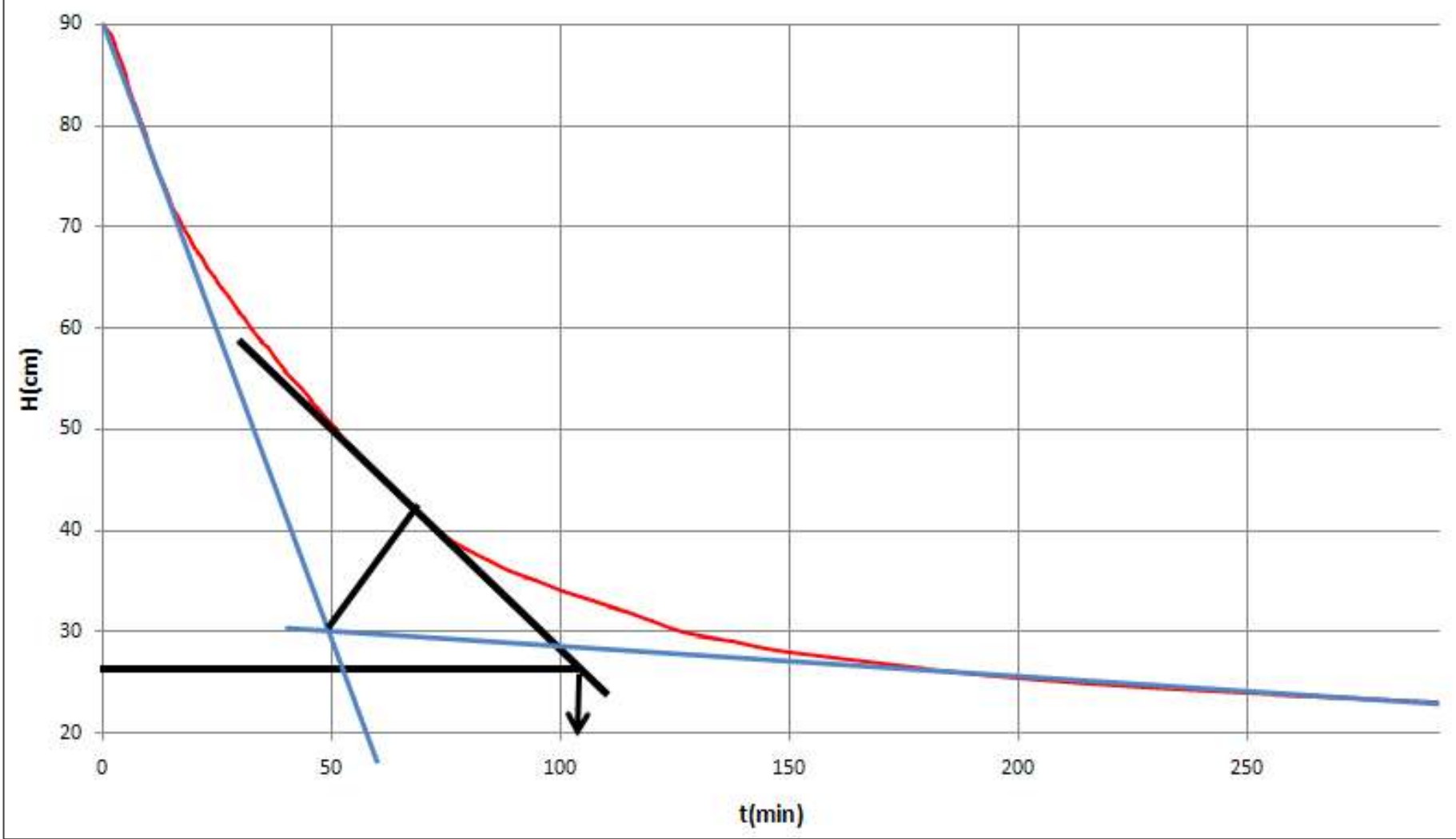
**CsB(mg/ml)= 0,32666667**

**%Remoción= 96,2075027**

**%H lodo= 97,2562394**

---

# Co/4-4



---

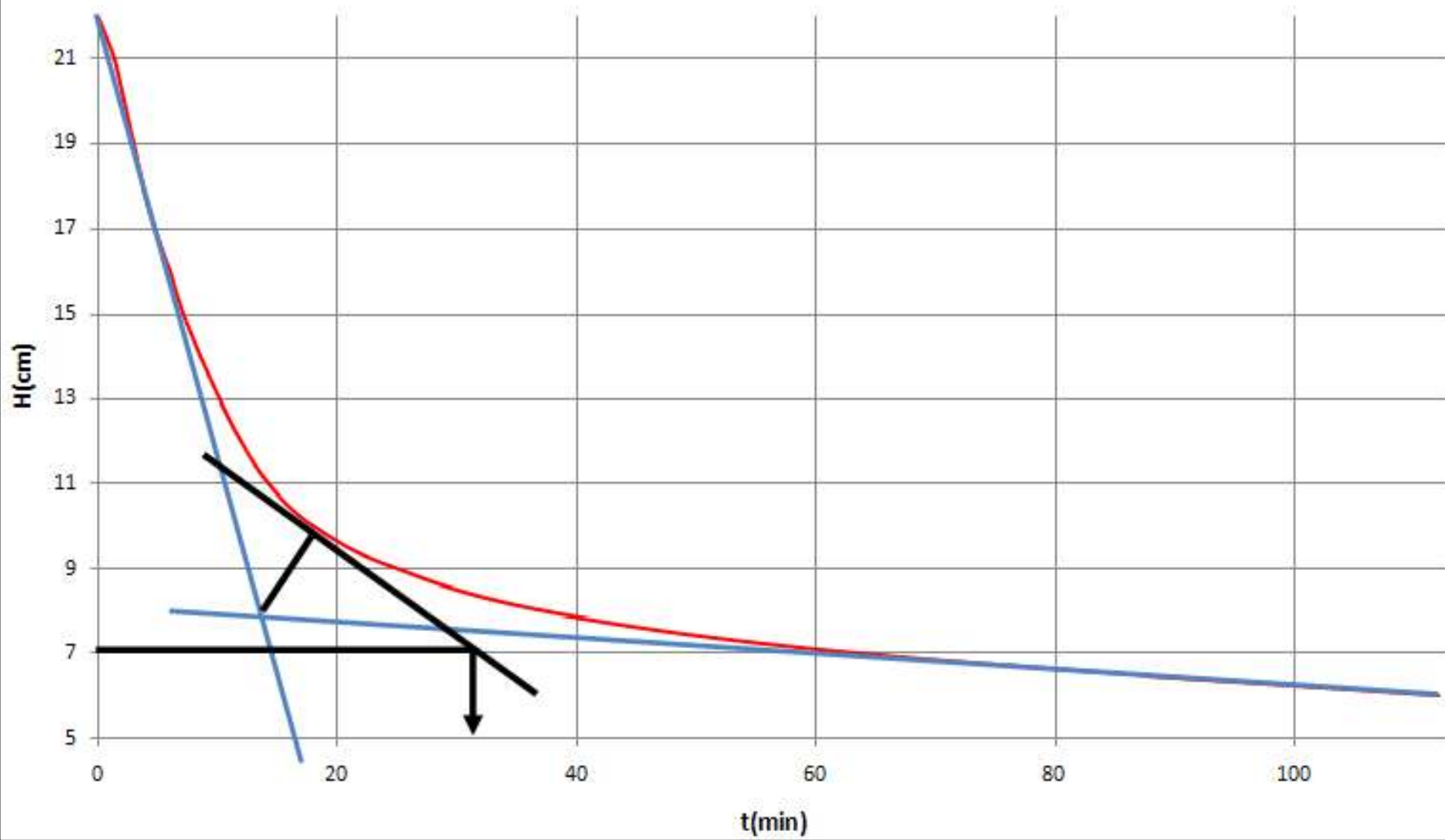
<b>Qo(m3/dia)=</b>	<b>2393,28</b>
<b>Ho(cm)=</b>	<b>90</b>
<b>Co(mg/ml)=</b>	<b>8,44333333</b>
<b>Cu(mg/ml)=</b>	<b>29,115</b>
<b>Hu(cm)=</b>	<b>26,0999485</b>
<b>tu(min)=</b>	<b>105</b>
<b>Vu(cm/min)=</b>	<b>0,24857094</b>
<b>Ae(m2)=</b>	<b>290,85</b>
<b>t(min)=</b>	<b>59</b>
<b>Vc(cm/min)=</b>	<b>1,52542373</b>
<b>Ac(m2)=</b>	<b>217,906667</b>

---

<b>CsA(mg/ml)=</b>	<b>8,44333333</b>
<b>CsB(mg/ml)=</b>	<b>0,31166667</b>
<b>%Remoción=</b>	<b>96,3089367</b>
<b>%H lodo=</b>	<b>97,1708701</b>

---

# Co/4-5



---

