

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS UNIDADES DE  
FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE LA PLANTA PALACÉ EN LA CIUDAD  
DE POPAYÁN, MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES**

**ADRIANA PATRICIA LÓPEZ MARTÍNEZ  
JESSICA ESTEFANÍA RAMÍREZ PALENCIA**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2014**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS UNIDADES DE  
FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE LA PLANTA PALACÉ EN LA CIUDAD  
DE POPAYÁN, MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES**

**ADRIANA PATRICIA LÓPEZ MARTÍNEZ  
JESSICA ESTEFANÍA RAMÍREZ PALENCIA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**Director  
JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA  
Ingeniero Sanitario, MSc.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2014**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director

\_\_\_\_\_  
MSc. Javier Ernesto Fernández Mera

Jurado

\_\_\_\_\_  
MSc. John Calderón Ramírez

Jurado

\_\_\_\_\_  
MSc. Napoleón Zambrano Alfonso

Fecha de sustentación: Popayán, 03 de Marzo del 2014

## DEDICTORIA

A MI HIJA NATALIA, POR SER MI INSPIRACIÓN Y EL MOTIVO MÁS IMPORTANTE  
PARA EMPRENDER CADA NUEVO RETO QUE ACOMPAÑE MI VIDA.  
A MIS PADRES, JENNY Y LUIS, POR SER LOS MEJORES GUÍAS Y MAESTROS DE  
MI VIDA.

A RODRIGO, POR SU AMOR, PACIENCIA Y APOYO INCONDICIONAL EN CADA  
UNO DE MIS PROYECTOS.

A MIS HERMANOS Y TÍAS, POR TODO EL APOYO QUE HE RECIBIDO DURANTE  
ESTOS AÑOS.

Y A CADA UNA DE ESAS PERSONAS QUE DE ALGUNA MANERA  
CONTRIBUYERON A LA CULMINACIÓN DE ESTA ETAPA.

Adriana Patricia López Martínez

A DIOS, POR PERMITIRME LOGRAR MIS PROPÓSITOS, POR SU PROTECCIÓN Y  
POR GUIAR SIEMPRE MI VIDA.

A MIS PADRES, HECTOR Y UVINEY, POR SU AMOR, SUS CONSEJOS Y APOYO  
INCONDICIONAL, A MIS HERMANOS, A MI FAMILIA Y A CADA UNO DE LOS  
QUE ME ACOMPAÑARON DE UNA U OTRA FORMA EN ESTE PROCESO, LES  
DEDICO CON TODO MI AMOR, TODO MI ESFUERZO PARA HACER REALIDAD  
UNO DE MIS GRANDES SUEÑOS Y LES AGRADEZCO CON EL CORAZÓN SU  
CONTRIBUCIÓN PARA ELLO.

Jessica Estefanía Ramírez Palencia

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Javier Ernesto Fernández Mera, por sus valioso aporte, orientación y asesoría, como director del presente trabajo, las cuales permitieron cumplir con cada uno de los objetivos propuestos.

A la empresa Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., en especial al Ingeniero Mauricio Ramírez, por el espacio y la oportunidad de realizar el presente trabajo y por permitirnos disponer de las instalaciones y equipos necesarios para llevarlo a cabo.

A Mónica Delgado, auxiliar de laboratorio del Acueducto y Alcantarillado de Popayán, a los operarios de la planta de tratamiento de agua potable “Palacé”, por toda su colaboración, paciencia y hospitalidad.

A los Ingenieros Luis Jorge Gonzales Muñoz y Giovany Calvache por su asesoría y valiosa colaboración en la realización de los diferentes ensayos.

A Rodrigo Calle, por su acompañamiento y colaboración.

A todos ustedes, expresamos infinitos sentimientos de gratitud por haber sido parte de este proceso y contribuir en este gran logro.

**Adriana López y Jessica Ramírez**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	15
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4. MARCO CONTEXTUAL.....	16
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “PALACÉ” <sup>2</sup> .....	16
4.1.1. Características.....	16
4.1.2. Ubicación.....	16
4.1.3. Cámara de llegada .....	16
4.1.4. Dosificación .....	17
4.1.5. Mezcla rápida .....	17
4.1.6. Entrega a Floculadores .....	17
4.1.7. Floculación .....	17
4.1.8. Sedimentación.....	17
4.1.9. Filtración.....	18
4.1.10. Cloración.....	18
4.1.11. Otras estructuras .....	19
5. MARCO TEÓRICO .....	20
5.1. MODELOS DE FLUJO.....	20
5.1.1. Flujo intermitente o discontinuo.....	20
5.1.2. Flujo Continuo .....	20
5.1.2.1. Flujo de Pistón.....	20
5.1.2.2. Flujo Mezclado .....	20
5.1.2.3. Flujo no ideal.....	21
5.2. TIEMPO DE RETENCIÓN .....	21
5.2.1. Cálculo del Tiempo medio de retención a partir de datos experimentales.....	22
5.3. GRADIENTE DE VELOCIDAD .....	22
5.4. CARGA SUPERFICIAL.....	23
5.5. ENSAYOS CON TRAZADORES .....	24

5.5.1. Sustancias trazadoras .....	24
5.5.1.1. Cloruro de Sodio como sustancia trazadora .....	25
5.5.2. Dosificación de sustancias trazadoras .....	25
5.5.2.1. Dosificación Instantánea .....	25
5.5.2.2. Dosificación Continua.....	25
5.5.3. Modelos matemáticos para describir y analizar el comportamiento hidráulico real de un reactor.....	26
5.5.3.1. Modelo Simplificado de Wolf y Resnick.....	26
5.5.3.2. Análisis de la Curva Concentración vs Tiempo <sup>2</sup> .....	28
5.5.3.3. Índice de Morril <sup>2</sup> .....	30
5.5.4. Antecedentes de utilización de sustancias trazadoras en evaluación de reactores y Plantas de tratamiento.....	31
5.5.4.1. Otras aplicaciones de trazadores .....	32
6. METODOLOGÍA .....	33
6.1. ENSAYOS PRELIMINARES .....	33
6.1.1. Medición de caudales.....	33
6.1.2. Pruebas con trazador .....	33
6.1.3. Medición de pérdidas de carga en el floculador .....	34
6.2. DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN LAS UNIDADES DE FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN.....	34
6.2.1. Consideraciones Iniciales.....	34
6.2.2. Medición de Caudal.....	35
6.2.3. Determinación del Tiempo de Retención teórico (t <sub>0</sub> ) .....	36
6.2.4. Elaboración de la curva de calibración .....	36
6.2.5. Ensayo de Trazadores .....	37
6.2.5.1. Dosificación del trazador .....	37
6.2.5.2. Toma de muestras .....	38
6.2.6. Tratamiento de los datos .....	39
6.3. TIEMPO MEDIO DE RETENCIÓN EN FLOCULADOR Y EN SEDIMENTADOR.....	40
6.4. DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN.....	40
6.5. CARGA SUPERFICIAL DE SEDIMENTACIÓN .....	41
6.6. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN .....	42
7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	44
7.1. ENSAYOS DE TRAZADORES .....	44

7.2.	PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS FLOCULADORES.....	45
7.3.	PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN .....	46
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
8.1.	DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN LAS UNIDADES DE FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN.....	47
8.1.1.	Análisis en floculadores.....	47
8.1.1.1.	Análisis del comportamiento del flujo .....	48
8.1.1.2.	Análisis de la curva Concentración Vs Tiempo para las unidades de floculación.....	49
8.1.2.	Comportamiento del flujo en sedimentadores .....	51
8.1.2.1.	Análisis del comportamiento del flujo .....	51
8.1.2.2.	Análisis de la curva Concentración Vs Tiempo para las unidades de sedimentación .....	53
8.2.....	ANÁLISIS DEL TIEMPO MEDIO Y DEL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN	54
8.3.	CARGA SUPERFICIAL DE SEDIMENTACIÓN .....	57
8.3.1.	Prueba de sedimentabilidad para el caudal de 216 L/s .....	60
9.	CONCLUSIONES .....	62
10.	REFERENCIAS .....	63
	ANEXOS .....	66
	ANEXO I. CURVAS DE CONDUCTIVIDAD VS CONCETRACIÓN DE SAL	
	ANEXO II. MEMORIAS DE CÁLCULOS PARA ENSAYOS CON TRAZADORES	
	ANEXO III. MEMORÍAS DE CÁLCULO PARA DETERMINAR EL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN	
	ANEXO IV. CARGA SUPERFICIAL Y PRUEBAS DE SEDIMENTABILIDAD	



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones iniciales de los ensayos de trazadores .....	44
Tabla 2. Pérdidas de carga en los floculadores.....	46
Tabla 3. Comportamiento del flujo en el Floculador de la Línea 1.....	47
Tabla 4. Comportamiento del flujo en el Floculador de la Línea 2.....	47
Tabla 5. Relaciones de tiempos para los floculadores .....	50
Tabla 6. Comportamiento del flujo en el Sedimentador de la Línea 1 .....	51
Tabla 7. Comportamiento del flujo en el Sedimentador de la Línea 2 .....	51
Tabla 8. Relaciones de tiempo para los sedimentadores .....	53
Tabla 9. Gradientes de Floculación.....	54
Tabla 10. Producto entre el tiempo medio y el gradiente de floculación .....	56
Tabla 11. Cargas superficiales de sedimentación .....	58
Tabla 12. Eficiencias de remoción de turbiedad para diferentes velocidades críticas de sedimentación para un caudal de 175 L/s.....	58
Tabla 13. Eficiencias de remoción de turbiedad para diferentes velocidades críticas de sedimentación para un caudal de 216 L/s.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de tratamiento de agua potable “Palacé” .....	16
Figura 2. Información útil obtenible a partir de un experimento con un trazador ...	22
Figura 3. Aplicación de trazadores en un reactor. ....	24
Figura 4. Cantidad de trazador que permanece en el reactor. ....	28
Figura 5. Concentración del trazador en el efluente de un reactor.....	29
Figura 6. Índice de Morril.....	31
Figura 7. Medición del Caudal en el tercer tramo del canal de entrega a los floculadores.....	36
Figura 8. Dilución y dosificación del trazador en la entrada de los floculadores ...	37
Figura 9. Toma de Muestras en floculadores .....	38
Figura 10. Toma de muestras en sedimentadores .....	39
Figura 11. Medición de niveles de agua en los compartimientos de los floculadores .....	41
Figura 12. Vista en planta de las Placas y Muros en una cámara del sedimentador .....	42
Figura 13. Curva Tiempo Vs Concentración de trazador a la salida del a) Floculador 1 y b) Floculador 2.....	45
Figura 14. Curva Tiempo Vs Concentración de trazador a la salida del a) Sedimentador 1 y b) Sedimentador 2.....	45
Figura 15 . Curva de sedimentabilidad para el agua floculada de la a) línea 1 de tratamiento y b) línea 2 de tratamiento, para un caudal de 175 L/s.....	46
Figura 16. Curva Porcentaje de trazador que sale Vs tiempo de salida del a) Floculador 1 y b) Floculador 2.....	49
Figura 17. Curva Porcentaje de trazador que sale Vs tiempo de salida del a) Sedimentador 1 y b) Sedimentador 2.....	52
Figura 18. Curva de Caudal por línea de floculación Vs Gradiente medio de floculación para a) Primer línea de floculación y b) segunda línea d floculación...	57
Figura 19. Curva de sedimentabilidad para el agua floculada de la a) línea 1 de tratamiento y b) línea 2 de tratamiento, para un caudal de 216 L/s.....	60

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de servicios de saneamiento es un importante indicador de la calidad de vida de una población. Todas las personas, por derecho, deben ser abastecidas de forma segura, donde el recurso debe cumplir con las condiciones establecidas en las normas nacionales para un agua apta para consumo humano; libre de microorganismos y agentes patógenos, sin olor, ni sabor desagradable, sin contenido de sustancias tóxicas, un agua sin color y sin turbiedad.

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable tienen como objetivo garantizar que el líquido servido a la población sea de excelente calidad, por esto es importante asegurar su correcto funcionamiento en cada una de sus etapas, ya que en algunos casos la hidrodinámica de los procesos y operaciones unitarias que intervienen en la depuración del agua es afectada por cortos circuitos hidráulicos y la intensidad de mezclado lo que llega a producir un volumen no activo dentro del sistema denominado zonas muerta (Morgan *et al.*, 1997), parámetros hidráulicos que afectan la eficiencia de la plantas si no cuentan con prontas medidas correctoras. Por esta razón las Plantas de Tratamiento de Agua Potable deben funcionar con la preocupación de dar óptimo rendimiento, para así conseguir un comportamiento armónico y resultados efectivos en la prestación del servicio (Capacho y Uribe, 2005).

Teniendo en cuenta algunas limitaciones que presenta actualmente la Planta de Tratamiento de Agua Potable “Palacé”, debido al levantamiento del floc en los sedimentadores cuando los caudales sobrepasan los 150 L/s a la entrada del sistema de tratamiento, en el presente trabajo de investigación se dan a conocer las conclusiones obtenidas a partir de una evaluación realizada en la misma, para determinar el comportamiento hidráulico de sus unidades de floculación y sedimentación, mediante la implementación de trazadores.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acceso al agua potable se considera uno de los derechos fundamentales básicos y un componente de las políticas eficaces de protección de la salud (OMS, 2006). Colombia aunque es considerado uno de los países con mayor riqueza hídrica gracias a su localización geográfica y variabilidad en sus condiciones climáticas (MADS, 2010), la calidad del agua para consumo humano servida a diferentes poblaciones es deficiente y se relaciona principalmente con la presencia de gérmenes patógenos, sin descartar contaminantes de origen fisicoquímico (Arrieta, 2002), lo cual se ve influido en muchos casos por la ausencia o mal estado de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en los sistemas de acueductos del país. Cabe señalar que a nivel nacional se tiene una cobertura del 86.1% en sistemas de acueductos (MADS, 2010) y según informes de la Defensoría del Pueblo (2011) el 91% del agua suministrada a las poblaciones de 466 municipios, que no cuentan con un sistema de tratamiento, es inviable sanitariamente, y el 18% del agua que sirve a 970 municipios que si cuentan con una PTAP, presenta la misma situación en cuanto a calidad del recurso se refiere.

Según la Defensoría del Pueblo (2011) el 59% de los municipios que presentan algún nivel de riesgo en la calidad de agua tratada, requieren optimizar sus sistemas de tratamiento para minimiza el riesgo y mejorar sus características hidráulicas de operación.

En el departamento del Cauca el 93% de los municipios cuentan con PTAP, de las cuales el 66% se encuentran en buen estado, 24% en regular y el 10% no tienen ningún sistema de tratamiento. Pese a estos indicadores para el año 2010, sólo se presentaron cuatro proyectos que involucraban la necesidad de ampliación u optimización de las PTAP existentes, dentro de los proyectos que se encontraban radicados por los diferentes municipios para cumplimiento de las necesidades de acueducto y alcantarillado (EMCASERVICIOS, 2010).

El municipio de Popayán cuenta con tres PTAP, entre ellas la Planta de Tratamiento de Agua Potable “PALACÉ”, la cual lleva más de un año de funcionamiento y abastece aproximadamente a veinte mil usuarios ubicados al norte de la ciudad (Acueducto y Alcantarillado de Popayán). Según reportes de la PTAP, se están presentando limitaciones con el proceso de tratamiento; la capacidad actual de la planta es aproximadamente 250 L/s, sin embargo su funcionamiento con caudales superiores a 150L/s genera rompimiento del floc en los sedimentadores, disminuyendo la carrera de filtración<sup>1</sup>, situación que baja la eficiencia de los sistemas, ya que al disminuir el tiempo de operación del filtro se aumenta el consumo de agua, y además puede generar problemas en la calidad del agua tratada si no cuenta con mantenimiento continuo.

1. Entrevista con el Ingeniero Mauricio Ramírez. Jefe de Área de Producción. Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Son distintas las causas por las que una PTAP puede presentar ineficiencia en cuanto a la calidad de agua que esté produciendo. Dentro de los criterios que deben ser tenidos en cuenta a evaluar, está el de determinar si el nivel tecnológico es apropiado, el cual debe ser el más conveniente de acuerdo con las características de la comunidad, el nivel de desarrollo y la capacidad técnico-administrativa de la entidad responsable de la operación y mantenimiento de los sistemas (RAS, 2000).

Dichos errores también pueden ser de tipo sistémico por parte del personal de la planta que no esté debidamente capacitado para la operación adecuada de ésta, o simplemente que la PTAP no cuente con los recursos financieros suficientes para producir un agua de calidad y tenga que omitir varias operaciones y procesos, o que estos recursos, no se encuentren disponibles oportunamente para realizar el mantenimiento necesario en los equipos.

Se debe tener en cuenta también, que las eficiencias de los procesos que se llevan a cabo en una PTAP además de depender de la adecuada selección y especificación de las variables que lo afectan, dependen del adecuado comportamiento hidráulico de la estructura en la cual se efectúan las conversiones o reacciones correspondientes, que no es condición suficiente, pero sí necesaria, para una buena eficiencia de los procesos que en ella se realizan (Pérez y Galvis, 1990).

La Planta de Tratamiento de Agua Potable “PALACÉ” se encuentra ubicada en la Hacienda Rio blanco. Actualmente cuenta con sistemas de: mezcla rápida (canaleta parshall), floculación hidráulica de tipo COX, sedimentación de alta tasa, filtración rápida a gravedad y desinfección con cloro (Gonzales y Sanclemente, 1998).

La Planta “PALACÉ” se construyó para atender la demanda de la zona norte de la ciudad y el déficit de la zona baja presentado durante las épocas de verano, al ser insuficientes los caudales de los ríos Molino, Pisojé y Las Piedras. Ésta se construyó inicialmente para tratar un caudal de 250L/s, proyectando a mediano plazo un caudal a tratar de 500L/s (Gonzales y Sanclemente, 1998). Dadas las limitaciones presentadas actualmente dentro de la PTAP para tratar caudales de agua, superiores a 150L/s por rompimiento del floc y por la baja turbidez presentada en temporadas secas (Entrevista Mauricio Ramírez), la cual, en presencia de color disminuye la superficie de los coloides, lo que desestimulan la adsorción de las moléculas de color, situación que requiere consecuentemente mayores dosis de coagulantes (Arboleda 2000, citado por Quiróz *et al.*, 2010); se hace necesaria una evaluación de la PTAP que permita determinar las acciones

necesarias para conseguir una optimización del proceso de tratamiento en general.

De esta forma en el presente estudio se realizó una evaluación en las unidades de floculación y sedimentación de la PTAP y así determinar las características reales del flujo y tiempos de retención que se presentan en cada unidad, además, de los gradientes reales de floculación y cargas superficiales en los sedimentadores. Los resultados de esta investigación servirán de soporte para proponer alternativas de optimización dentro de la PTAP o sugerencias de nuevas evaluaciones en la misma con base a parámetros diferentes al comportamiento hidráulico.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento hidráulico de las unidades de Floculación y Sedimentación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable “PALACÉ” del municipio de Popayán, mediante la aplicación de trazadores.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Identificar el comportamiento del flujo en cada unidad de tratamiento a evaluar para diferentes caudales.

Estudiar los parámetros de operación de la planta, gradiente de floculación, tiempo de floculación y sedimentación, y carga superficial de sedimentación, para diferentes caudales y establecer su influencia sobre la calidad del agua.

## 4. MARCO CONTEXTUAL

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “PALACÉ”<sup>2</sup>

#### 4.1.1. Características

La PTAP “Palacé” es de tipo convencional, diseñada para una capacidad de 250 L/s inicialmente y proyectada para tratar un caudal de 500 L/s. Actualmente atiende por gravedad la demanda de agua de parte de la zona norte y está proyectada a cubrir el déficit de la zona baja en tiempo seco, de la ciudad de Popayán. Tiene los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y cloración (ver Figura 1).

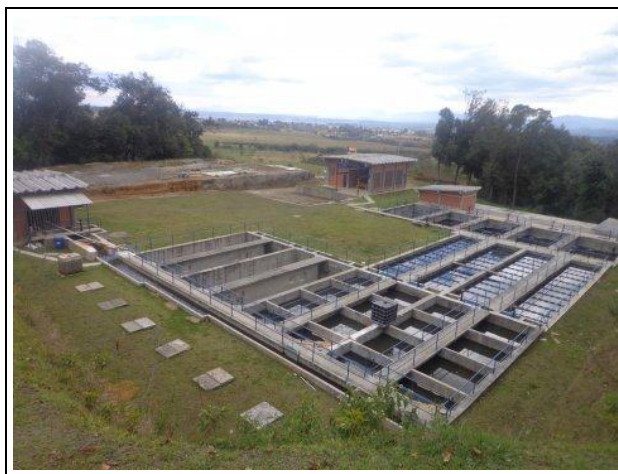


Figura 1. Planta de tratamiento de agua potable “Palacé”

#### 4.1.2. Ubicación

La planta Palacé se encuentra localizada en un cerro ubicado sobre la Hacienda Rioblanco, en la vía que de Popayán conduce a la vereda de El Cabuyo, sobre la cota 1.932.00 msnm, en un lote de terreno de 25.000 m<sup>2</sup> (Gonzales y Sanclemente, 1998).

#### 4.1.3. Cámara de Llegada

La tubería procedente de la conducción entrega el caudal a la cámara de llegada que tiene 2.50 m de largo, 2.85 m de ancho y una profundidad total de 2.00 m. Esta cámara tiene a su vez un vertedero con altura de 1.77 m y longitud de 2.50m,



para aliviar los excesos a una cámara de 2.50 m de largo y 0.80 m de ancho y una profundidad total de 2.00m.

#### **4.1.4. Dosificación**

Se cuenta con un dosificador mecánico para el sulfato de Aluminio y con otro dosificador mecánico para la cal primaria.

#### **4.1.5. Mezcla rápida**

Para este proceso se diseñó una canaleta Parshall, la cual, aparentemente presenta limitaciones para efectuar su función. Está calibrada para operarla como una estructura de control y aforo del caudal a tratar.

#### **4.1.6. Entrega a Floculadores**

Una vez que se ha efectuado la mezcla rápida el agua se transporta hasta los floculadores por medio de un canal de sección rectangular de 26.00 m de longitud aproximadamente, y de ancho de 1.22 m en el primer tramo de 6.37 m, de 0.90 m en el segundo tramo de 6.37 m y 0.60 m en el tramo final de 12.99 m.

#### **4.1.7. Floculación**

Para este proceso se diseñaron cuatro (4) unidades de floculación hidráulica de tipo COX, de las cuales actualmente operan (2) unidades. Cada unidad se diseñó para 125 L/s de capacidad y un tiempo de retención de 25.1 minutos para el caudal de diseño.

Cada floculador tiene 11.40 m de longitud, 6.02 m de ancho, 3.42 m de profundidad total y consta de 8 compartimientos de sección de 2.85 x 2.85 m. La admisión de cada uno de los floculadores se hace a través de una compuerta lateral de 14" x 14".

#### **4.1.8. Sedimentación**

Así mismo se diseñaron cuatro (4) unidades de sedimentación de alta tasa, de las cuales sólo están construidas dos (2) unidades. Cada unidad se diseñó para 125 L/s de capacidad, y para trabajar con una carga superficial de 112 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día para el caudal de diseño.

Para realizar la sedimentación acelerada se utilizan placas planas de asbesto cemento de 1.20 x 2.40 m, 0.06 m de espesor e inclinadas 60 grados.

Cada sedimentador tiene un ancho de 6.15 m, 15.02 m de longitud, con dos filas de placas y un canal central de 0.93 m de ancho libre, que en su parte inferior reparte el agua floculada, y en la parte superior está conformada por la canaleta de recolección del agua sedimentada.

Las diferentes canaletas que recolectan el agua sedimentada entregan a su vez, a un canal perpendicular de sección rectangular de 0.70 m de ancho y 1.30 m de altura total que reparte el agua en los diferentes filtros.

En la parte inferior de las tolvas del sedimentador hay un ducto rectangular recolector de lodos de 0.60 m de ancho y 0.30 m de altura. Este ducto tiene en la parte superior unas placas prefabricadas con orificios de 1" de diámetro cada 0.30 m, por los cuales ingresan los lodos que posteriormente transportarán

Al extremo de los sedimentadores se tiene previsto un cárcamo seco de 1.60 m de ancho y 5.20 m de altura total, destinado a operar las válvulas de lavado de sedimentadores y filtros, que se extienden a todo lo ancho de la zona de filtración.

#### **4.1.9. Filtración**

Para llevar a cabo este proceso se han construido cinco (5) unidades de filtración. Se trata de filtros rápidos a gravedad que trabajan a tasa declinante, con falsos fondos conformados por viguetas prefabricadas de concreto reforzado en "V", lecho de soporte en grava, y lecho mixto de arena antracita.

Cada filtro tiene 4.56 m de ancho, 8.06 m de longitud, y una altura total de 4.85 m. La capacidad de filtración de cada unidad es de 100 L/s, y su lavado se efectúa por inyección de aire desde el fondo y se complementa con operaciones manuales. El agua proveniente del lavado se recolecta en un canal central con ancho de 0.71 m y con una pendiente aproximada del 0.07 m/m. El agua filtrada se recolecta mediante tuberías perforadas ubicadas en el fondo del tanque, la cual posteriormente es conducida hacia el tanque de contacto con el cloro.

#### **4.1.10. Cloración**

La aplicación del cloro en solución se efectúa en la cámara recolectora de agua filtrada, la cual cuenta con un vertedero de control, aprovechando la zona de turbulencia generada por el mismo para asegurar una mezcla homogénea entre el cloro y el agua.

El agua clorada es conducida hacia el tanque de almacenamiento para así ser distribuida a los usuarios.

#### **4.1.11. Otras estructuras**

Adicionalmente se cuenta con dos edificaciones las cuales cuentan con:

- Área de almacenamiento del Sulfato de Aluminio y del Hidróxido de Calcio (cal primaria).
- Área administrativa.
- Área de laboratorio.
- Área de cafetería y de servicio.
- Área de almacenamiento de cloro.
- Área destinada para la planta eléctrica de emergencia.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. MODELOS DE FLUJO

A continuación se presentan los conceptos que servirán para analizar los distintos tipos de flujo que se pueden presentar dentro del sistema de tratamiento en estudio. Estos tipos de flujo son de importancia ya que muchas plantas de tratamiento de agua no tienen la eficiencia esperada por deficiencias hidráulicas que ocasionan diferentes distribuciones de flujo y afectan los periodos de retención del agua (Hernández, 2003).

#### 5.1.1. Flujo intermitente o discontinuo

El flujo de tipo intermitente o discontinuo, es el menos habitual, consiste en llenar la unidad, dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, vaciar la unidad y repetir el ciclo. En la mayoría de los casos esto no es práctico y generalmente los procesos son de flujo continuo, salvo que el proceso de tratamiento en si exija la discontinuidad, o se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio (CEPIS, 2005).

#### 5.1.2. Flujo Continuo

El flujo continuo es el habitual en las plantas de tratamiento de agua. Teniendo en cuenta esta característica, los reactores pueden ser de flujo de pistón, mezclado y no ideal (CEPIS, 2005).

##### 5.1.2.1. *Flujo de Pistón*

Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características (CEPIS, 2005).

##### 5.1.2.2. *Flujo Mezclado*

Un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características; solo se presentará bajo condiciones ideales. Se encuentra con

bastante aproximación en retromezcladores o floculadores mecánicos con pocas cámaras en serie (CEPIS, 2005).

### 5.1.2.3. *Flujo no ideal*

Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas (CEPIS, 2005).

## 5.2. TIEMPO DE RETENCIÓN

El estudio del tiempo de retención en unidades hidráulicas de tratamiento es importante para asegurar la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo dentro de las mismas.

Se define por tiempo medio de retención o permanencia  $t_o$  del flujo en una unidad a la relación de (CEPIS, 2005):

$$t_o = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Donde:  $t_o$  = tiempo medio de retención  
V = volumen de la unidad  
Q = caudal

La permanencia es un concepto abstracto. Puede concebirse como el “tiempo promedio en el que el fluido de caudal (Q) pasa a través del reactor del volumen (V) (CEPIS, 2005).

Dado a que el concepto de flujo ideal (pistón) en la práctica es difícil de encontrar debido a las condiciones hidráulicas del fluido (zonas muertas, cortocircuitos) el tiempo de retención real de una unidad de tratamiento puede alejarse del teórico de diseño.

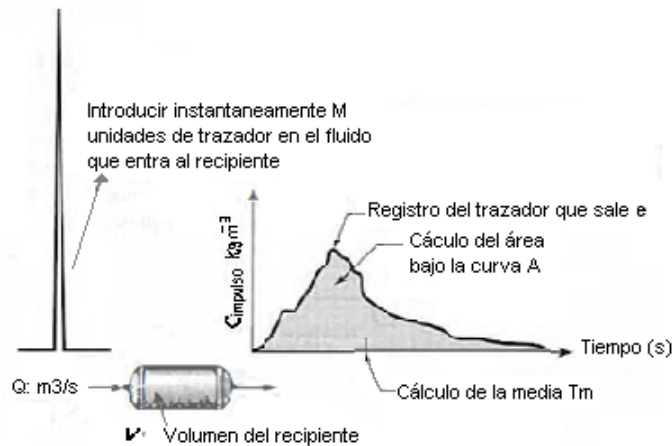
En otras palabras el tiempo de retención por lo general en los reactores es distinto para las diferentes fracciones del volumen  $V$  que entra en el tiempo  $t=0$ . Es necesario, por lo tanto, estudiar la distribución del tiempo de retención en el reactor, para poder conocer la forma que ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento (CEPIS, 2005).

### 5.2.1. Cálculo del Tiempo medio de retención a partir de datos experimentales

Para determinar el tiempo medio de retención real en las unidades de tratamiento, se pueden realizar el ensayo con trazadores (ver ítem 5.5) en el cual luego de introducir M unidades de rastreador (kg o moles) en la corriente de entrada a la unidad, se mide la concentración C a la salida a intervalos de tiempo t hasta que el trazador abandone el recipiente; con estos datos se construye una curva denominada “C<sub>impulso</sub>” (ver Figura 2.) (Levenspiel, 2004) y a partir del balance de materia para la Unidad se encuentran las ecuaciones (2) y (3).

$$\left( \begin{array}{l} \text{Área bajo la} \\ \text{curva } C_{\text{impulso}} \end{array} \right) = A = \int_0^x C dt = \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M}{Q} \quad \left[ \frac{\text{Kg}\cdot\text{s}}{\text{m}^3} \right] \quad (2)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Media de la} \\ \text{Curva } C_{\text{impulso}} \end{array} \right) = t_m = \frac{\int_0^x t C dt}{\int_0^x C dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{Q} \quad [\text{s}] \quad (3)$$



**Figura 2. Información útil obtenible a partir de un experimento con un trazador**  
Fuente: adaptación de Levenspiel, 2004

### 5.3. GRADIENTE DE VELOCIDAD

El gradiente de velocidad es la variación de la velocidad en la dirección normal al movimiento del flujo. El gradiente de velocidad se calcula teniendo en cuenta las pérdidas de carga totales generadas en el sistema.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \times \Delta H}{\mu \times t_m}} \quad (9)$$

Donde: G: Gradiente de Velocidad.  
 $\gamma$ : Peso específico del agua.  
 $\Delta H$ : Pérdidas de carga totales generadas en el sistema.  
 $\mu$ : Viscosidad dinámica del agua.  
 $t_m$ : Tiempo medio de retención hidráulico.

Para floculadores hidráulicos, el gradiente de velocidad debe estar entre  $20 \text{ s}^{-1}$  y  $70 \text{ s}^{-1}$  de acuerdo con la obtenida en la prueba de jarras y el tiempo de detención entre 20 y 40 minutos, debe determinarse de acuerdo con las pérdidas hidráulicas (RAS, 2000).

#### 5.4. CARGA SUPERFICIAL

En sedimentadores convencionales la carga superficial corresponde a la velocidad crítica de sedimentación y se denota como  $V_{sc} = Q/A$ . La carga superficial en sedimentadores de alta tasa debe estar entre  $120$  y  $185 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$  para placas angostas y de  $200$  a  $300 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$  para placas profundas. Para velocidades mayores deberá hacerse ensayos en planta piloto (RAS, 2000).

La velocidad crítica en sedimentadores laminares ó de alta tasa puede calcularse a través de la ecuación del modelo propuesto por Camp y Yao.

$$V_{sc} = \frac{S_c V_o}{\text{sen}\theta + L \text{Cos}\theta} \quad (4)$$

$$L = \frac{l}{e} \quad (5)$$

Donde:  $V_{sc}$ : Velocidad crítica de sedimentación  
 $S_c$ : Constante según el tipo de material (igual a 1 para placas paralelas)  
 $V_o$ : Velocidad promedio del flujo a través del sedimentador  
 $\theta$ : Ángulo de inclinación de las placas  
 $L$ : longitud relativa  
 $l$ : Longitud de la placa  
 $e$ : Separación entre placas

Para que un sedimentador pueda trabajar con alta velocidad, es necesario que exista flujo laminar en las celdas, esto es, que el número de Reynolds ( $R_e$ ) sea menor a 500. Por otro lado se debe tener en cuenta la longitud útil de la placa, o sea, aquella donde se asegura una adecuada sedimentación al no presentarse flujo turbulento. De acuerdo a lo anterior la ecuación (4) puede transformarse en la ecuación (8) así:

$$R_e = \frac{2V_o e}{\nu} \quad (6)$$

$$l_u = l - 0.013R_e e \quad (7)$$

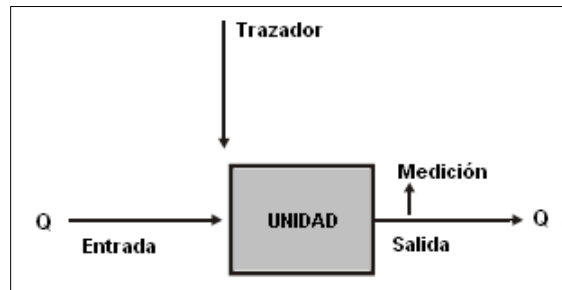
$$V_{sc} = \frac{S_c V_o}{\text{sen}\theta + \left(\frac{l}{e} - 0.013R_e\right)\text{Cos}\theta} \quad (8)$$

Donde:  $R_e$ : Número de Reynolds  
 $\vartheta$ : Viscosidad cinemática  
 $L_u$ : longitud útil

## 5.5. ENSAYOS CON TRAZADORES

En plantas de tratamiento, los ensayos con trazadores han sido utilizados para cuantificar la distribución de flujos en reactores en paralelo y para evaluar la eficiencia hidráulica de diferentes estructuras de distribución y recolección de agua en las unidades de tratamiento. Ellos permiten estudiar los efectos de modificaciones a estructuras existentes confrontando los efectos de estos cambios en los resultados de las pruebas (Pérez y Galvis, 1990).

Para visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora que pueda inyectarse en la entrada de la unidad y simultáneamente, se comenzará, a registrar la concentración del trazador a la salida, tal y como se ilustra en la Figura 3 (CEPIS, 2005).



**Figura 3. Aplicación de trazadores en un reactor.**  
 Fuente: Adaptación de CEPIS, 2005

### 5.5.1. Sustancias trazadoras

Entre las sustancias que han sido utilizadas como trazadoras en el estudio de estructuras de tratamiento se incluyen las siguientes (Pérez y Galvis, 1990):

- Colorantes como fluoresceína, rodamina, rodamina WT.
- Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros, nitratos de litio o de sodio.
- Ácidos como clorhídrico y benzoico.
- Isótopos radiactivos.



La elección de la sustancia puede estar condicionada por la disponibilidad de equipo y personal capacitado para usarla en el ensayo o por su efecto adverso en la calidad d agua, particularmente en la evaluación de prototipos.

Antes de precisar el tipo de trazador que se va a utilizar se debe verificar la concentración de las sustancias preseleccionadas en el agua cruda, prefiriéndose aquella que presente las menores concentraciones o la menor variabilidad en sus valores (Pérez y Galvis, 1990).

Es deseable que la sustancia trazadora no se deposite en la unidad o reaccione con los compuestos presentes en el agua de tal manera que pueda establecerse un balance de masa después de realizar el ensayo. Generalmente, esta condición no se cumple en la práctica y no se recupera la totalidad del trazador agregado (Pérez y Galvis, 1990).

#### *5.5.1.1. Cloruro de Sodio como sustancia trazadora*

La sustancia trazadora más económica es la sal común. Cuando el trazador se inyecta instantáneamente en la corriente, la cantidad requerida no es muy importante y su detección por el método de conductividad es relativamente sencillo con un grado de dilución de 360 gramos por litro (Luengas, 1990).

### **5.5.2. Dosificación de sustancias trazadoras**

La aplicación de sustancias trazadoras en plantas de tratamiento para el estudio de periodos de residencia y de características hidráulicas se puede realizar de dos formas diferentes, dosificando de manera instantánea o continúa.

#### *5.5.2.1. Dosificación Instantánea*

En la aplicación usando dosis instantánea la cantidad total de trazador es agregada toda, de una vez, en el afluente del reactor y en un punto que garantice buena mezcla. Ante las limitaciones prácticas de dosificar de manera instantánea se recomienda que esto se haga en tiempos tan cortos como sea posible ojalá inferiores a  $T_0/30$ , donde  $T_0$  corresponde al tiempo teórico de retención (Pérez y Galvis, 1990).

#### *5.5.2.2. Dosificación Continua*

En la dosis continua la aplicación del trazador es iniciada de manera abrupta y se mantiene constante durante unas dos o tres veces el valor del  $T_0$ , después de lo cual se suspende también de manera abrupta (Pérez y Galvis, 1990).

### 5.5.3. Modelos matemáticos para describir y analizar el comportamiento hidráulico real de un reactor

Puede utilizarse diversos criterios, modelos y procedimientos para estudiar las características de flujos no ideales. Entre los modelos matemáticos más conocidos se encuentra el método de Wolf y Resnick, el modelo de reactores en serie completamente mezclados (Pérez y Galvis, 1990) y el modelo de dispersión axial (Levenspiel, 2004).

Para efecto del presente trabajo de investigación solo se realiza la descripción del modelo matemático correspondiente al modelo simplificado de Wolf y Resnick.

#### 5.5.3.1. Modelo Simplificado de Wolf y Resnick

Este modelo matemático permite incluir las siguientes características hidráulicas: Flujo mezclado, flujo a pistón, espacio muerto. No incluye de manera explícita la evaluación de cortocircuitos y supone que la preparación y ejecución del ensayo se ha realizado de tal manera que no hay errores en la estimación del caudal o del volumen del reactor para el cálculo de  $T_0$ , ni retrasos en los tiempos de respuesta en el desarrollo de la práctica (Perez y Galvis, 1990).

La siguiente demostración del modelo matemático de Wolf y Resnick fue tomada de CEPIS, 2005.

Es evidente que cuando no hay espacios muertos, la fracción de flujo de pistón ( $p$ ) y la fracción de flujo de no pistón ( $1-p$ ) deben ser iguales a la unidad:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} &= 1 \\ p + (1 - p) &= 1 \quad (10) \end{aligned}$$

Cuando hay espacios muertos, si  $m$  es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción que no tiene espacios muertos será igual a  $1-m$  y por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} + \text{espacios muertos} &= 1 \\ [p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m &= 1 \quad (11) \end{aligned}$$

Ahora bien, en la ecuación (3) se estableció que el flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{c}{c_0} = e^{\frac{-t}{t_0}} \quad (12)$$

Si se considera que en el reactor se presenta una combinación de flujos de pistón y mezclado, la ecuación (3) se transforma en:

$$\frac{C}{C_o} = e^{\frac{-t-pt_o}{(1-p)t_o}} \quad (13)$$

Donde  $pt_o$  es el tiempo de retención correspondiente a flujo de pistón y  $(1-p)$  es el volumen de mezcla perfecta. Reordenando y simplificando, tenemos:

$$\frac{C}{C_o} = e^{-\frac{1}{1-p}\left(\frac{1}{t_o}-p\right)} \quad (14)$$

Si considera que el sistema además, tiene espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación la expresión  $(1-m)$  para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta. Luego se tendría:

$$\frac{C}{C_o} = e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left(\frac{1}{t_o}-p(1-m)\right)} \quad (15)$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha salido del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_o} \quad (16)$$

Reemplazando el valor de  $C/C_o$ , se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left(\frac{1}{t_o}-p(1-m)\right)} \quad (17)$$

Reordenando términos y tomando los logaritmos de ambos términos, se llega a:

$$\log(1 - F(t)) = \frac{-\log e}{(1-p)(1-m)} \left( \frac{1}{t_o} - p(1-m) \right) \quad (18)$$

Que corresponde a la ecuación de una línea recta (Figura 4), cuya pendiente está dada por:

$$\tan\alpha = \frac{\log e}{(1-p)(1-m)} \quad (19)$$

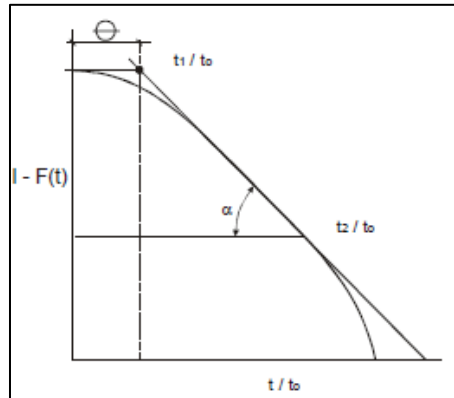


Figura 4. Cantidad de trazador que permanece en el reactor.  
Fuente: CEPIS, 2005

Multiplicando y dividiendo para  $p$  y sustituyendo el valor de  $\text{Log } e = 0,435$ , se obtiene:

$$\tan \alpha = \frac{0.435p}{p(1-p)(1-m)} \quad (20)$$

Lo que hace:

$$\theta = p(1 - m) \quad (21)$$

Reemplazando en la ecuación (20) y reordenando, tenemos:

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad (22)$$

De la ecuación (21) se puede deducir que el volumen de espacios muertos será igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (23)$$

y el flujo mezclado  $M$  será igual a:

$$M = (1 - p)(1 - m) \quad (24)$$

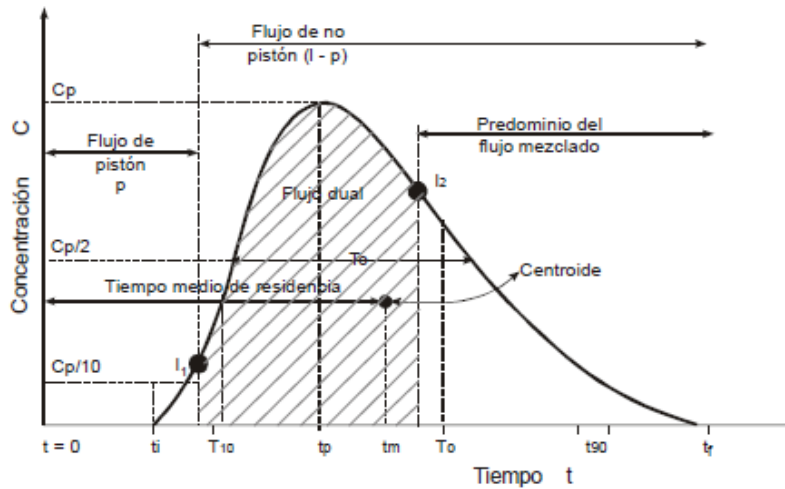
Los valores de las incógnitas  $\theta$  y  $\tan \alpha$  se obtienen al trazar la curva de  $\text{Log} 1-F(t)$  (Figura 4), donde:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (25)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1 - t_2}{t_0 - t_0}} \quad (26)$$

### 5.5.3.2. Análisis de la Curva Concentración vs Tiempo<sup>2</sup>

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la Figura 5.



**Figura 5. Concentración del trazador en el efluente de un reactor.**  
Fuente: CEPIS, 2005

Existen los siguientes parámetros principales:

- $t_i$ : tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- $t_{10}$ : tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.
- $t_m$ : tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
- $t_m$ : tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
- $t_0$ : tiempo medio de retención ó tiempo teórico de retención =  $V/Q$ .
- $t_{90}$ : tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
- $t_f$ : tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
- $C_0$ : concentración inicial.
- $C_p$ : concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios:

- Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado.  
Si el valor de la relación  $t_i/t_0$  es ( $< 0,3$ ), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).
- Si la relación  $t_m/t_0$  es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de  $t_m$ , haciendo  $t_m > t_0$ .
- $t_p/t_0$ , indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación  $t_p/t_0$  se aproxima a 1 y  $t_i/t_0 > 0,5$ , se puede concluir que

existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.

### 5.5.3.3. Índice de Morril<sup>2</sup>

Este autor encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en porcentajes y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta (figura 7).

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morril sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión. Así:

$$\text{índice de Morril} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}} \quad (27)$$

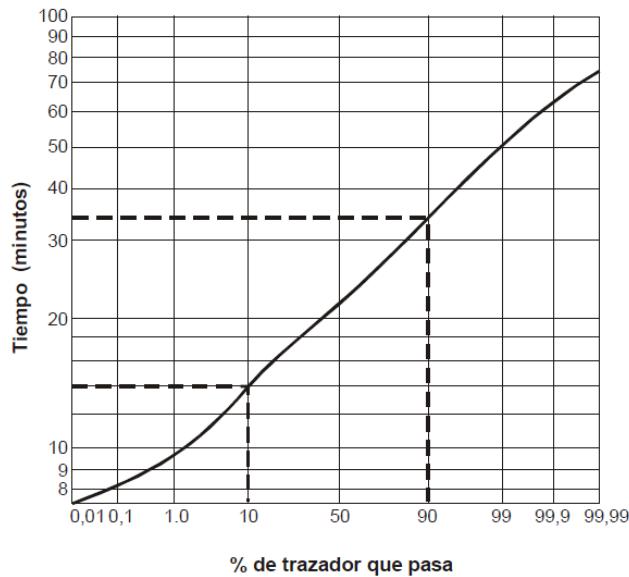
Si todo el flujo fuera de pistón, la curva de la Figura 6 sería una línea horizontal y el índice de Morril sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo ( $t = t_0$ ) y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

El estudio de la totalidad de la curva puede suministrar una información más completa que la de las tendencias centrales.

Generalmente, el solo observar la forma que toma la curva de trazadores brinda una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia.

El flujo de pistón puro, como se muestra en la Figura 5, viene representado por el tiempo que transcurre hasta que aparece el trazador. Hirsch considera que este tiempo se puede tomar en el punto de inflexión  $I_1$ , cuando la curva cambia de cóncava a convexa

De aquí en adelante, el flujo debe considerarse como no de pistón. Entre dicho punto y el punto de inflexión  $I_2$  en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinado). A partir del segundo punto de inflexión, el flujo tiene un carácter predominantemente mixto.



**Figura 6. Índice de Morril**  
Fuente: CEPIS 2005.

#### 5.5.4. Antecedentes de utilización de sustancias trazadoras en evaluación de reactores y Plantas de tratamiento

El uso de trazadores en evaluación de reactores ha sido ampliamente abarcado en diferentes países, sin embargo no se cuenta con suficiente información a nivel nacional de su utilización en plantas de tratamiento de agua potable.

Hernández (2003) realizó una evaluación del proceso de floculación en la planta de tratamiento de agua potable “LO DE COY” en Guatemala con el propósito de considerar la ampliación de la misma en un futuro. El ensayo fue realizado mediante la aplicación de cal hidratada como trazador. A partir de los respectivos análisis empleando el modelo de Wolf y Resnick, el autor pudo determinar que en los floculadores predominaba el flujo de Pistón (94% y 95%) y que por lo tanto los tiempos reales  $tr$  son aproximadamente iguales a los tiempos teóricos  $to$ , para un rango de tres caudales analizados concluyendo que la ampliación de la planta bajo las condiciones existentes si es posible de realizar.

En cuanto a la utilización de trazadores en evaluación de plantas de tratamiento de agua potable a nivel nacional se conoce el trabajo realizado por Capacho y Uribe (2005) quienes emplearon sal común de consumo humano como trazador en la evaluación de las características hidráulicas de las unidades de floculación y sedimentación de la Planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca (Bucaramanga). Los respectivos análisis se realizaron por el método de Wolf y Renisck. Dentro de sus resultados obtenidos logran concluir que los floculadores y

sedimentadores hidráulicos trabajan con parámetros hidráulicos similares a los óptimos y por lo tanto su eficiencia en general es buena.

#### 5.5.4.1. Otras aplicaciones de trazadores

Gonzales y Saldarriaga (2008) realizaron un estudio hidráulico con el trazador, cloruro de litio LiCl, como parte de su trabajo de investigación enfocado a la remoción biológica de materia orgánica en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio, para así evaluar el efecto del material de soporte en el régimen hidráulico de la unidad aerobia, obteniendo como resultados un flujo con mayor tendencia a ser completamente mezclado.

El empleo de sustancias trazadoras en la evaluación del tratamiento y la eficiencia de las reacciones químicas dentro de humedales artificiales, también ha sido aplicable debido a que estos se ven muy afectados por las características hidráulicas, tales como el tiempo de residencia, la mezcla, y los cortocircuitos (Headley y Kadlec, 2007); en este caso con la utilización de altas concentraciones de cloruro de sodio (  $67000 \text{ g/m}^3$  ) como trazador, se informó de tasas de recuperación de rastreo superiores al 78% a partir de ocho estudios de seguimiento individuales (Chazarenc *et al.*, 2003; citado por Headley y Kadlec, 2007). De igual forma el método ha sido utilizado para evaluar las características del flujo en turberas y determinar el área de flujo activo para la purificación de aguas residuales (Ronkanen y Kløve, 2007).



## 6. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados, corresponden a ensayos realizados directamente en la Planta de tratamiento de agua potable “Palacé”, en las unidades de floculación y sedimentación principalmente.

### 6.1. ENSAYOS PRELIMINARES

Durante aproximadamente un mes se realizaron pruebas preliminares a partir de las cuales se logró ajustar la metodología propuesta para la evaluación del comportamiento hidráulico de la PTAP. Cabe señalar que dichos ensayos se realizaron con el caudal que estuviera operando la planta en el momento de la prueba.

#### 6.1.1. Medición de caudales

Se determinaron los puntos estratégicos de medición de caudal en el canal de entrega a los floculadores, identificando así dos puntos en el tercer tramo, los cuales se encuentran antes de la entrada a cada floculador.

#### 6.1.2. Pruebas con trazador

Inicialmente se había pensado en utilizar como trazador sal común de consumo humano, sin embargo durante las pruebas realizadas no se obtuvieron cambios significativos en las variaciones de conductividad, razón por la cual se decidió realizar pruebas con sal marina la cual es más concentrada.

La cantidad de trazador dosificado se estimó con base en la concentración final deseada de cloruros, la cual se encuentra por debajo a la concentración máxima de cloruros estipulada en la norma colombiana para agua potable, 250 mg/L (Resolución 2115, 2007). Para determinar esta cantidad se utilizó el valor del volumen de los floculadores y de la concentración máxima deseada en la prueba de la siguiente forma:

$$Kg \text{ de sal} = \frac{[ ]_{m\acute{a}x} \times V}{10^6} \quad (28)$$

Donde:  $[ ]_{m\acute{a}x}$  = Concentración máxima deseada del trazador en mg/L  
 $V$  = Volumen de agua en el floculador en L

También se analizaron varias curvas obtenidas a partir de ensayos con determinadas cantidades de sal aplicada a las unidades, pudiendo estimar de manera aproximada las variaciones alcanzadas en las concentraciones para determinadas dosis de trazador.

A partir de lo anterior, finalmente se decidió trabajar en cada prueba de trazadores con 5kg de sal para cada línea de tratamiento ya que dicha cantidad garantiza que la concentración final no sobrepase el límite máximo permisible, además permite obtener variaciones significativas en las concentraciones útiles para el análisis de flujo.

Los puntos de muestreo se identificaron en el punto de salida del agua en cada unidad de tratamiento. Para los floculadores debido a que no se tiene acceso directo a la cámara de salida se optó por tomar las muestras en el último compartimiento de las unidades en un punto próximo al orificio de salida, esto con ayuda de un sifón hecho con una manguera cristal de 3/8”.

En los sedimentadores se realizaron muestreos simultáneos en las canaletas de recolección ubicadas en los extremos y en el centro del tanque con el fin de identificar en qué punto se presentaba mayor variación en la conductividad una vez fuese dosificado el trazador; el cual correspondió al ubicado en la canaleta central de los tanques. A partir de esto el punto de muestreo en los sedimentadores fue en las canaletas de recolección de agua sedimentada número seis de las doce de cada tanque, considerando que en éstas sale el agua más rápido. Estos ensayos preliminares, además, sirvieron para determinar el tiempo de inicio de toma de muestras en los sedimentadores.

### **6.1.3. Medición de pérdidas de carga en el floculador**

Para determinar las pérdidas de carga en los floculadores, se midió el nivel del agua en los compartimientos de cada unidad con la ayuda de una manguera plástica transparente de 3/8”. Esta fase sirvió para acondicionarse al método y adquirir mayor precisión en los registros de cada nivel.

## **6.2. DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN LAS UNIDADES DE FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN**

### **6.2.1. Consideraciones Iniciales**

Los ensayos y mediciones se realizaron para tres caudales, los cuales se aproximaban a 156, 175 y 216 L/s; éstos fueron escogidos teniendo en cuenta las limitaciones de la PTAP para trabajar con caudales mayores a 150L/s.

Para los ensayos de trazadores se utilizó como sustancia trazadora el Cloruro de Sodio (NaCl), específicamente sal marina, teniendo en cuenta que la PTAP se encuentra en funcionamiento y abastece a la población de forma continua, y aumentos controlados de ésta sustancia en el agua no altera significativamente la calidad química del líquido servido.

La dosificación de la sustancia trazadora se efectuó de forma instantánea para facilidad del ensayo.

El indicador de los ensayos es la concentración de sal, la cual fue determinada de forma indirecta midiendo la conductividad del agua y determinando la concentración a través de una curva de calibración de conductividad versus concentración de sal. Para el registro de la conductividad, se utilizó el conductivímetro marca *HACH 44600-00*, suministrado por el acueducto.

### **6.2.2. Medición de Caudal**

La medición de caudal se realizó con la ayuda del medidor de velocidad *Marsh-McBirney Model 2000* justo antes de iniciar cada prueba en los puntos especificados en el ítem 6.1.1.

Los registros de velocidad se realizaron a lo ancho del canal cada 10 cm, ubicando el sensor a una profundidad correspondiente al 40% de la altura total del nivel de agua tal y como se muestra en la Figura 7.

Para el cálculo del caudal se contó con la hoja de cálculo correspondiente al aparato de medición, la cual requiere los valores del ancho de la sección del punto de medición de la velocidad del agua, la profundidad del agua y los registros de las velocidades puntuales. El caudal corresponde a la sumatoria de los caudales puntuales calculados.



Figura 7. Medición del Caudal en el tercer tramo del canal de entrega a los floculadores

### 6.2.3. Determinación del Tiempo de Retención teórico ( $t_0$ )

De acuerdo a los planos constructivos de la Planta y con base en los caudales escogidos para cada ensayo se determinó el tiempo de retención teórico para cada unidad teniendo en cuenta la ecuación 1. Este dato es necesario para realizar todos los demás cálculos.

### 6.2.4. Elaboración de la curva de calibración

Para la elaboración de la curva de calibración, se tomó una muestra de 1 L de agua filtrada, antes del tanque de contacto con cloro, y se registró la conductividad inicial asegurándose de que dicho valor fuera próximo al valor de conductividad en el tiempo cero de cada prueba de trazador; a continuación se adicionó al volumen de agua, cantidades del trazador (entre 3 y 5 mg) de tal forma que el aumento de su concentración en el líquido fuera gradual; esto con el fin de obtener diferentes valores de conductividad para cada cambio. Este procedimiento se realizó hasta alcanzar una conductividad igual o superior a la máxima registrada durante la prueba de trazador. Las tablas y curvas correspondientes para cada ensayo se muestran en el Anexo I.

Con el registro de los datos anteriores se graficaron las curvas Conductividad vs Concentración de sal y con el método de mínimos cuadrados se encontró la ecuación de la recta correspondiente a los datos anteriores. Este procedimiento se realizó en el laboratorio de las instalaciones de la Planta de Tratamiento “El Tablazo”, utilizando la balanza analítica *Precisa XB 120A*, para cada día de prueba asegurando así mayor confiabilidad en los datos registrados.

### 6.2.5. Ensayo de Trazadores

Se realizaron dos ensayos de trazadores para cada uno de los caudales escogidos a tratar. Para poder realizar el ensayo con un caudal de 216 L/s fue necesario utilizar como coagulante Policloruro de Aluminio tipo B debido a las limitaciones presentadas con el Sulfato de Aluminio para tratar caudales elevados.

#### 6.2.5.1. Dosificación del trazador

Para facilitar una mejor mezcla del trazador en el afluente, se diluyeron los 5 kg de sal previamente y se escogió como punto de dosificación, las cámaras de entrada a los floculadores, ya que esta zona presenta turbulencia (ver Figura 8). La dosificación se realizó de manera simultánea en las dos líneas de tratamiento.



Figura 8. Dilución y dosificación del trazador en la entrada de los floculadores

#### 6.2.5.2. Toma de muestras

Las muestras correspondientes al tiempo cero se tomaron inmediatamente aplicado el trazador, siguiendo una frecuencia de muestreo de tres minutos, a la salida de cada unidad a evaluar (floculadores y sedimentadores).

Con la medición de la conductividad a cada muestra se determinó el final de cada ensayo, el cual se presenta cuando el parámetro en estudio se estabiliza, es decir cuando permanece constante e igual al valor determinado en el tiempo cero.

- Toma de muestras en floculadores: para la toma de muestras en el efluente de estas unidades fue necesario realizar un sifón con mangueras de nivel de 3/8" que captara agua del último compartimiento de cada línea de floculación, para garantizar que las muestras fueran tomadas siempre a una misma profundidad y para facilitar este procedimiento como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9. Toma de Muestras en floculadores**

- Toma de muestras en sedimentadores: El punto de toma de muestras correspondió a la canaleta de recolección de agua sedimentada N°6 de cada unidad (ver Figura 10) teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en el ítem 6.1.2.



Figura 10. Toma de muestras en sedimentadores

### 6.2.6. Tratamiento de los datos

Con los registros de conductividad y de tiempo obtenidos, se determinó la concentración de trazador que sale de cada unidad con ayuda de la curva de calibración. Se calcularon las fracciones remanentes para cada tiempo y se elaboró la curva  $1-F(t)$  Vs  $t/t_0$  en papel semilogarítmico con su respectiva línea de tendencia y ecuación de la forma  $Y = A * e^{BX}$ , la cual sigue el siguiente procedimiento:

$$\log(Y) = \log(A * e^{BX}) \quad (29)$$

$$\log(Y) = \log(A) + BX \log(e) \quad (30)$$

$$Y = 1 - F(t) \text{ y } X = t/t_0 \quad (31)$$

$$\log(1 - F(t)) = \log(A) + B * \left( \frac{t}{t_0} \right) * \log(e) \quad (32)$$

$$(1 - F(t)) = 1 \rightarrow \log(1) = B * \log(e) * \frac{t}{t_0} + \log(A) \quad (33)$$

$$\text{Haciendo, } \theta = \frac{t}{t_0} \quad (34)$$

$$\text{Entonces, } \theta = \frac{\log(1) - \log(A)}{B * \log(e)} \quad (35)$$

Donde la pendiente de la línea de tendencia está dada por:

$$\text{Tan}(\alpha) = B * \log(e) \quad (36)$$

A partir de las ecuaciones (35) y (36), la definición de los tipos de flujo en las unidades evaluadas se determinó con base en el método simplificado de Wolf y Resnick, utilizando las ecuaciones (22), (23) y (24) con el cual se logró determinar las fracciones de flujo a pistón, zonas muertas y fracción mezclada.

Con el fin de contrarrestar los resultados obtenidos con el método de Wolf y Resnick se determinó el Índice de Morril para cada prueba; se graficó la curva tiempo versus porcentaje de masa de trazador que sale de cada unidad a evaluar y con la ecuación de la línea de tendencia se obtienen los datos correspondientes a los tiempos en que sale el 10% y el 90% del trazador, requeridos en la ecuación (27) para el cálculo del índice de Morril.

### **6.3. TIEMPO MEDIO DE RETENCIÓN EN FLOCULADOR Y EN SEDIMENTADOR**

Durante los ensayos de trazadores, se realizaron registros continuos del tiempo para cada muestra tomada a la salida de las unidades en estudio. El tiempo de retención medio corresponde al centroide de la curva de Concentración vs tiempo, según lo expuesto en el ítem 5.2.1.

Debido a que la dosificación del trazador se efectuó justo a la entrada de los floculadores, los resultados en el efluente del sedimentador representan el efecto combinado del floculador y del sedimentador mismo, por lo tanto, el tiempo medio de retención en el sedimentador corresponde al tiempo de retención total de floculación y sedimentación menos el tiempo medio de retención en el floculador.

### **6.4. DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN**

Se determinaron los gradientes correspondientes a cada compartimiento de acuerdo a las pérdidas de carga generadas en cada uno. Éstas se determinaron por diferencias de cotas del nivel del agua dentro de la unidad y de compartimiento a compartimiento para determinar gradientes puntuales. Este procedimiento se llevó a cabo con la ayuda de un sifón hecho en un tanque vacío con una manguera cristal de 3/8", tal como se muestra en la Figura 11.

Adicionalmente se registró la temperatura del agua en el instante en que se realizó la medición de dichas pérdidas, dato necesario para obtener el peso específico y la viscosidad dinámica del agua. El cálculo de los gradientes se efectuó mediante la ecuación (9).





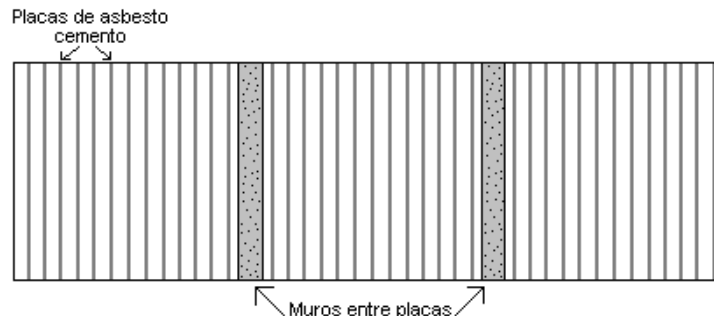
Figura 11. Medición de niveles de agua en los compartimientos de los floculadores

## 6.5. CARGA SUPERFICIAL DE SEDIMENTACIÓN

La carga superficial equivalente o velocidad crítica de sedimentación se calculó teniendo en cuenta la ecuación (8); para la aplicación de la misma fue necesario determinar la velocidad de flujo  $V_0$  llevando a cabo el siguiente proceso.

Se determinó inicialmente el área superficial útil,  $A_s$  de los sedimentadores restando al área total, el área ocupada por el espesor de las placas y de los muros

de soporte de la estructura (ver Figura 12); con base en esto se pudo determinar el espaciamiento, e entre los mismos.



**Figura 12. Vista en planta de las Placas y Muros en una cámara del sedimentador**  
(Figura sin escala)

Teniendo en cuenta que la inclinación de las placas es de  $60^\circ$  se llega a la siguiente relación que permite calcular el área de flujo horizontal.

$$\text{sen}60 = \frac{A_h}{A_s} \rightarrow A_h = A_s \text{sen}60 \quad (37)$$

Con este valor puede calcularse la velocidad de flujo de la siguiente manera:

$$V_0 = \frac{Q}{A_h} \quad (38)$$

Donde:  $V_0$ : Velocidad del flujo  
 $A_s$ : área superficial de flujo  
 $A_h$ : área horizontal del flujo  
 $Q$ : Caudal

## 6.6. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN

Se realizó una curva de sedimentabilidad como prueba complementaria para comparar la eficiencia de cada línea de tratamiento y para dar una idea sobre las cargas superficiales óptimas de sedimentación.

Para esto se efectuó un ensayo de sedimentación utilizando jarras cuadradas con las cuales se tomaron muestras de agua de la salida de los floculadores a la misma profundidad. Se tomaron muestras cada cinco minutos durante veinte minutos y luego cada diez minutos hasta completar una hora, registrando los intervalos de tiempo entre cada muestreo, la altura del punto de muestreo al nivel del agua en la jarra y se determinó la turbiedad remanente en las muestras tomadas.

Los ensayos se realizaron para los caudales de aproximadamente 175 L/s y 216 L/s. Cada prueba se desarrolló de manera simultánea para las dos líneas.

Con la distancia,  $h$ , y los tiempos se calcularon las velocidades de sedimentación:

$$V_{si} = h_i t; \quad (39)$$

Con la turbiedad inicial y la turbiedad remanente se calculó la fracción remanente así:

$$\text{Fracción Remanente} = \frac{\text{Turbiedad remanente}}{\text{Turbiedad Inicial}} \quad (40)$$

Posteriormente se realizaron las curvas de sedimentabilidad con los datos de Velocidad de sedimentación Vs Fracción Remanente.

## 7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 7.1. ENSAYOS DE TRAZADORES

En la Tabla 1 se presentan las condiciones bajo las cuales se realizaron los diferentes ensayos de trazadores. Si bien la capacidad de la planta de tratamiento es 250 L/s (125 L/s por línea), debido a los limitantes en la producción de calidad de agua que presenta la planta, el caudal máximo evaluado fue de 216 L/s, (aproximadamente 108 L/s por línea). Se evaluó el sistema con base en tres caudales y para cada uno de ellos se realizaron dos ensayos, tal como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1. Condiciones iniciales de los ensayos de trazadores**

Ensayo	Estructura evaluada	Cantidad de sal utilizada (Kg)	Caudal evaluado (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)
1	Floculador 1-Sedimentador 1	5	156	82.4
	Floculador 2-Sedimentador 2			73.4
2	Floculador 1-Sedimentador 1	5	156	82.9
	Floculador 2-Sedimentador 2			72.9
3	Floculador 1-Sedimentador 1	5	175	93.6
	Floculador 2-Sedimentador 2			81.7
4	Floculador 1-Sedimentador 1	5	173	92.5
	Floculador 2-Sedimentador 2			80.5
5	Floculador 1-Sedimentador 1	5	216	112.1
	Floculador 2-Sedimentador 2			103.5
6	Floculador 1-Sedimentador 1	5	215	113.9
	Floculador 2-Sedimentador 2			101.1

Las curvas con el comportamiento de la salida del trazador en los floculadores, se presentan en la Figura 13 y para los sedimentadores en la Figura 14; los datos detallados se presentan en el Anexo II.

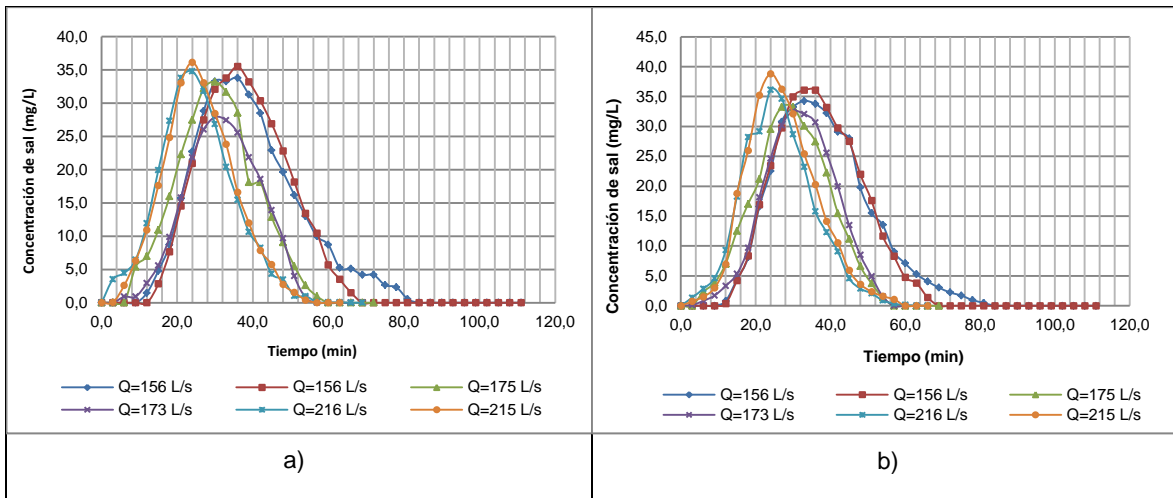


Figura 13. Curva Tiempo Vs Concentración de trazador a la salida del a) Floculador 1 y b) Floculador 2

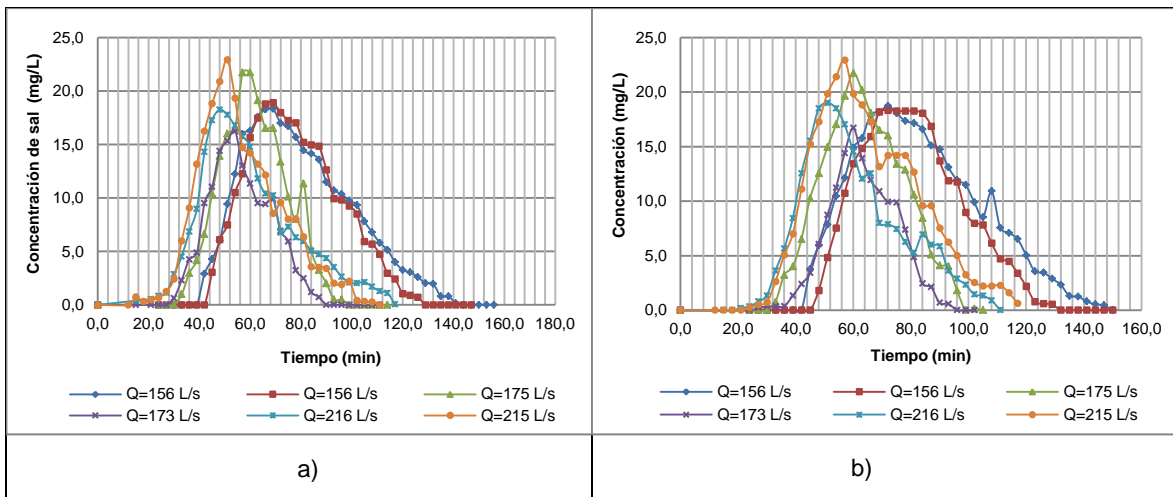


Figura 14. Curva Tiempo Vs Concentración de trazador a la salida del a) Sedimentador 1 y b) Sedimentador 2

## 7.2. PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS FLOCULADORES

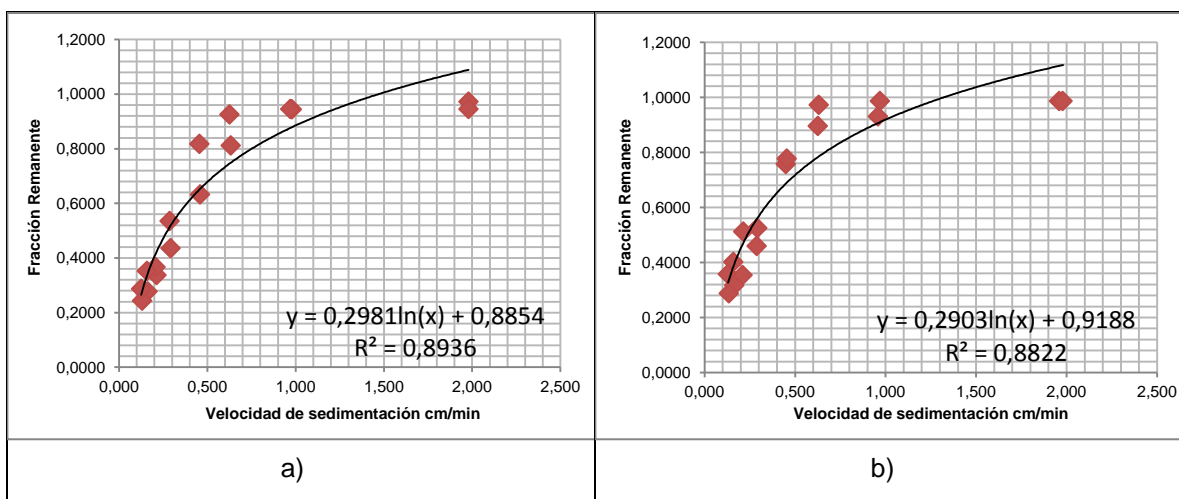
En la Tabla 2 se presentan los caudales de operación de la planta durante las pruebas, los caudales por línea de floculación, las alturas iniciales del agua en la entrada de los floculadores y las pérdidas de carga entre los compartimientos de los dos floculadores en funcionamiento.

**Tabla 2. Pérdidas de carga en los floculadores**

Línea de Floculación	Caudal (L/s)	Caudal por línea de floculación (L/s)	Altura inicial del agua H, (m)	Pérdidas de Carga (m) entre compartimientos							
				Entrada-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
1	156	82.4	2.808	0.019	0.011	0.01	0.006	0.004	0.006	0.0055	0.0045
	156	82.9	2.810	0.019	0.012	0.0125	0.005	0.005	0.0045	0.0055	0.0035
	175	93.6	2.833	0.025	0.016	0.0125	0.0095	0.007	0.006	0.008	0.004
	173	92.5	2.826	0.021	0.014	0.014	0.006	0.009	0.007	0.008	0.007
	216	112.1	2.891	0.03	0.024	0.018	0.017	0.015	0.01	0.0085	0.0105
	215	113.9	2.891	0.03	0.024	0.018	0.017	0.015	0.01	0.0085	0.0105
2	156	73.4	2.808	0.017	0.011	0.012	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0045
	156	72.9	2.810	0.017	0.011	0.012	0.006	0.005	0.005	0.005	0.0045
	175	81.7	2.839	0.024	0.018	0.015	0.007	0.009	0.006	0.009	0.004
	173	80.5	2.832	0.021	0.017	0.016	0.006	0.01	0.007	0.007	0.007
	216	103.5	2.901	0.03	0.028	0.024	0.012	0.0155	0.0095	0.01	0.011
	215	101.1	2.901	0.03	0.028	0.024	0.012	0.0155	0.0095	0.01	0.011

### 7.3. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN

En la Figura 15 se presentan las curvas de Velocidad de sedimentación Vs Fracción remanente en donde se resumen las dos pruebas de sedimentabilidad realizadas para cada línea de tratamiento, utilizando un caudal de aproximadamente 175 L/s (aproximadamente de 87 L/s por cada línea de tratamiento).



**Figura 15 . Curva de sedimentabilidad para el agua floculada de la a) línea 1 de tratamiento y b) línea 2 de tratamiento, para un caudal de 175 L/s**

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.1. DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN LAS UNIDADES DE FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

#### 8.1.1. Análisis en floculadores

En las Tabla 3 y Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo simplificado de Wolf y Resnick para la determinación de los tipos de flujo presentes en los floculadores en cada línea de tratamiento, al igual que los tiempos de retención teóricos y reales y los índices de Morril; los resultados corresponden a los seis ensayos realizados para los caudales aproximados de 156L/s, 175L/s y 216L/s. Las tablas usadas para el cálculo y gráficas se encuentran en el Anexo II.

**Tabla 3. Comportamiento del flujo en el Floculador de la Línea 1**

Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)	Fracción de Zonas Muertas (%)	Fracción de Flujo a Pistón (%)	Fracción de Mezcla completa (%)	Índice de Morril	Tiempo Teórico de Retención (min)	Tiempo Medio de Retención (min)
1	156	82.4	2.433	52.592	44.974	3,59	36.0	35.9
2	156	82.9	0.948	54.717	44.335	2,75	35.8	34.8
3	175	93.6	11.262	41.511	47.227	3,39	31.7	27.5
4	173	92.5	8.606	37.868	53.526	3,17	32.1	29.1
5	216	112.1	15.976	28.164	55.859	5,38	26.8	22.4
6	215	113.9	10.448	36.928	52.624	4,07	26.4	23.4

**Tabla 4. Comportamiento del flujo en el Floculador de la Línea 2**

Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)	Fracción de Zonas Muertas (%)	Fracción de Flujo a Pistón (%)	Fracción de Mezcla completa (%)	Índice de Morril	Tiempo Teórico de Retención (min)	Tiempo Medio de Retención (min)
1	156	73.4	13.608	44.875	41.517	3.54	40.4	35.3
2	156	72.9	16.857	43.582	39.561	2,93	40.7	33.9
3	175	81.7	23.691	29.829	46.480	3,55	36.4	26.7
4	173	80.5	22.078	33.190	44.732	3,15	36.9	29.0
5	216	103.5	18.852	27.218	53.9299	4,49	29.1	23.4
6	215	101.1	16.395	27.400	56.2048	3,97	29.8	24.3

#### 8.1.1.1. *Análisis del comportamiento del flujo*

De acuerdo con las Tabla 3 y Tabla 4 se aprecia que la variación en el caudal a tratar influye en el comportamiento del flujo en las unidades de floculación, siendo predominante para el caudal más bajo el flujo a Pistón y para el más alto la fracción de flujo mezclado, situación que se pudo evidenciar al observar la aparición de burbujas en los compartimientos de los floculadores al operar la planta con el caudal de 216 L/s.

En la línea 1 de floculación, el porcentaje de zonas muertas presenta un incremento, pasando en promedio del 1.7% para el caudal mínimo (156 L/s) a un 10% para el caudal intermedio (175 L/s) y a un 13.2% para el caudal máximo evaluado (216 L/s), aproximadamente. Del mismo modo se presenta un aumento en la fracción de flujo mezclado, el cual pasa aproximadamente de 44.6% a 50,2% y a 54.3%, para el mismo rango de caudales. En el caso del flujo a Pistón, el comportamiento del flujo es contrario al de las otras fracciones, ya que la fracción de éste se reduce en promedio de un 53.7% a un 39.7% y finalmente a un 32.6% al cambiar el caudal a tratar dentro del rango de caudales evaluados.

Se puede observar que para las fracciones de zonas muertas y de flujo a Pistón los cambios más marcados se presentan al cambiar de 156 L/s a 175 L/s, en cambio para el caso de la fracción de flujo mezclado el incremento se presenta de una forma más gradual de caudal a caudal.

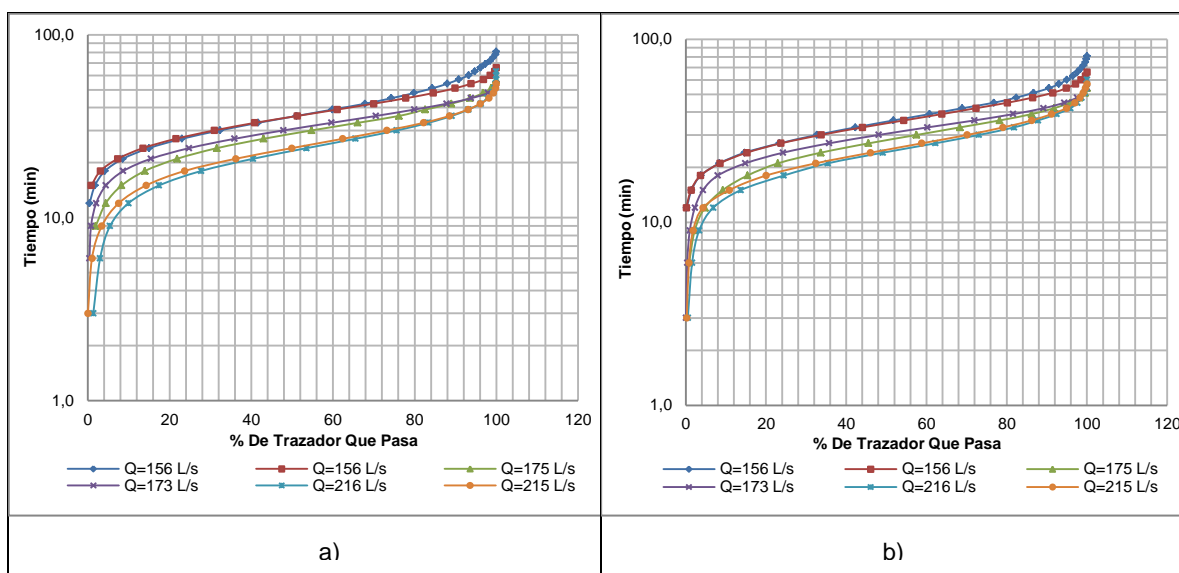
En la línea 2 de floculación se presenta el mismo comportamiento de flujo que en la línea 1 a excepción de la fracción de zonas muertas que presenta una disminución en el tercer caudal con respecto al segundo caudal evaluado. Esto puede ser atribuido a posibles errores en la realización del ensayo ya que se esperaría un comportamiento similar al presentado en la línea 1 de floculación dado que los cambios en las fracciones de flujo a pistón y mezclado en la línea 2 son similares a los de la línea 1.

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Capacho y Uribe (2005) y Hernández (2003) en su trabajos de evaluación a floculadores hidráulicos de flujo horizontal en las plantas de agua potable de Floridablanca y Lo De Coy respectivamente, se puede observar que existen diferencias en relación a los porcentajes de zonas de flujo a Pistón obtenidos en sus estudios (superiores al 90%) ya que en nuestro caso, como ya se mencionó, solo se alcanzaron porcentajes en promedio del 53.7% para los caudales más bajos. Estas diferencias se pueden dar debido a que en los floculadores de tipo Cox, es más probable que se presenten espacios muertos en las esquinas de los compartimientos, mientras que en el caso de los floculadores con pantallas de flujo horizontal predomina el flujo de pistón, mientras que los cortocircuitos y espacios muertos que se producen son mínimos.



Si bien esta circunstancia puede generar alteraciones sobre el tiempo real en el floculador, se considera importante considerar más adecuadamente, en la futura ampliación, la ubicación de los orificios de entrega de agua de un compartimiento a otro dentro de la unidad para minimizar el efecto de zonas muertas y mejorar la tendencia del flujo.

En la Figura 16 se presentan las curvas correspondientes al porcentaje de trazador que sale de las unidades de floculación Vs el tiempo de salida del mismo, con las cuales se determinan los respectivos índices de Morril. Dicho índice permite complementar el análisis del comportamiento de flujo en floculadores. Los datos detallados se pueden observar en el Anexo II.



**Figura 16. Curva Porcentaje de trazador que sale Vs tiempo de salida del a) Floculador 1 y b) Floculador 2**

Los valores obtenidos para el índice de Morril en las unidades de floculación, confirman lo obtenido mediante el modelo de Wolf y Resnick para la fracción de flujo a pistón, ya que dichos valores en promedio están por encima de tres (lejano a la unidad), lo cual indica que el comportamiento del flujo se aleja progresivamente del flujo a pistón con el incremento del caudal a tratar.

#### 8.1.1.2. Análisis de la curva Concentración Vs Tiempo para las unidades de floculación

En la Tabla 5 se muestran los valores de caudal por línea de tratamiento, tiempo inicial de salida de trazador ( $t_i$ ), tiempo teórico de retención ( $t_o$ ), tiempo medio de retención ( $t_m$ ), tiempo modal o tiempo en el que se presenta el máximo valor de concentración de trazador ( $t_p$ ) y algunas relaciones entre los mismos que permiten cualificar el comportamiento de las unidades de floculación.

**Tabla 5. Relaciones de tiempos para los floculadores**

LÍNEA	ENSAYO	CAUDAL POR LÍNEA (L/s)	$t_i$ (min)	$t_o$ (min)	$t_m$ (min)	$t_p$ (min)	$t_i/t_o$	$t_m/t_o$	$t_p/t_o$
1	1	82,4	12,00	35,95	35,94	36,00	0,33	1,00	1,00
	2	82,9	15,00	35,75	34,76	36,00	0,42	0,97	1,01
	3	93,6	9,00	31,74	27,53	30,00	0,28	0,87	0,95
	4	92,5	6,00	32,10	29,11	30,00	0,19	0,91	0,93
	5	112,1	3,00	26,80	22,41	24,00	0,11	0,84	0,90
	6	113,9	3,00	26,38	23,36	24,00	0,11	0,89	0,91
2	1	73,4	12,00	40,39	35,29	33,00	0,30	0,87	0,82
	2	72,9	12,00	40,70	33,94	33,00	0,29	0,83	0,81
	3	81,7	6,00	36,40	26,70	27,00	0,16	0,73	0,74
	4	80,5	6,00	36,90	29,02	30,00	0,16	0,79	0,81
	5	103,5	3,00	29,09	23,36	24,00	0,10	0,80	0,83
	6	101,1	3,00	29,76	24,32	24,00	0,10	0,82	0,81

Como se puede observar la relación  $t_i/t_o$ , para las dos líneas de floculación, desde la tercer prueba (a partir del caudal de 175 L/s), presenta valores inferiores a 0.3 lo cual puede indicar presencia de cortocircuitos, es decir que existe la tendencia del paso directo de trazador entre la entrada y la salida del floculador. Esto podría influir en el incremento de la fracción de zonas muertas, al igual que en la disminución de la fracción de flujo a pistón, al operar la planta con los caudales más elevados, particularmente superiores a 156 L/s, ya que para dicho caudal se presenta el mayor porcentaje de flujo a pistón.

Los valores obtenidos para la relación  $t_m/t_o$  en la línea 1 de floculación para las dos primeras pruebas correspondientes al caudal de 156 L/s, son próximos a la unidad, lo cual indica una menor presencia de cortocircuitos y de espacios muertos, siendo coherente con lo expuesto en el párrafo anterior de que para este caudal el comportamiento del flujo es en mayor porcentaje de tipo pistón en comparación a los otros caudales evaluados, para los cuales esta relación va disminuyendo en la medida en que los mismos aumentan. Comparando con la línea 1 de floculación, los valores de la relación  $t_m/t_o$  para la línea 2, son menores lo cual concuerda con la presencia de un porcentaje mayor de zonas muertas en esta línea de floculación.

Analizando los valores de la relación  $t_p/t_o$ , se puede observar que a medida que el caudal aumenta, se alejan de la unidad, lo cual indica que la presencia del flujo mezclado va incrementando para las dos líneas de floculación.

Con base en lo anterior se puede decir que para el caudal próximo a 156 L/s el comportamiento del flujo en los floculadores es más cercano al flujo ideal que para caudales superiores, lo cual se puede evidenciar en la práctica al observarse un floc más consistente y una operación menos limitada de la planta de tratamiento.

### 8.1.2. Comportamiento del flujo en sedimentadores

En la Tabla 6 y Tabla 7 se muestran los resultados de la determinación de los tipos de flujo presentes en los sedimentadores en cada línea de tratamiento, los tiempos de retención teóricos y reales, así como los índices de Morril para los seis ensayos realizados.

**Tabla 6. Comportamiento del flujo en el Sedimentador de la Línea 1**

Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)	Fracción de Zonas Muertas (%)	Fracción de Flujo a Pistón (%)	Fracción de Mezcla completa (%)	Índice de Morril	Tiempo Teórico de Retención (min)	Tiempo Medio de Retención (min)
1	156	82.4	6.921	77.997	15.082	2,41	39.9	40.4
2	156	82.9	7.960	76.391	15.649	2,09	39.7	39.7
3	175	93.6	20.930	71.958	7.113	2,06	35.1	31.2
4	173	92.5	15.389	80.095	4.515	1,90	35.5	30.2
5	216	112.1	-2.581	64.785	37.796	3,00	29.3	33.9
6	215	113.9	7.983	55.889	36.129	2,94	28.9	30.2

**Tabla 7. Comportamiento del flujo en el Sedimentador de la Línea 2**

Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)	Fracción de Zonas Muertas (%)	Fracción de Flujo a Pistón (%)	Fracción de Mezcla completa (%)	Índice de Morril	Tiempo Teórico de Retención (min)	Tiempo Medio de Retención (min)
1	156	73.4	5.699	75.510	18.791	2.37	44.8	44.7
2	156	72.9	9.420	79.260	11.320	2,00	45.1	43.6
3	175	81.7	23.553	70.634	5.813	2,09	40.2	34.1
4	173	80.5	34.735	58.247	7.018	1,99	40.8	30.9
5	216	103.5	1.419	71.594	26.987	2,58	31.8	34.0
6	215	101.1	-7.536	79.976	27.560	2,76	32.5	37.9

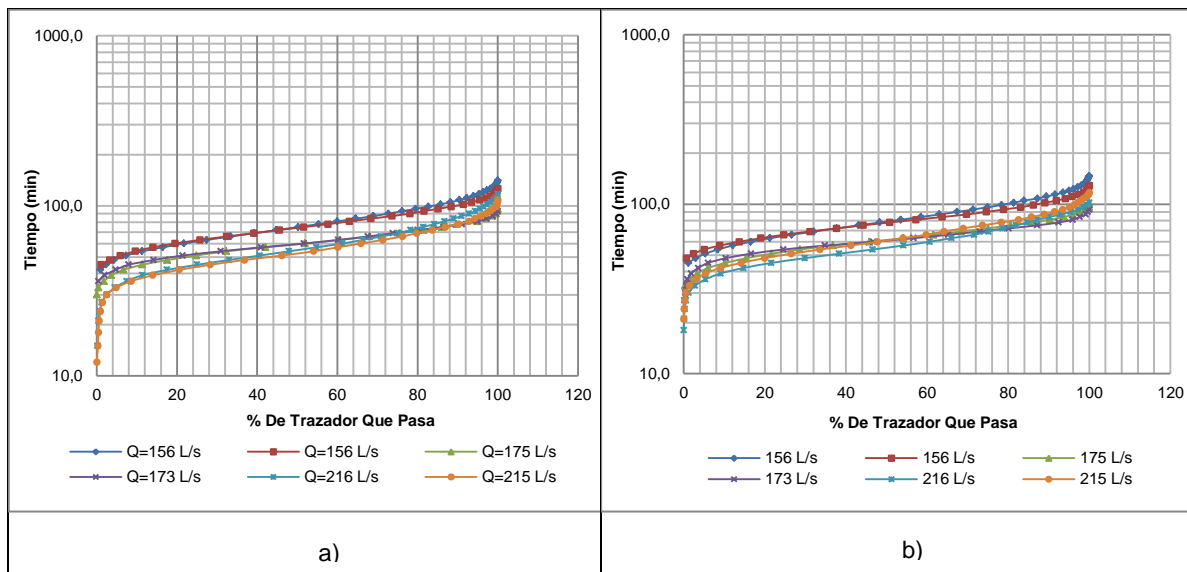
#### 8.1.2.1. Análisis del comportamiento del flujo

Según lo presentado en la Tabla 6 y Tabla 7 se puede observar que solo para los ensayos realizados con los caudales de 156 L/s Y 175 L/s se obtuvieron resultados coherentes en cuanto al comportamiento del flujo en las unidades de sedimentación; para los ensayos realizados con el caudal de 216 L/s es posible que hayan ocurrido errores durante el ensayo al presentarse fracciones de zonas muertas con valores negativos, lo cual no es razonable. Debido a esto, el análisis del comportamiento del flujo para los sedimentadores se realizará con los resultados obtenidos en los ensayos respectivos para los caudales de 156 L/s y 175 L/s (ensayos, 1, 2, 3 y 4).

En la línea 1 de sedimentación, el porcentaje de zonas muertas aumenta, al incrementar el caudal a tratar de 156 L/s a 175 L/s, de un 7.5% a un 18.2% aproximadamente. La fracción de flujo a pistón se mantiene relativamente constante en un porcentaje próximo al 77%. En cuanto a la fracción de flujo mezclado se observa un descenso del 15.4% al 5.8% en promedio.

En la línea 2 de sedimentación el comportamiento del flujo presenta un comportamiento similar al de la línea 1, con la diferencia de que el aumento en la fracción de zonas muertas es un poco más marcado pasando de 7.6% a 29.2% y en la fracción de flujo a pistón hay un pequeño descenso del 77.4% a 64.4% aproximadamente.

En la Figura 17 se presentan las curvas correspondientes al porcentaje de trazador que sale de las unidades de sedimentación Vs el tiempo de salida del mismo, con las cuales se determinan los respectivos índices de Morril. Los datos detallados se pueden observar en el Anexo II.



**Figura 17. Curva Porcentaje de trazador que sale Vs tiempo de salida del a) Sedimentador 1 y b) Sedimentador 2**

Los valores obtenidos para el índice de Morril en las unidades de sedimentación se encuentran próximos a dos (más cercanos a la unidad en comparación con los calculados para los floculadores) y no muestran una tendencia marcada de aumento o descenso con el incremento del caudal. Esto concuerda con lo observado en la Figura 17 en donde la curva Porcentaje de trazador que sale Vs Tiempo de salida para las dos unidades de sedimentación se aproxima más a una línea horizontal que las curvas para los floculadores mostradas en la Figura 16 que presentan una inclinación mucho más marcada.

### 8.1.2.2. Análisis de la curva Concentración Vs Tiempo para las unidades de sedimentación

Debido a que los ensayos de trazadores se realizaron de manera simultánea para las unidades de floculación y sedimentación, con un único punto de dosificación ubicado en la entrada del floculador, se dificulta determinar el tiempo exacto en el que inicia la salida del trazador en los sedimentadores y el tiempo modal, por lo tanto el análisis de la curva Concentración Vs Tiempo se realizará únicamente para la relación  $t_m/t_o$ . De esta forma, en la Tabla 8, se presentan los valores de caudal por línea de tratamiento, tiempo teórico de retención ( $t_o$ ), el tiempo medio de retención ( $t_m$ ), y la relación entre los mismos.

**Tabla 8. Relaciones de tiempo para los sedimentadores**

Línea	Ensayo	Caudal por línea (L/s)	$t_o$ (min)	$t_m$ (min)	$t_m/t_o$
1	1	82,4	39,90	49,41	1,24
	2	82,9	39,66	39,72	1,00
	3	93,6	35,11	31,15	0,89
	4	92,5	35,52	30,18	0,85
	5	112,1	29,32	33,88	1,16
	6	113,9	28,86	30,16	1,05
2	1	73,4	44,79	44,74	0,99
	2	72,9	45,10	43,60	0,97
	3	81,7	40,20	34,15	0,85
	4	80,5	40,80	30,93	0,76
	5	103,5	31,76	34,01	1,07
	6	101,1	32,50	37,9	1,17

Como se puede observar en la Tabla 8, los valores de la relación  $t_m/t_o$  para los caudales de 156 L/s y 175 L/s (ensayos, 1, 2, 3 y 4) de las dos líneas de sedimentación son muy próximos a la unidad lo cual indica el predominio del flujo a pistón en estas unidades, esto concuerda con los resultados mostrados en la Tabla 6 y Tabla 7 en donde se observa que los porcentajes de flujo a pistón son elevados.

Por otro lado, la relación  $t_m/t_o$  es superior a la unidad en los ensayos cinco y seis correspondientes al caudal próximo a 216 L/s para cada línea de sedimentación, esto indica que pudieron existir errores durante los ensayos debido a la posible acumulación de ciertas cantidades del trazador en la estructura, las cuales abandonan lentamente las unidades alargando la rama descendente de la curva de concentración de trazador Vs tiempo y desplazando hacia la derecha su centroide. Esta situación se puede corroborar al detallar la Figura 14, donde las curvas de concentración de trazador Vs tiempo para los sedimentadores presentan un decrecimiento lento después de alcanzar la máxima concentración de sal; adicionalmente, la obtención de relaciones  $t_m/t_o$  mayores a la unidad

también se encuentra relacionado con los valores de fracciones de zonas muertas negativas obtenidos para el caudal de 216 L/s en los dos últimos ensayos, tal y como se muestra en la Tabla 6 y Tabla 7.

En cuanto a los tiempos medios de sedimentación, como se puede observar en la Tabla 8 hay un descenso aproximadamente de diez minutos entre el primer y segundo caudal en estudio (156 y 175 L/s). Para el tercer caudal en estudio se observa que los valores del tiempo en lugar de disminuir como se esperaba, presentan un leve incremento en comparación con el tiempo del segundo caudal, lo cual se puede atribuir al posible error mencionado en el párrafo anterior.

## 8.2. ANÁLISIS DEL TIEMPO MEDIO Y DEL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN

Teniendo en cuenta las pérdidas de carga total y puntuales presentadas en la Tabla 2 para cada línea de floculación, se calcularon los gradientes de velocidad parciales en cada compartimiento y el gradiente total de cada línea para los seis ensayos correspondientes a los caudales analizados de 156 L/s, 175 L/s y 216 L/s; dichos gradientes se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9. Gradientes de Floculación**

Línea de floculación	Caudal L/s	Caudal por línea L/s	Gradientes Parciales en cada compartimiento (s <sup>-1</sup> )								Gradiente Total (s <sup>-1</sup> )
			Entrada-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	
1	156	82.4	24,9	18,6	17,9	13,9	11,3	13,9	13,3	11,8	16.2
	156	82.9	25,4	19,8	20,4	12,9	12,9	12,3	13,6	10,6	16.7
	175	93.6	32,7	25,6	22,9	20,0	17,2	15,9	18,4	12,8	21.5
	173	92.5	29,2	23,3	23,6	15,5	19,0	16,7	18,0	16,5	20.7
	216	112.1	39,5	34,6	30,4	29,6	27,9	22,8	21,1	23,0	29.2
	215	113.9	38,8	34,0	29,8	29,0	27,4	22,4	20,7	22,6	28.7
2	156	73.4	23,8	18,7	19,8	12,8	12,8	12,8	12,8	11,9	16.2
	156	72.9	24,3	19,2	20,2	14,3	13,1	13,1	13,1	12,2	16.7
	175	81.7	32,5	27,6	25,5	17,4	19,8	16,2	19,9	13,0	22.3
	173	80.5	29,2	25,7	25,3	15,5	20,0	16,8	16,8	16,5	21.3
	216	103.5	38,7	36,7	34,4	24,4	27,8	21,8	22,5	23,1	29.4
	215	101.1	38,0	36,0	33,8	23,9	27,3	21,4	22,0	22,6	28.8

Según lo observado en la Tabla 9, los valores de los gradientes parciales en cada compartimiento presentan un comportamiento coherente ya que para cada uno de los caudales en estudio disminuyen de compartimiento a compartimiento a excepción de los presentados entre los compartimientos 6 y 7 los cuales en algunos casos muestran un leve incremento en comparación a los valores entre los compartimientos 5 y 6, lo cual también se evidencia en las pérdidas de carga

presentadas en la Tabla 2 para estos mismos compartimientos. Para el tercer caudal en estudio, en las dos líneas de floculación se observa que los gradientes entre los compartimientos 7 y 8 también muestran un leve incremento. Esta situación puede ser debida a posibles errores estructurales en cuanto a las dimensiones de los orificios de entrega del agua entre un compartimiento y otro.

En la Tabla 3 y Tabla 4 se observa que los valores de los tiempos medios de floculación no se encuentran muy alejados de los tiempos teóricos de retención respectivos para cada caudal. Además se observa que los tiempos medios de retención para la línea 1 de floculación corresponden a valores muy similares a los obtenidos para la línea 2, lo cual muestra que a pesar de que a la línea 2 ingresa un caudal inferior al de la línea 1, esta cantidad de agua no influye de manera significativa en el tiempo medio de floculación de esta línea; por esta razón, el análisis de este parámetro se hará con base en sus valores promedio entre las dos líneas de floculación para cada caudal evaluado, los cuales corresponden a 35, 28 y 23 minutos para los caudales de 156, 175 y 216 L/s respectivamente.

De igual forma a partir de la Tabla 9 se obtienen los valores medios para los gradientes de floculación, los cuales corresponden a  $16 \text{ s}^{-1}$ ,  $22 \text{ s}^{-1}$  y  $29 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente para los mismos caudales en estudio.

Según el estudio de los parámetros óptimos de tratabilidad para la fuente de abastecimiento de la planta Palacé en el municipio de Popayán, realizado por Muñoz y Valencia (2013), el tiempo óptimo de floculación corresponde a 20 minutos para el coagulante utilizado en la planta (Sulfato de Aluminio). A pesar de que los tiempos medios de floculación determinados en las dos líneas para los caudales analizados son superiores al valor óptimo, al ser analizados conjuntamente con sus respectivos valores de gradiente en las gráficas de Tiempo Vs Eficiencia de remoción de turbiedad y color realizadas por Muñoz y Valencia (2013), se obtienen eficiencias con valores cercanos o superiores al 80%.

Además, de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, el gradiente de floculación óptimo ( $22 \text{ s}^{-1}$ ) determinado por Muñoz y Valencia (2013), se presenta al operar la planta con un caudal de 175 L/s, lo cual se ve reflejado en la gráficas de Tiempo Vs Eficiencia de remoción de turbiedad y color realizadas por Muñoz y Valencia (2013), donde para este parámetro con su respectivo tiempo medio de floculación (28 minutos) se obtienen eficiencias de remoción un poco superiores con relación a los otros dos caudales (156 y 216 L/s).

Con el fin de realizar un análisis conjunto del tiempo y gradiente de floculación en la Tabla 10 se presentan los valores del producto entre el tiempo medio y el gradiente obtenidos a partir de los resultados de nuestro estudio para cada caudal en las dos líneas de floculación, con el propósito de compararlos con el producto entre los valores óptimos de dichos parámetros propuestos por Muñoz y Valencia

(2013) y con los valores recomendados según los autores Di Bernardo y Sabogal (2008).

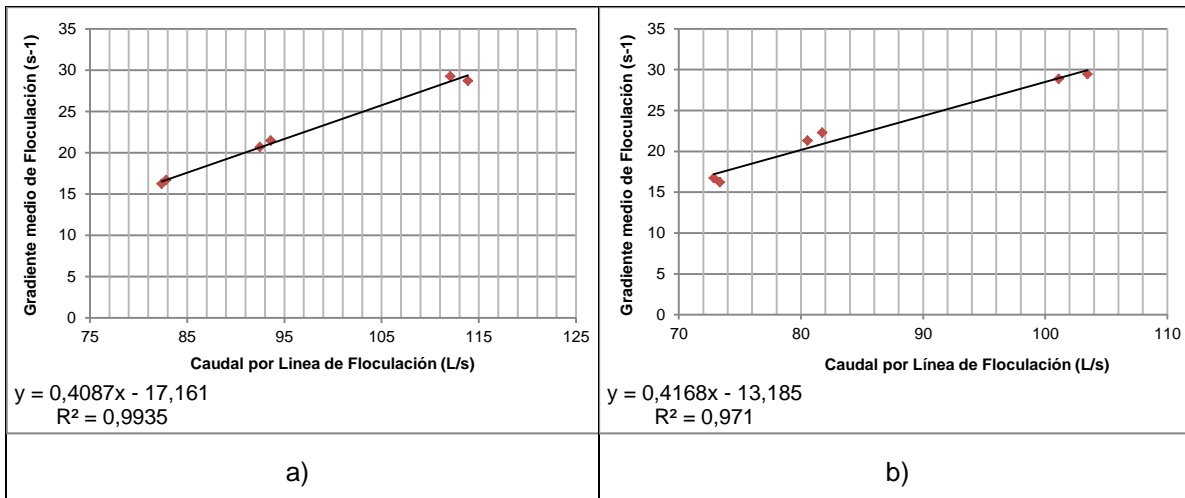
**Tabla 10. Producto entre el tiempo medio y el gradiente de floculación**

Línea de Floculación	Caudal (L/s)	Caudal Por Línea (L/s)	Tiempo medio de floculación $t_m$ (s)	Gradiente G (s-1)	$G^*t_m$	$G^*t_m$ (óptimo)
1	156	82,4	2154	16,2	34894,8	26400
	156	82,9	2088	16,7	34869,6	
	175	93,6	1650	21,5	35475	
	173	92,5	1746	20,7	36142,2	
	216	112,1	1350	29,2	39420	
	215	113,9	1404	28,7	40294,8	
2	156	73,4	2118	16,2	34311,6	
	156	72,9	2034	16,7	33967,8	
	175	81,7	1602	22,3	35724,6	
	173	80,5	1740	21,3	37062	
	216	103,5	1404	29,4	41277,6	
	215	101,1	1458	28,8	41990,4	

En la Tabla 10 se puede observar que para los caudales evaluados más elevados, los valores de  $G^*t_m$  se alejan del valor de  $G^*t_m$  óptimo obtenido a partir de los valores de tiempo y gradiente óptimos propuestos por Muñoz y Valencia (2013), lo cual podría generar algunas limitaciones con la formación de un flóculo adecuado para el proceso. Pese a esto, todos los valores de  $G^*t_m$  se encuentran dentro del rango recomendado para unidades de floculación hidráulicas, el cual varía entre 6000 y 40000 (Di Bernardo y Dantas, 2005; citado por Di Bernardo y Sabogal, 2008), lo cual indica que a pesar de las variaciones del gradiente y del tiempo medio de floculación en función del caudal, existe una compensación entre los mismos al ser inversamente proporcionales y que podrían generar flóculos que puedan ser sedimentados, aunque estos no sean los óptimos .

En la Figura 18 se presentan las curvas de caudal por línea de floculación Vs Gradiente medio de floculación para cada línea, las cuales muestran la tendencia de incremento del gradiente al aumentar el caudal, permitiéndonos estimar el gradiente correspondiente para caudales superiores a los estudiados.





**Figura 18. Curva de Caudal por línea de floculación Vs Gradiente medio de floculación para a) Primer línea de floculación y b) segunda línea d floculación.**

Según la tendencia de las curvas mostradas en la Figura 18, estimando los gradientes medios de floculación para cada línea que se presentarían al operar la planta con el caudal de diseño (250 L/s), se obtienen valores cercanos a  $36 \text{ s}^{-1}$ ; además con el volumen y el caudal se puede estimar el tiempo teórico de retención, obteniendo un valor de 12 minutos, el cual se esperaría que no se encuentre muy lejano al tiempo medio de retención correspondiente al caudal de 250 L/s. Con estos valores, y con base al estudio realizado por Muñoz y Valencia (2013), operando la planta con el caudal de diseño, se esperarían eficiencias de remoción de turbiedad y color entre el 70% y el 80%, además el valor de  $G \cdot T_m$  obtenido para este caudal es de 25920 el cual se encuentra dentro del rango recomendado por Di Bernardo y Sabogal (2008).

De esta forma se puede decir que a pesar de que para ninguno de los caudales estudiados se presentan los valores óptimos de gradiente y tiempo medio de floculación a la vez, las unidades de floculación no presentarían mayor limitación para tratar caudales superiores a los tratados actualmente (150 L/s) hasta llegar al caudal de diseño (250 L/s).

### 8.3. CARGA SUPERFICIAL DE SEDIMENTACIÓN

La carga superficial de sedimentación y la carga superficial equivalente se calcularon con base en el caudal por línea, el área superficial, el número de placas y la velocidad de flujo tal como se especificó en los ítem 5.4 y 6.5. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para la velocidad crítica de sedimentación (carga superficial de sedimentación) y el número de Reynolds para cada caudal por línea de tratamiento correspondientes a los seis ensayos realizados para cada

una de ellas. Las tablas con los cálculos detallados para este ítem se presentan en el Anexo IV.

**Tabla 11. Cargas superficiales de sedimentación**

Línea de sedimentación	Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea de tratamiento (L/s)	Carga superficial ( $m^3/m^2d$ )	Carga superficial equivalente ( $m^3/m^2d$ )	Carga superficial equivalente (cm/min)	Número de Reynolds
1	1	156	82.4	107.1	36.9	2.6	364.1
	2	156	82.9	107.7	37.9	2.6	375.4
	3	175	93.6	121.6	47.1	3.03	408.2
	4	173	92.5	120.2	46.6	3.0	408.4
	5	216	112.1	145.7	69.8	4.4	493.6
	6	215	113.9	148	72.5	4.5	504.0
2	1	156	73.4	95.3	30.5	2.12	324.2
	2	156	72.9	94.6	30.6	2.12	330.0
	3	175	81.7	106.5	33.1	2.4	356.4
	4	173	80.5	104.6	36.2	2.4	355.5
	5	216	103.5	134.4	58.3	3.7	455.6
	6	215	101.1	131.8	48.3	3.5	445.3

En la Tabla 12 se presentan algunas eficiencias de remoción de turbiedad calculadas con base en las curvas de sedimentabilidad mostradas en la Figura 15 con el fin de estimar y recomendar un valor de carga superficial de sedimentación y de comparar las eficiencias en las dos líneas de tratamiento.

**Tabla 12. Eficiencias de remoción de turbiedad para diferentes velocidades críticas de sedimentación para un caudal de 175 L/s**

Línea de Tratamiento	Carga superficial equivalente (cm/min)	Carga superficial equivalente ( $m^3/m^2d$ )	Eficiencia de Remoción de Turbiedad
1	0.5	7.2	0,59
	0.2	2.9	0,71
	0.14	2.0	0,72
2	0.5	7.2	0,50
	0.2	2.9	0,64
	0.14	2.0	0,69

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) recomienda para sedimentadores de alta tasa de placas angostas cargas superficiales entre 120 y 185 ( $m^3/m^2d$ ). En la Tabla 11 se observa que los valores de carga superficial se encuentran por debajo de este rango cuando se opera con caudales bajos y se incluyen dentro del rango al operar con caudales elevados hasta llegar al caudal de diseño (250 L/s) para el cual se obtiene un valor de carga superficial de 162  $m^3/m^2d$  aproximadamente.

Además, en la Tabla 11 se observa que a medida que se incrementa el caudal a tratar, la carga superficial de sedimentación y la carga superficial equivalente aumentan, siendo estos valores mayores en todos los casos para la línea 1 de sedimentación. Además, dichos valores se encuentran por encima de 2 cm/min ( $28.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ ) los cuales indican velocidades muy elevadas que no pueden ser ubicadas en las curvas de sedimentabilidad mostradas en la Figura 15, esto señala eficiencias demasiado bajas en estas unidades, disminuyendo a medida que se aumenta el caudal, lo que podría ser causa de las limitaciones presentadas al operar la planta con caudales superiores a 150 L/s. Con esto, se puede decir que aunque las cargas superficiales para caudales altos cumplen con las recomendaciones del Reglamento RAS (2000), aun así, las cargas superficiales equivalentes, las cuales representan las condiciones reales del sedimentador, demuestran que hay limitaciones en la sedimentación del floc.

Lo anterior concuerda con lo presentado en el estudio realizado por Muñoz y Valencia (2013), donde determinan que se requieren velocidades críticas de sedimentación inferiores a 1 cm/min ( $14.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ ) preferiblemente inferiores a 0.67 cm/min ( $9.65 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ ) para obtener eficiencias de remoción de turbiedad superiores al 80% utilizando el sulfato de aluminio como coagulante. Aun así, de acuerdo a las curvas de sedimentabilidad para las dos líneas de tratamiento realizadas en nuestro estudio y presentadas en la Figura 15, para una velocidad crítica de sedimentación de 0.67 cm/min se obtiene un valor de fracción remanente (C) por encima de 0.7 con lo cual se puede deducir que la eficiencia en cuanto a remoción de turbiedad no supera el 80%.

Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) para sedimentadores de alta tasa, el número de Reynolds (Re) debe ser menor a 500 y preferiblemente menor a 250 para asegurar un régimen de flujo laminar en estas unidades. Según los valores estimados para los sedimentadores y los caudales evaluados presentados en la Tabla 11 estos valores varían entre 330 y 504, los cuales aunque cumplen podrían no estar asegurando un régimen de flujo óptimo para el desempeño del sedimentador, particularmente cuando opera con los caudales más altos evaluados. De otra parte al aumentar el caudal a tratar a un valor de 250 L/s se estaría generando un número de Reynolds próximo a 567, el cual ya estaría por encima del recomendado, situación que no es la indicada en las unidades de sedimentación por el posible rompimiento del floc o una inadecuada sedimentación del mismo.

Con base en la Tabla 12 también se puede decir que las eficiencias para las dos líneas de tratamiento presentan valores cercanos para un mismo valor teórico de carga superficial a pesar de las diferencias presentadas entre las dos líneas en el comportamiento del flujo de las unidades evaluadas.

### 8.3.1. Prueba de sedimentabilidad para el caudal de 216 L/s

Aprovechando que para los ensayos realizados para el caudal de 216 L/s se utilizó Policloruro de Aluminio tipo B como coagulante, se elaboró una curva de sedimentabilidad adicional que permitiera comparar las eficiencias alcanzadas en cuanto a remoción de turbiedad con las alcanzadas con el Sulfato de Aluminio, para las mismas cargas superficiales utilizadas en la Tabla 12.

La Figura 19 presenta las curvas de Velocidad de sedimentación Vs Fracción remanente, elaboradas para las dos líneas de tratamiento, operando con un caudal de 216 L/s.

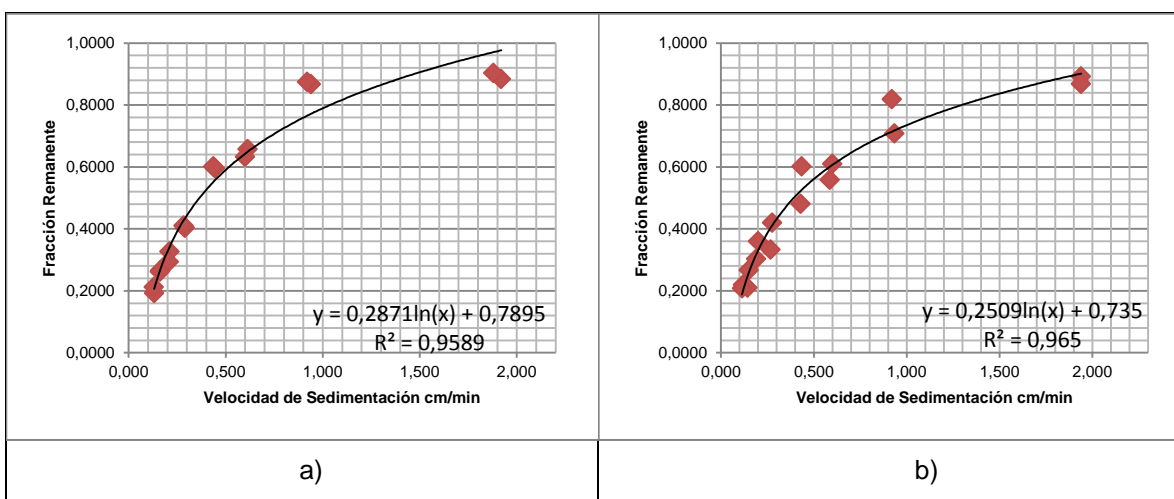


Figura 19. Curva de sedimentabilidad para el agua floculada de la a) línea 1 de tratamiento y b) línea 2 de tratamiento, para un caudal de 216 L/s

En la Tabla 13 se presentan algunas eficiencias de remoción de turbiedad calculadas con base en las curvas de sedimentabilidad mostradas en la Figura 19 para tres valores teóricos de carga superficial y así, además de comparar las eficiencias obtenidas entre los dos coagulantes, estimar con que carga superficial se alcanzan las mayores remociones.

Tabla 13. Eficiencias de remoción de turbiedad para diferentes velocidades críticas de sedimentación para un caudal de 216 L/s

Línea de Tratamiento	Velocidad Crítica de Sedimentación (cm/min)	Eficiencia de Remoción de Turbiedad (%)
1	0.5	0,62
	0.2	0,77
	0.14	0,81
2	0.5	0,61
	0.2	0,76
	0.14	0,80

Comparando las eficiencias presentadas en la Tabla 12 (caudal de 175 L/s) con las presentadas en la Tabla 13 (caudal de 216 L/s), se observa que para los mismos valores de carga superficial con el Policloruro de Aluminio tipo B las eficiencias obtenidas son más elevadas que las del Sulfato de Aluminio, alcanzando valores del 80%, lo cual indica que el cambio del coagulante podría ser una alternativa para superar las limitaciones presentadas al operar la planta con caudales superiores a 150 L/s siempre y cuando se garanticen cargas superficiales inferiores a 0.2 cm/min debido a que con las cargas superficiales reales para un caudal de 216 L/s mostradas en la Tabla 11, no se alcanzarían valores de remoción de turbiedad elevados.

## 9. CONCLUSIONES

- El comportamiento del flujo, tanto en los floculadores como en los sedimentadores, presenta marcadas variaciones al aumentarse el caudal, con incrementos en el porcentaje de zonas muertas y de la fracción de flujo mezclado, alejándose de esta forma del flujo ideal; esta situación podría afectar la eficiencia de las unidades, particularmente cuando opera con caudales mayores a 150 L/s, donde se observa el levantamiento del floc en los sedimentadores.
- Los porcentajes de zonas muertas son mayores en la línea 2 de floculación para los tres caudales analizados, sin embargo esto no representa mayor influencia en la eficiencia del proceso floculación- sedimentación ya que ambas presentaron valores cercanos al final de la etapa de sedimentación. Se debe considerar en la futura ampliación una revisión del diseño en las entradas y salidas de los compartimientos del floculador que permitan minimizar las zonas muertas y mejorar el flujo de pistón.
- Los resultados obtenidos para los tiempos medios de retención se compensan con los obtenidos para los gradientes de floculación, obteniendo así valores de  $G \cdot t_m$  dentro del rango recomendado por Di Bernardo y Sabogal (2008) para floculadores hidráulicos, lo cual muestra que a pesar de que no se alcanzan gradientes y tiempos óptimos con el aumento del caudal, estas unidades no presentan mayores limitaciones hidráulicamente hablando ya que para los valores obtenidos de estos parámetros se obtienen eficiencias de remoción de turbiedad y color cercanas al 80% según lo expuesto por Muñoz y Valencia (2013).
- La carga superficial equivalente de sedimentación para los caudales analizados se encuentra por encima del rango óptimo, el cual según el trabajo de Muñoz y Valencia (2013) debe estar por debajo de 1cm/min, rango que concuerda con nuestros análisis realizados en las curvas de sedimentabilidad; esto influye en el funcionamiento adecuado del sedimentador ya que no está trabajando hidráulicamente de manera eficiente.

## 10. REFERENCIAS

ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN – S.A. E.S.P. Plantas de Tratamiento. Disponible en: <file:///Acueducto%20y%20Alcantarillado%20de%20Popayán.htm>. Consultado: Marzo de 2013.

ARRIETA, Geovani. 2002. Calidad del agua en Colombia. *Superintendencia de Servicios Públicos, Ministerio de Salud*. p: 3.

CAPACHO GUTIERREZ, Ariel. URIBE JAIMES, Edison Javier. 2005. Evaluación, Diagnóstico y Optimización de los Procesos de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Florida Blanca (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P). Universidad Industrial de Santander. p: 1. Disponible en <http://repositorio.uis.edu.co>. Consultado: Abril de 2013.

CEPIS/OPS. 2005. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Pp: 51-53, 60

CONPES 3343. 2005. Lineamientos y Estrategias de Desarrollo Sostenible para los Sectores de Agua, Ambiente y Desarrollo Territorial. p: 9.

DEFENSORIA DEL PUEBLO. 2011. Diagnóstico de la Calidad de agua para Consumo Humano, año 2010. p: 37.

DI BERNARDO, Luiz y SABOGAL PAZ, Lyda Patricia. 2008. Selección de Tecnologías de Tratamiento de Agua. Volumen I. LDiBe editora. Pp: 132

EMCASERVICIOS. 2010. Plan Departamental para la Modernización Empresarial de los Servicios de Agua y Saneamiento, PDA CAUCA. p: 19,22,117-127.

GONZALES, Maribel y SALDARRIAGA, Julio César. 2008. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio. *Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 10*. Pp: 45-53

GONZALES MUÑOZ, Luis Jorge y SANCLEMENTE P., Mauricio. 1998. Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto Nuevo Acueducto de Popayán- Río Palacé. Popayán: Corporación Autónoma Regional del Cauca C.R.C. p: 15, 24, 44, 46, 48, 50.

HEADLEY, Thomas R y KADLEC, Robert H. 2007. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. *Ecohydrology & Hydrobiology, Vol. 7 No 3-4*. Pp: 269-282

HERNÁNDEZ RAMÍREZ, Erik Fernando. 2003. Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “LO DE COY”. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Pp: 28, 33

LEVENSPIEL, Octave, 2004. Ingeniería de las Reacciones Químicas. 3ra Edición. Editorial LIMUSA S.A. de C.V. Versión en español Hecho en México. Pp: 258,

LUENGAS C., Segundo Belisario. 1990. Aforos por dilución. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, HIMAT. Subdirección de Estudios e Investigaciones, División de Estudios Hidrometeorológicos, Sección Hidrología. Pp: 2-3. Disponible en: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/012791/AFOROSPOORDILUCION.pdf>. Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2013.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 2010. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Viceministerio de Ambiente. p: 23,

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO DE COLOMBIA. 2000. Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico – RAS 2000 Sistemas de Potabilización Título C.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007. p:4

MORGAN-SAGASTUME, Juan M. JIMENEZ, Blanca y NOYOLA, Adalberto. 1997. Un nuevo índice para la interpretación de las curvas de distribución de tiempos de residencia en tanques para el tratamiento del agua. *Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*, 11. FEMISCA. p: 1.

MUÑOZ SÁNCHEZ, Ana Mileidy y VALENCIA RENGIFO, Viviana. 2013. Estudio de los parámetros óptimos de tratabilidad para la fuente de abastecimiento de la planta Palacé en el municipio de Popayán, Departamento del Cauca. Trabajo de Investigación para optar al título de Ingeniera Ambiental. Universidad del Cauca.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD-OMS. 2006. Guías para la Calidad del Agua Potable, p: 1.

PÉREZ CARRIÓN, José y GALVÍS, Gerardo. 1990. Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. p: 1.



QUIROZ BUSTOS, Noemí. BARGAS CAMARENO, Maricruz. JIMENÉS ANTILLÓN, Joaquín. 2010. Desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el río humo, reserva forestal río macho. *Centro de Investigación en Protección Ambiental CIPA. Instituto Tecnológico de Costa Rica*. p: 2.

RONKANEN, Anna-Kaisa y KLØVE, Bjørn. 2007. Use of stable isotopes and tracers to detect preferential flow patterns in a peatland treating municipal wastewater. *Journal of Hydrology* 347. Pp: 418–429.

## ANEXOS

## ANEXO I. CURVAS DE CONDUCTIVIDAD VS CONCENTRACIÓN DE SAL

### ENSAYO 1

Tabla A1.1. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 1

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad $\mu$ s
0	136
3	143
6	148.8
9	154.8
12	160.8
15	166.9
18	171.6
21	178.7
26	187.6
31	197.6
36	207

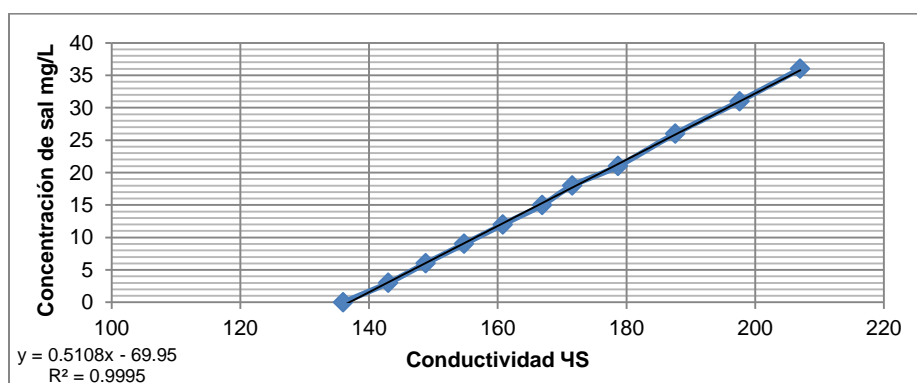


Figura A1. 1. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 1

### ENSAYO 2

Tabla A1.2. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 2

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad $\mu$ s
0	155.7
3	162.7
6	168.1
9	174.5
12	178.1
15	182.3
18	188.9
21	193.3
26	201
31	211
36	219
41	230

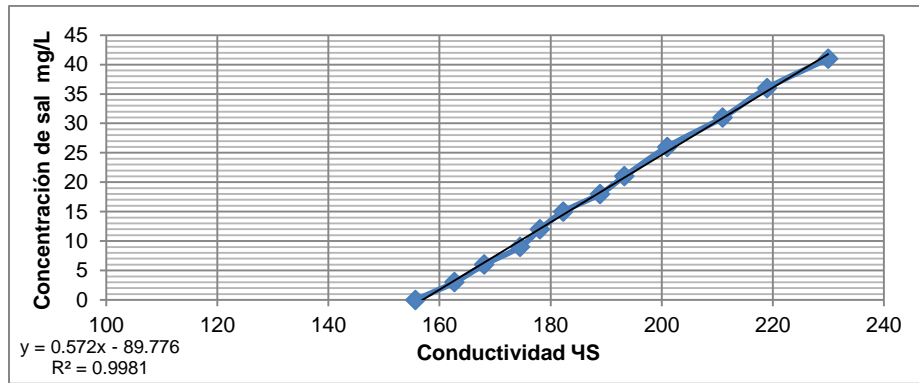


Figura A1.2. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 2

### ENSAYO 3

Tabla A1.3. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 3

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad $\mu$ s
0	172.3
3	180.2
6	187.5
9	193.1
12	200
15	206
18	212
21	216
26	225
31	235
36	241

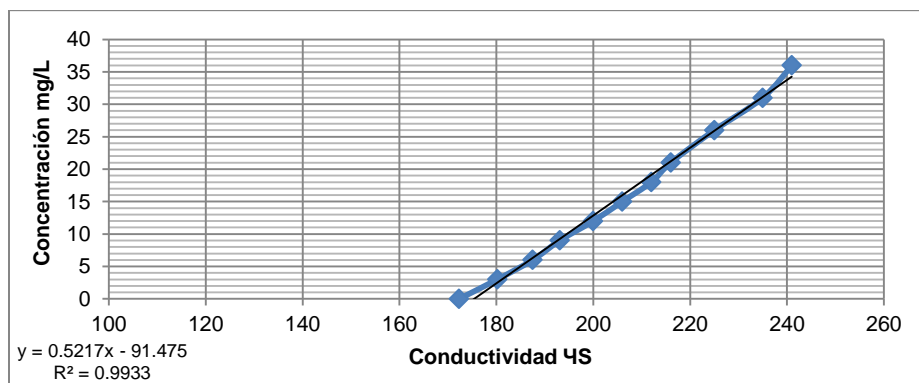


Figura A1.3. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 3

## ENSAYO 4

Tabla A1.4. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 4

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad $\mu\text{s}$
0	172.4
3	180.6
6	188.4
9	194.8
12	201
15	205
18	212
21	219
26	230
31	240
36	252

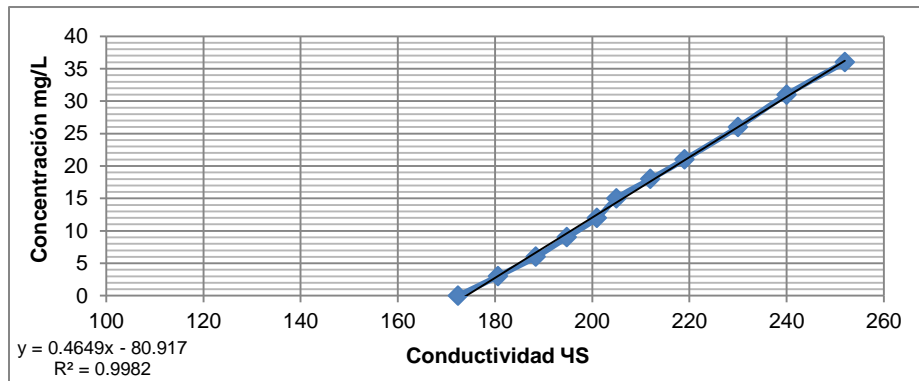


Figura A1.4. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 4

## ENSAYO 5

Tabla A1.5. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 5

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad $\mu\text{s}$
0	175.5
3	181.8
6	187.3
9	193.5
12	200
15	206
18	213
23	222
28	232
33	242
38	252

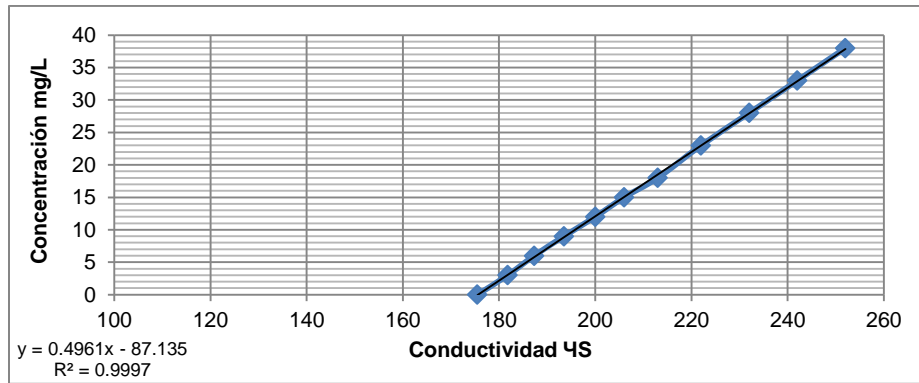


Figura A1.5. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 5

## ENSAYO 6

Tabla A1.6. Conductividad correspondiente para cada concentración conocida de sal en el Ensayo 6

Concentración de Sal (mg/L)	Conductividad 4s
0	187.2
3	192.9
6	199.2
9	205
12	211
15	216
18	222
21	228
24	235
29	245
34	254
39	263
44	272

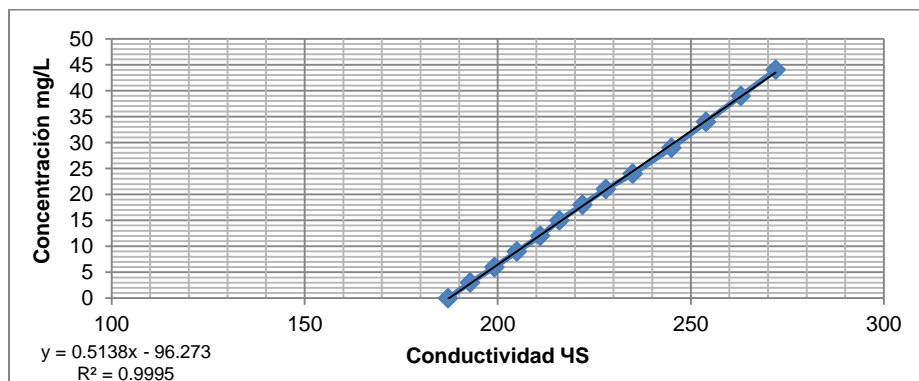


Figura A1.6. Curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal para el Ensayo 6

## ANEXO II. MEMORIAS DE CÁLCULOS PARA ENSAYOS CON TRAZADORES

### ENSAYO 1

Tabla A2.1 Caudal estudiado durante el ensayo 1

Caudal de operación de la Planta	156 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	84.2 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	73.4 L/s

#### • Línea 1 de floculación

Volumen de la unidad:  $177.7 \text{ m}^3$

Caudal de la Primera Línea:  $82.4 \text{ L/s} = 4.94 \text{ m}^3/\text{min}$

#### Cálculo Tipo

Tiempo teórico  $T_o$

$$T_o = \frac{Q}{V} = \frac{177.7 \text{ m}^3}{4.94 \text{ m}^3/\text{min}} = 35.95 \text{ min}$$

Para Muestra N° 5

$$\frac{t}{T_o} = \frac{12}{35.95} = 0.33$$

Concentración (C): a partir de la ecuación de la curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal

$$C = 0.5108 \times 139.8 - 69.95 = 1.5 \text{ mg/L}$$

$$C - C_1 = 1.5 - 0 = 1.5 \text{ mg/L}$$

$$\Sigma(C - C_1) = 1.5 \text{ mg/L}$$

Masa de trazador que sale  $M_i$

$$M_5 = Q \times C - C_i \times \Delta t = 4.94 \text{ m}^3/\text{min} \times 1.5 \text{ mg/L} \times 12 - 9 \text{ min}$$

$$M_5 = 21.69 \text{ g}$$

$$\Sigma M_5 = 21.69 \text{ g}$$

Fracción Remanente (1-F(t))

$$1 - F t = 1 - \frac{\Sigma M_5}{\Sigma M_{TOTAL}} = 1 - \frac{21.69}{5289.25} = 0.996$$

Los resultados para cada muestra se resumen en la Tabla A2.2. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 1

Tabla A2.2. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 1

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (4S)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	130.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
2	3.0	130.0	0.08	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
3	6.0	136.3	0.17	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
4	9.0	136.4	0.25	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
5	12.0	139.8	0.33	1.5	1.5	1.5	21.69	21.69	0.996
6	15.0	146.3	0.42	4.8	4.8	6.2	70.93	92.62	0.982
7	18.0	154.0	0.50	8.7	8.7	15.0	129.26	221.88	0.958
8	21.0	167.6	0.58	15.7	15.7	30.6	232.28	454.17	0.914
9	24.0	181.4	0.67	22.7	22.7	53.3	336.82	790.99	0.850
10	27.0	193.3	0.75	28.8	28.8	82.1	426.97	1217.96	0.770
11	30.0	202.0	0.83	33.2	33.2	115.4	492.87	1710.84	0.677
12	33.0	202.0	0.92	33.2	33.2	148.6	492.87	2203.71	0.583
13	36.0	203.0	1.00	33.7	33.7	182.3	500.45	2704.16	0.489
14	39.0	198.1	1.08	31.2	31.2	213.6	463.33	3167.49	0.401
15	42.0	192.7	1.17	28.5	28.5	242.1	422.42	3589.92	0.321
16	45.0	181.8	1.25	22.9	22.9	265.0	339.85	3929.77	0.257
17	48.0	175.4	1.34	19.6	19.6	284.6	291.37	4221.14	0.202
18	51.0	168.6	1.42	16.2	16.2	300.8	239.86	4461.00	0.157
19	54.0	162.4	1.50	13.0	13.0	313.8	192.89	4653.90	0.120
20	57.0	156.4	1.59	9.9	9.9	323.8	147.44	4801.34	0.092
21	60.0	154.0	1.67	8.7	8.7	332.5	129.26	4930.60	0.068
22	63.0	147.2	1.75	5.2	5.2	337.7	77.75	5008.35	0.053
23	66.0	146.9	1.84	5.1	5.1	342.8	75.48	5083.83	0.039
24	69.0	145.1	1.92	4.2	4.2	347.0	61.84	5145.67	0.027
25	72.0	145.1	2.00	4.2	4.2	351.2	61.84	5207.51	0.015
26	75.0	142.1	2.09	2.6	2.6	353.8	39.12	5246.62	0.008
27	78.0	141.5	2.17	2.3	2.3	356.1	34.57	5281.20	0.002
28	81.0	138.0	2.25	0.5	0.5	356.7	8.06	5289.25	0.000
29	84.0	136.1	2.34	0.0	0.0	356.7	0.00	5289.25	0.000
30	87.0	135.2	2.42	0.0	0.0	356.7	0.00	5289.25	0.000

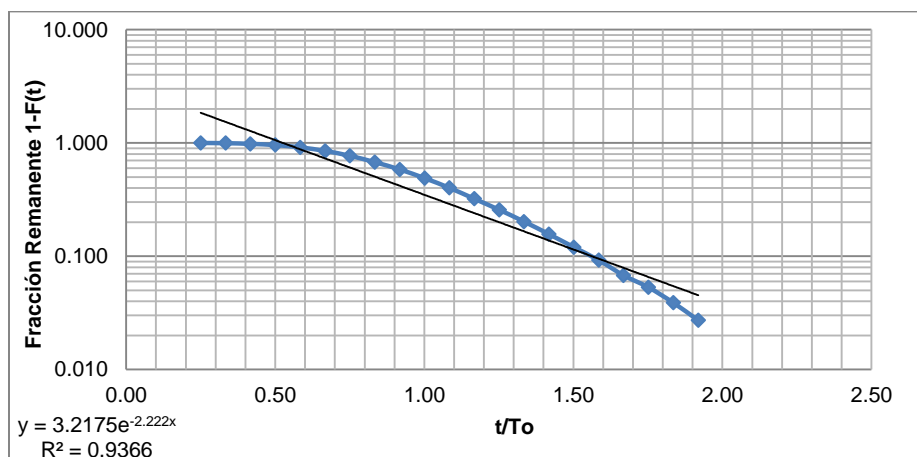


Figura A2.1. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Floculación en el Ensayo 1

Teniendo en cuenta la ecuación de la línea de tendencia de la Figura A2.1

$$1 - F t = 3.2175e^{-2.222\frac{t}{T_0}}$$



Se tiene:

$$\log 1 - F t = \log 3.2175 - 2.222 \frac{t}{T_0} \log(e)$$

$$\log 1 - F t = 0.5075 - 0.965 \frac{t}{T_0}$$

- Fracción de Flujo a Pistón ( $\Theta$ )

Cuando:

$$1 - F t = 1 \rightarrow \log 1 = -2.222 \frac{t}{T_0} \log e + \log 3.2175 \quad y \quad \theta = \frac{t}{T_0}$$

$$\theta = \frac{\log 1 - \log 3.2175}{-2.222 \times \log(e)} = 0.5259 = 52.59\%$$

Dado a que la pendiente de la recta está dada por:

$$\tan \alpha = 2.222 \times \log(e)$$

Entonces:

$$P = \frac{\theta \tan \alpha}{0.434 + \theta \tan \alpha} = \frac{0.53 \times (2.222 \times \log e)}{0.434 + 0.53 \times (2.222 \times \log e)} = 0.539$$

- Fracción de Zona Muerta (m)

$$m = 1 - \frac{\theta}{P}$$

$$m = 1 - \frac{0.5259}{0.539} = 0.0243 = 2.43\%$$

- Fracción de Mezcla Completa (M)

$$M = 1 - P \quad 1 - m$$

$$M = 1 - 0.54 \quad 1 - 0.0243 = 0.4497 = 44.97\%$$

- Tiempo medio de retención  $T_m$

Área bajo la curva de Concentración de sal Vs Tiempo.

$$A = \sum A_i$$

$$A_i = \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \times \Delta t$$

Para muestra 5

$$A_i = \frac{1.5 + 4.8}{2} \times 12 - 9 = 9.369$$

$$X_i = \frac{\Delta t}{2} + t_{i-1}$$

$$X_i = \frac{12-9}{2} + 9 = 10.5$$

$$A_i X_i = 9.369 \times 10.5 = 98.373$$

Los resultados para cada muestra se presentan en la Tabla A2. **3** y teniendo en cuenta las sumatorias totales para  $\sum X_i A_i$  y  $\sum A_i$  se calculó el tiempo medio de retención para la primera línea de floculación en este ensayo.

$$t_m = \frac{\sum X_i A_i}{\sum A_i}$$

$$t_m = \frac{38461.585}{1070.010} = 35.94 \text{ min}$$

○ Índice de Morril

Porcentaje de cantidad de trazador que sale de la unidad (F).

$$\%F = \frac{\sum M_i}{\sum M_{Total}} \times 100$$

Para muestra 5

$$\%F = \frac{21.69}{5289.25} \times 100 = 0.41$$

A partir de la curva %F Vs tiempo, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$t = 0.5558 F + 11.609$$

Se calculan los tiempos correspondientes al 10% y 90% de trazador que sale y finalmente el índice de Morril.

$$t_{10} = 0.5558 \cdot 10 + 11.609 = 17.17 \text{ min}$$

$$t_{90} = 0.5558 \cdot 90 + 11.609 = 61.63 \text{ min}$$

$$IM = \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{61.63}{17.17} = 3.59$$

Tabla A2. 3. Tiempo medio de retención e índice de Morril para la primera línea de floculación en el ensayo N°1

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum M_i$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0.00			0
2	3.0	0.0	0.00	0	0	0
3	6.0	0.0	0.00	0	0	0
4	9.0	0.0	0.00	2.194	16.456	0
5	12.0	1.5	21.69	9.369	98.373	0.410
6	15.0	4.8	92.62	20.249	273.367	1.751
7	18.0	8.7	221.88	36.570	603.409	4.195
8	21.0	15.7	454.17	57.565	1122.519	8.587
9	24.0	22.7	790.99	77.257	1738.290	14.955
10	27.0	28.8	1217.96	93.042	2372.566	23.027
11	30.0	33.2	1710.84	99.708	2841.680	32.346
12	33.0	33.2	2203.71	100.474	3164.940	41.664
13	36.0	33.7	2704.16	97.486	3363.266	51.126
14	39.0	31.2	3167.49	89.594	3359.765	59.885
15	42.0	28.5	3589.92	77.104	3122.716	67.872
16	45.0	22.9	3929.77	63.848	2777.397	74.297
17	48.0	19.6	4221.14	53.734	2498.626	79.806
18	51.0	16.2	4461.00	43.773	2166.755	84.341
19	54.0	13.0	4653.90	34.425	1807.300	87.988
20	57.0	9.9	4801.34	27.988	1553.355	90.775
21	60.0	8.7	4930.60	20.939	1224.932	93.219
22	63.0	5.2	5008.35	15.499	953.172	94.689
23	66.0	5.1	5083.83	13.890	895.881	96.116
24	69.0	4.2	5145.67	12.510	844.452	97.285

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma M_i$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
25	72.0	4.2	5207.51	10.212	719.925	98.455
26	75.0	2.6	5246.62	7.453	547.814	99.194
27	78.0	2.3	5281.20	4.312	329.843	99.848
28	81.0	0.5	5289.25	0.815	64.787	100
29	84.0	0.0	5289.25	0	0	100
30	87.0	0.0	5289.25	0	0	100
<b>Total</b>				1070.010	38461.585	

Tabla A2. 4. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para primera línea de floculación en el ensayo N°1

Flujo a Pistón	0.5259	52.59%
Zonas Muertas	0.0243	2.43%
Zonas Mezcladas	0.4497	44.97%
Tiempo medio de retención	35.94 minutos	
Índice de Morril	3.59	

- Línea 1 de Sedimentación**

Volumen:  $197.16\text{m}^3$

Caudal Primera Línea:  $82.4\text{L/s} = 4.94\text{m}^3/\text{min}$

Cálculo Tipo

Tiempo teórico  $T_o$

$$T_o = \frac{Q}{V} = \frac{197.16\text{m}^3}{4.94\text{m}^3/\text{min}} = 39.89\text{ min}$$

Para Muestra N° 8

$$\frac{t}{T_o} = \frac{42}{39.89} = 1.05$$

Concentración (C): a partir de la ecuación de la curva de calibración de Conductividad Vs Concentración de sal (Figura A1. 1, Anexo 1)

$$C = 0.5108 \times 142.6 - 69.95 = 2.9\text{mg/L}$$

$$C - C_1 = 2.9 - 0 = 2.9\text{mg/L}$$

$$\Sigma(C - C_1) = 2.9\text{mg/L}$$

Masa de trazador que sale  $M_i$

$$M_8 = Q \times C - C_i \times \Delta t = 4.94\text{m}^3\text{ min} \times 2.9\text{mg L} \times 42 - 39\text{ min}$$

$$M_8 = 42.9\text{g}$$

$$\Sigma M_8 = 42.9\text{g}$$

Fracción Remanente (1-F(t))

$$1 - F t = 1 - \frac{\Sigma M_8}{\Sigma M_{TOTAL}} = 1 - \frac{42.9}{4574.41} = 0.991$$

Los resultados para cada muestra se resumen en la Tabla A2. 5

Tabla A2. 5. Cálculo de las Fracciones Remanentes en la Línea 1 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el ensayo 1.

Muestra	Tiempo (min)	Conductividad (4S)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0	132.6	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
2	24	132.8	0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
3	27	132.8	0.68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
4	30	132.8	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
5	33	133.3	0.83	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
6	36	134.3	0.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
7	39	136.8	0.98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000
8	42	142.6	1.05	2.9	2.9	2.9	42.90	42.90	0.991
9	45	145.3	1.13	4.3	4.3	7.2	63.36	106.26	0.977
10	48	148.7	1.20	6.0	6.0	13.2	89.11	195.37	0.957
11	51	155.4	1.28	9.4	9.4	22.6	139.87	335.24	0.927
12	54	160.9	1.35	12.2	12.2	34.8	181.53	516.77	0.887
13	57	168.2	1.43	16.0	16.0	50.8	236.83	753.60	0.835
14	60	168.8	1.50	16.3	16.3	67.1	241.38	994.97	0.782
15	63	171.3	1.58	17.6	17.6	84.6	260.31	1255.29	0.726
16	66	172.7	1.65	18.3	18.3	102.9	270.92	1526.21	0.666
17	69	172.8	1.73	18.3	18.3	121.2	271.68	1797.88	0.607
18	72	170.2	1.81	17.0	17.0	138.2	251.98	2049.86	0.552
19	75	169.6	1.88	16.7	16.7	154.9	247.44	2297.30	0.498
20	78	167.6	1.96	15.7	15.7	170.6	232.28	2529.58	0.447
21	81	165.2	2.03	14.4	14.4	185.0	214.10	2743.69	0.400
22	84	164.6	2.11	14.1	14.1	199.1	209.56	2953.25	0.354
23	87	163.5	2.18	13.6	13.6	212.7	201.23	3154.47	0.310
24	90	159.4	2.26	11.5	11.5	224.2	170.17	3324.64	0.273
25	93	157.9	2.33	10.7	10.7	234.9	158.80	3483.45	0.238
26	96	157.2	2.41	10.4	10.4	245.3	153.50	3636.95	0.205
27	99	156.0	2.48	9.7	9.7	255.0	144.41	3781.36	0.173
28	102	155.2	2.56	9.3	9.3	264.3	138.35	3919.71	0.143
29	105	152.2	2.63	7.8	7.8	272.1	115.63	4035.34	0.118
30	108	150.2	2.71	6.8	6.8	278.9	100.48	4135.81	0.096
31	111	148.3	2.78	5.8	5.8	284.7	86.08	4221.89	0.077
32	114	147.0	2.86	5.1	5.1	289.8	76.23	4298.13	0.060
33	117	144.8	2.93	4.0	4.0	293.9	59.57	4357.70	0.047
34	120	143.3	3.01	3.3	3.3	297.1	48.21	4405.90	0.037
35	123	142.9	3.08	3.0	3.0	300.1	45.18	4451.08	0.027
36	126	142.0	3.16	2.6	2.6	302.7	38.36	4489.44	0.019
37	129	140.9	3.23	2.0	2.0	304.8	30.02	4519.46	0.012
38	132	140.8	3.31	2.0	2.0	306.7	29.27	4548.73	0.006
39	135	138.5	3.38	0.8	0.8	307.5	11.84	4560.57	0.003
40	138	138.5	3.46	0.8	0.8	308.3	11.84	4572.42	0.000
41	141	137.2	3.54	0.1	0.1	308.5	2.00	4574.41	0.000
42	144	136.1	3.61	0.0	0.0	308.5	0.00	4574.41	0.000
43	147	135.7	3.69	0.0	0.0	308.5	0.00	4574.41	0.000

Una vez obtenidas la ecuaciones de regresión de las curvas de t/To Vs fracción remanente para el floculador y para el sedimentador incluido el efecto del floculador (ver Figura A2. 2), se tabularon con las mismas para varios valores de

1-F(t), las relaciones de t/To y así poder calcular t/To para el sedimentador solo (ver Tabla A2.6), tal y como se muestra a continuación:

Cálculo de Relaciones t/To a partir de las ecuaciones (a) y (b) de la Figura A2. 2.

Para Floculador más sedimentador

$$1 - F t = 8.7844 \times e^{-1.664 t / T_o}$$

$$\log 1 - F t = \log 8.7844 - 1.664 \frac{t}{T_o} \log(e)$$

$$\frac{t}{T_o} = \frac{\log 8.7844 - \log(1-F(t))}{1.664 \times \log(e)}$$

Siendo (1-F(t))=1

$$\frac{t}{T_o} = \frac{\log 8.7844 - \log(1)}{1.664 \times \log(e)} = 1.306$$

Para el Floculador siguiendo el mismo procedimiento anterior se tiene:

$$\frac{t}{T_o} = \frac{\log 3.2175 - \log(1-F(t))}{2.222 \times \log(e)}$$

$$\frac{t}{T_o} = \frac{\log 3.2175 - \log(1)}{2.222 \times \log(e)} = 0.526$$

Con los datos anteriores se calcula el valor de t/To del sedimentador solo para el mismo valor de 1-F(t)=1

$${}^t T_o (\text{sedimentador}) = {}^t T_o \text{ floculador} + \text{sedimentador} - {}^t T_o (\text{floculador})$$

$${}^t T_o \text{ sedimentador} = 1.306 - 0.526 = 0.78$$

Con los nuevos de valores de t/To se graficó una nueva curva a partir de la cual se continuó con los cálculos según Wolf y Resnick.

Tabla A2.6. Fracción remanente en la línea 1 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 1

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.306	0.526	0.780
0.95	1.337	0.549	0.788
0.9	1.369	0.573	0.796
0.85	1.404	0.599	0.804
0.8	1.440	0.626	0.814
0.75	1.479	0.655	0.823
0.7	1.520	0.686	0.834
0.65	1.565	0.720	0.845
0.6	1.613	0.756	0.857
0.55	1.665	0.795	0.870
0.5	1.722	0.838	0.885
0.45	1.786	0.885	0.900
0.4	1.857	0.938	0.918

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
0.35	1.937	0.998	0.938
0.3	2.029	1.068	0.962
0.25	2.139	1.150	0.989
0.2	2.273	1.250	1.023
0.15	2.446	1.380	1.066
0.1	2.690	1.562	1.127
0.05	3.106	1.874	1.232
0.01	4.073	2.598	1.475

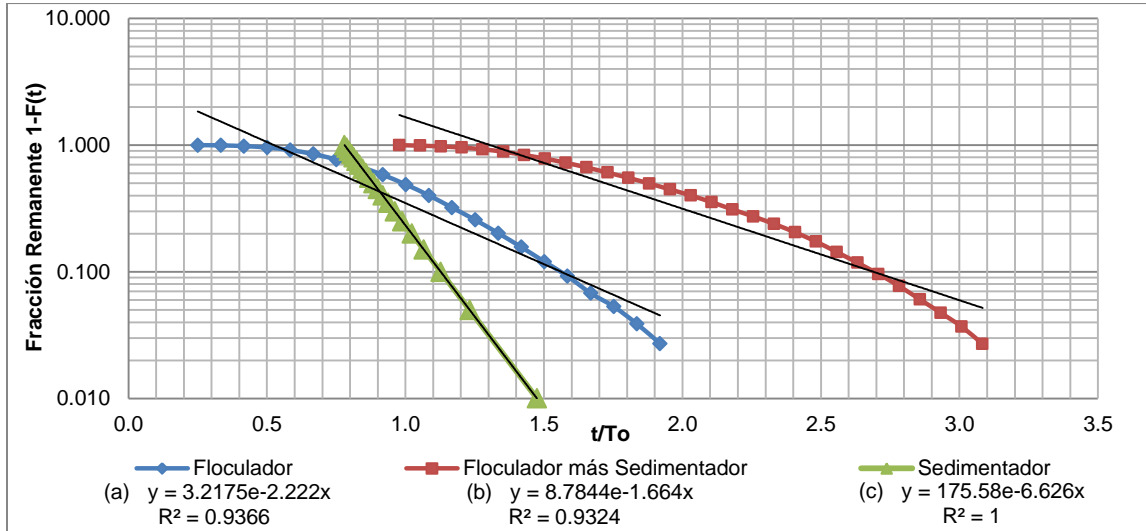


Figura A2. 2. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 1

Teniendo en cuenta la ecuación (c) de la línea de tendencia de la figura X:

$$1 - F t = 175.58e^{-6.626 \frac{t}{T_0}}$$

Se tiene:

$$\log 1 - F t = \log 175.58 - 6.626 \frac{t}{T_0} \log(e)$$

$$\log 1 - F t = 2.2445 - 2.878 \frac{t}{T_0}$$

- Fracción de Flujo a Pistón ( $\Theta$ )

Cuando:

$$1 - F t = 1 \rightarrow \log 1 = -6.626 \frac{t}{T_0} \log e + \log 175.58 \quad y \quad \theta = \frac{t}{T_0}$$

$$\theta = \frac{\log 1 - \log 175.58}{-6.626 \times \log(e)} = 0.78 = 78\%$$

Dado a que la pendiente de la recta está dada por:

$$\tan \alpha = 6.626 \times \log(e)$$

Entonces:

$$P = \frac{\theta \tan \alpha}{0.434 + \theta \tan \alpha} = \frac{0.78 \times (6.626 \times \log e)}{0.434 + 0.78 \times (6.626 \times \log e)} = 0.838$$

- Fracción de Zona Muerta (m)

$$m = 1 - \frac{\theta}{P}$$

$$m = 1 - \frac{0.78}{0.838} = \mathbf{0.0692} = \mathbf{6.92\%}$$

- Fracción de Mezcla Completa (M)

$$M = 1 - P \quad 1 - m$$

$$M = 1 - 0.838 \quad 1 - 0.0692 = \mathbf{0.1508} = \mathbf{15.08\%}$$

- Tiempo medio de retención  $T_m$

Área bajo la curva de Concentración de sal Vs Tiempo.

$$A = \sum A_i$$

$$A_i = \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \times \Delta t$$

Para muestra 8

$$A_i = \frac{2.9+4.3}{2} \times 42 - 39 = 10.748$$

$$X_i = \frac{\Delta t}{2} + t_{i-1}$$

$$X_i = \frac{42-39}{2} + 39 = 40.5$$

$$A_i X_i = 10.748 \times 40.5 = 435.296$$

Los resultados para cada muestra se presentan en la Tabla A2. 7

El tiempo medio de retención total de la línea de floculación – sedimentación está dada por:

$$t_{mTotal} = \frac{\sum X_i A_i}{\sum A_i}$$

$$t_{mTotal} = \frac{70659.6891}{925.399348} = \mathbf{76.36min}$$

El tiempo medio de retención del sedimentador solo, corresponde a la diferencia entre el tiempo total y el tiempo medio de retención en el floculador.

$$t_m = t_{mTotal} - t_{mfloculador}$$

$$t_m = 76.36 - 35.94 = 40.41min$$

- Índice de Morril

Porcentaje de cantidad de trazador que sale de la unidad para muestra 8

$$\%F = \frac{\sum M_i}{\sum M_{Total}} \times 100 = \frac{42.9}{4574.4} \times 100 = \mathbf{0.938}$$

A partir de la curva %F Vs tiempo, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$t = 0.8302 F + 38.885$$

$$t_{10} = 0.8302 \cdot 10 + 38.885 = 47.187min$$

$$t_{90} = 0.8302 \cdot 90 + 38.885 = 113.603min$$

$$IM = \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{113.603}{47.187} = 2.41$$

Tabla A2. 7. Tiempo medio de retención e índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 1

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0.000			0
2	24.0	0.0	0.000	0	0	0
3	27.0	0.0	0.000	0	0	0
4	30.0	0.0	0.000	0	0	0
5	33.0	0.0	0.000	0	0	0
6	36.0	0.0	0.000	0	0	0
7	39.0	0.0	0.000	4.340	162.735	0
8	42.0	2.9	42.903	10.748	435.296	0.938
9	45.0	4.3	106.259	15.422	670.861	2.323
10	48.0	6.0	195.371	23.161	1076.990	4.271
11	51.0	9.4	335.238	32.509	1609.204	7.329
12	54.0	12.2	516.768	42.317	2221.642	11.297
13	57.0	16.0	753.599	48.370	2684.549	16.474
14	60.0	16.3	994.974	50.746	2968.616	21.751
15	63.0	17.6	1255.288	53.734	3304.635	27.441
16	66.0	18.3	1526.206	54.883	3539.970	33.364
17	69.0	18.3	1797.883	52.968	3575.317	39.303
18	72.0	17.0	2049.864	50.516	3561.357	44.812
19	75.0	16.7	2297.299	48.523	3566.477	50.221
20	78.0	15.7	2529.584	45.152	3454.132	55.299
21	81.0	14.4	2743.689	42.853	3406.841	59.979
22	84.0	14.1	2953.248	41.551	3427.937	64.560
23	87.0	13.6	3154.474	37.566	3211.920	68.959
24	90.0	11.5	3324.642	33.275	2944.873	72.679
25	93.0	10.7	3483.446	31.590	2890.456	76.151
26	96.0	10.4	3636.949	30.134	2847.647	79.506
27	99.0	9.7	3781.360	28.601	2788.633	82.663
28	102.0	9.3	3919.712	25.690	2581.811	85.688
29	105.0	7.8	4035.337	21.858	2262.353	88.2154
30	108.0	6.8	4135.812	18.870	2009.672	90.4119
31	111.0	5.8	4221.895	16.418	1797.794	92.294
32	114.0	5.1	4298.129	13.736	1545.343	93.960
33	117.0	4.0	4357.697	10.901	1259.101	95.262
34	120.0	3.3	4405.903	9.445	1119.287	96.316
35	123.0	3.0	4451.078	8.449	1026.596	97.304
36	126.0	2.6	4489.436	6.917	861.152	98.142
37	129.0	2.0	4519.461	5.997	764.668	98.799
38	132.0	2.0	4548.729	4.158	542.675	99.439
39	135.0	0.8	4560.573	2.396	319.878	99.697
40	138.0	0.8	4572.417	1.400	191.098	99.956
41	141.0	0.1	4574.414	0.202	28.170	100
42	144.0	0.0	4574.414	0	0	100
43	147.0	0.0	4574.414	0	0	100
		Total		925.399348	70659.6891	



Tabla A2. 8. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 1

Flujo a Pistón	0.7800	77.9972
Zonas Muertas	0.0692	6.9210
Zonas Mezcladas	0.1508	15.0818
Tiempo medio de retención	40.41 minutos	
Índice de Morril	2.41	

- **Línea 2 de Floculación**

Volumen: 177.789 m<sup>3</sup>

Caudal de la Segunda línea: 73.4 L/s

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 40.39 minutos

Tabla A2. 9. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 1

Muestra	Tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	130.3	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
2	3.0	130.1	0.07	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
3	6.0	135.4	0.15	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
4	9.0	135.4	0.22	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
5	12.0	138.5	0.30	0.8	0.8	0.8	10.55	10.55	0.998
6	15.0	145.5	0.37	4.4	4.4	5.2	57.76	68.31	0.985
7	18.0	152.8	0.45	8.1	8.1	13.3	107.01	175.32	0.963
8	21.0	169.4	0.52	16.6	16.6	29.9	218.98	394.30	0.916
9	24.0	181.0	0.59	22.5	22.5	52.4	297.23	691.52	0.853
10	27.0	197.2	0.67	30.8	30.8	83.2	406.50	1098.02	0.767
11	30.0	202.0	0.74	33.2	33.2	116.4	438.88	1536.90	0.673
12	33.0	204.0	0.82	34.3	34.3	150.6	452.37	1989.27	0.577
13	36.0	203.0	0.89	33.7	33.7	184.4	445.62	2434.89	0.483
14	39.0	200.0	0.97	32.2	32.2	216.6	425.39	2860.28	0.392
15	42.0	193.9	1.04	29.1	29.1	245.7	384.24	3244.52	0.311
16	45.0	191.7	1.11	28.0	28.0	273.7	369.40	3613.92	0.232
17	48.0	175.7	1.19	19.8	19.8	293.5	261.47	3875.39	0.177
18	51.0	167.3	1.26	15.5	15.5	309.0	204.81	4080.21	0.133
19	54.0	163.4	1.34	13.5	13.5	322.5	178.51	4258.71	0.095
20	57.0	154.6	1.41	9.0	9.0	331.5	119.15	4377.86	0.070
21	60.0	150.8	1.49	7.1	7.1	338.6	93.51	4471.38	0.050
22	63.0	147.3	1.56	5.3	5.3	343.9	69.91	4541.28	0.035
23	66.0	144.9	1.63	4.1	4.1	348.0	53.72	4595.00	0.024
24	69.0	142.9	1.71	3.0	3.0	351.0	40.23	4635.23	0.015
25	72.0	141.3	1.78	2.2	2.2	353.3	29.43	4664.66	0.009
26	75.0	140.3	1.86	1.7	1.7	355.0	22.69	4687.35	0.004
27	78.0	138.8	1.93	1.0	1.0	355.9	12.57	4699.92	0.001
28	81.0	137.9	2.01	0.5	0.5	356.4	6.50	4706.42	0.000
29	84.0	136.3	2.08	0.0	0.0	356.4	0.00	4706.42	0.000
30	87.0	135.0	2.15	0.0	0.0	356.4	0.00	4706.42	0.000

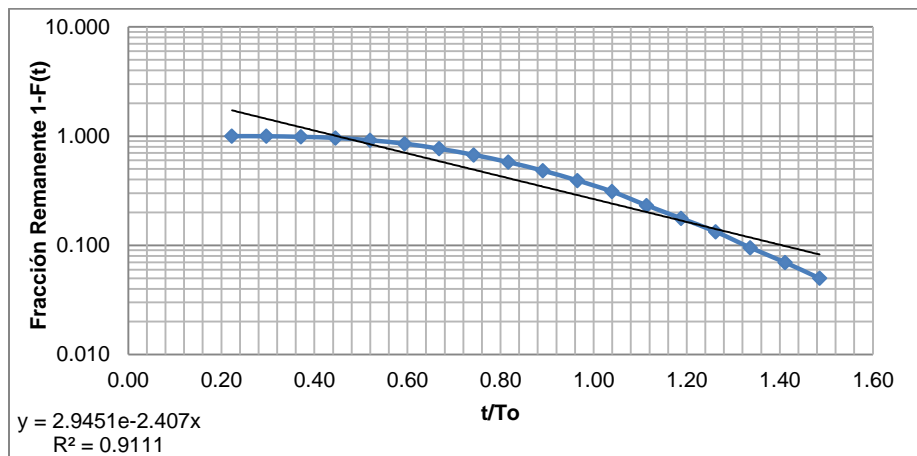


Figura A2.3. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Floculación en el Ensayo 1

Tabla A2. 10 Tiempo medio de retención e índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 1

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0.000			0
2	3.0	0.0	0.000	0	0	0
3	6.0	0.0	0.000	0	0	0
4	9.0	0.0	0.000	1.198	8.985	0
5	12.0	0.8	10.547	7.760	81.477	0.224
6	15.0	4.4	68.311	18.717	252.678	1.451
7	18.0	8.1	175.317	37.030	610.994	3.725
8	21.0	16.6	394.295	58.638	1143.437	8.378
9	24.0	22.5	691.520	79.939	1798.631	14.693
10	27.0	30.8	1098.021	96.030	2448.768	23.330
11	30.0	33.2	1536.899	101.241	2885.355	32.655
12	33.0	34.3	1989.267	102.007	3213.213	42.267
13	36.0	33.7	2434.891	98.942	3413.493	51.736
14	39.0	32.2	2860.278	91.969	3448.840	60.774
15	42.0	29.1	3244.518	85.609	3467.177	68.938
16	45.0	28.0	3613.919	71.664	3117.376	76.787
17	48.0	19.8	3875.394	52.968	2462.996	82.343
18	51.0	15.5	4080.207	43.543	2155.377	86.695
19	54.0	13.5	4258.714	33.812	1775.118	90.487
20	57.0	9.0	4377.861	24.157	1340.724	93.019
21	60.0	7.1	4471.376	18.564	1085.975	95.006
22	63.0	5.3	4541.282	14.043	863.637	96.491
23	66.0	4.1	4594.999	10.671	688.308	97.633
24	69.0	3.0	4635.225	7.913	534.127	98.487
25	72.0	2.2	4664.659	5.921	417.415	99.113
26	75.0	1.7	4687.347	4.005	294.381	99.595
27	78.0	1.0	4699.918	2.166	165.716	99.862
28	81.0	0.5	4706.417	0.738	58.695	100
29	84.0	0.0	4706.417	0	0	100
30	87.0	0.0	4706.417	0	0	100
<b>Total</b>				1069.244	37732.894	

Tabla A2. 11. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 1

Flujo a Pistón	0.4488	44.88%
Zonas Muertas	0.1361	13.61%
Zonas Mezcladas	0.4152	41.52%
Tiempo medio de retención	35.29 minutos	
Índice de Morril	3.54	

• **Línea 2 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 73.4 L/s = 4.40163 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 44.79 minutos

Tabla A2.12. Cálculo de Fracciones Remanentes en la Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 1

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	131.8	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
2	24.0	132.1	0.54	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
3	27.0	132.0	0.60	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
4	30.0	132.6	0.67	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
5	33.0	133.6	0.74	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
6	36.0	134.2	0.80	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
7	39.0	135.2	0.87	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
8	42.0	134.8	0.94	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	1.000
9	45.0	144.3	1.00	3.8	3.8	3.8	49.67	49.67	0.989
10	48.0	148.6	1.07	6.0	6.0	9.7	78.67	128.34	0.971
11	51.0	152.3	1.14	7.8	7.8	17.6	103.63	231.98	0.948
12	54.0	157.4	1.21	10.5	10.5	28.0	138.03	370.01	0.917
13	57.0	160.7	1.27	12.1	12.1	40.2	160.29	530.31	0.881
14	60.0	166.1	1.34	14.9	14.9	55.1	196.72	727.03	0.837
15	63.0	167.8	1.41	15.8	15.8	70.8	208.19	935.21	0.791
16	66.0	172.0	1.47	17.9	17.9	88.7	236.52	1171.73	0.738
17	69.0	172.5	1.54	18.2	18.2	106.9	239.89	1411.62	0.684
18	72.0	173.6	1.61	18.7	18.7	125.6	247.31	1658.93	0.629
19	75.0	172.3	1.67	18.1	18.1	143.7	238.54	1897.47	0.576
20	78.0	170.9	1.74	17.3	17.3	161.0	229.10	2126.56	0.525
21	81.0	170.5	1.81	17.1	17.1	178.2	226.40	2352.96	0.474
22	84.0	169.4	1.88	16.6	16.6	194.8	218.98	2571.94	0.425
23	87.0	166.5	1.94	15.1	15.1	209.9	199.42	2771.36	0.381
24	90.0	165.8	2.01	14.7	14.7	224.6	194.70	2966.05	0.337
25	93.0	162.6	2.08	13.1	13.1	237.7	173.11	3139.16	0.298
26	96.0	160.3	2.14	11.9	11.9	249.7	157.60	3296.76	0.263
27	99.0	159.4	2.21	11.5	11.5	261.1	151.53	3448.29	0.229
28	102.0	156.3	2.28	9.9	9.9	271.0	130.61	3578.90	0.200
29	105.0	153.6	2.34	8.5	8.5	279.5	112.40	3691.30	0.175
30	108.0	158.3	2.41	10.9	10.9	290.5	144.11	3835.41	0.143
31	111.0	151.7	2.48	7.5	7.5	298.0	99.59	3934.99	0.120
32	114.0	150.8	2.55	7.1	7.1	305.1	93.51	4028.51	0.100
33	117.0	149.7	2.61	6.5	6.5	311.6	86.09	4114.60	0.080

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (4S)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
34	120.0	146.8	2.68	5.0	5.0	316.6	66.53	4181.14	0.065
35	123.0	143.9	2.75	3.6	3.6	320.2	46.97	4228.11	0.055
36	126.0	143.7	2.81	3.5	3.5	323.6	45.62	4273.73	0.045
37	129.0	142.6	2.88	2.9	2.9	326.5	38.20	4311.93	0.036
38	132.0	141.5	2.95	2.3	2.3	328.9	30.78	4342.72	0.029
39	135.0	139.5	3.01	1.3	1.3	330.2	17.29	4360.01	0.025
40	138.0	139.4	3.08	1.3	1.3	331.4	16.62	4376.62	0.022
41	141.0	138.5	3.15	0.8	0.8	332.2	10.55	4387.17	0.019
42	144.0	138.0	3.21	0.5	0.5	332.8	7.17	4394.35	0.018
43	147.0	137.8	3.28	0.4	0.4	333.2	5.82	4400.17	0.016
44	150.0	136.9	3.35	0.0	0.0	333.2	0.00	4400.17	0.016

Tabla A2. 13. Fracción remanente en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 1

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.204	0.449	0.755
0.95	1.235	0.470	0.765
0.9	1.267	0.493	0.775
0.85	1.302	0.516	0.786
0.8	1.339	0.541	0.797
0.75	1.377	0.568	0.809
0.7	1.419	0.597	0.822
0.65	1.464	0.628	0.836
0.6	1.512	0.661	0.851
0.55	1.565	0.697	0.868
0.5	1.622	0.737	0.885
0.45	1.686	0.780	0.905
0.4	1.757	0.829	0.927
0.35	1.837	0.885	0.953
0.3	1.930	0.949	0.982
0.25	2.040	1.025	1.016
0.2	2.175	1.117	1.058
0.15	2.349	1.237	1.112
0.1	2.593	1.405	1.188
0.05	3.012	1.693	1.318
0.01	3.983	2.362	1.621