**Qo(m3/dia)= 2393,28**

**Ho(cm)= 22**

**Co(mg/ml)= 8,32166667**

**Cu(mg/ml)= 25,8733333**

**Hu(cm)= 7,07588252**

**tu(min)= 32**

**Vu(cm/min)= 0,22112133**

**Ae(m2)= 362,618182**

**t(min)= 17**

**Vc(cm/min)= 1,29411765**

**Ac(m2)= 256,854545**

---

**CsA(mg/ml)= 8,32166667**

**CsB(mg/ml)= 0,325**

**%Remoción= 96,0945558**

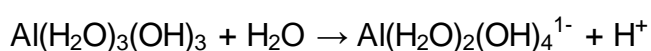
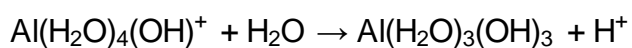
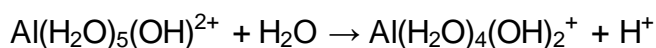
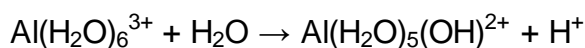
**%H lodo= 97,4779213**

---

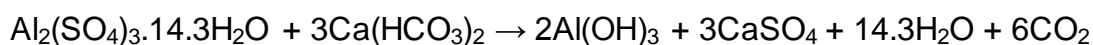
## ANEXO 2

### REACCIONES DESARROLLADAS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN

#### HIDRÓLISIS



#### CONSUMO DE ALCALINIDAD



Cuando la alcalinidad natural no es suficiente para reaccionar con la dosis de alumbre ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), se puede añadir cal apagada o carbonato de sodio para cubrir el déficit:

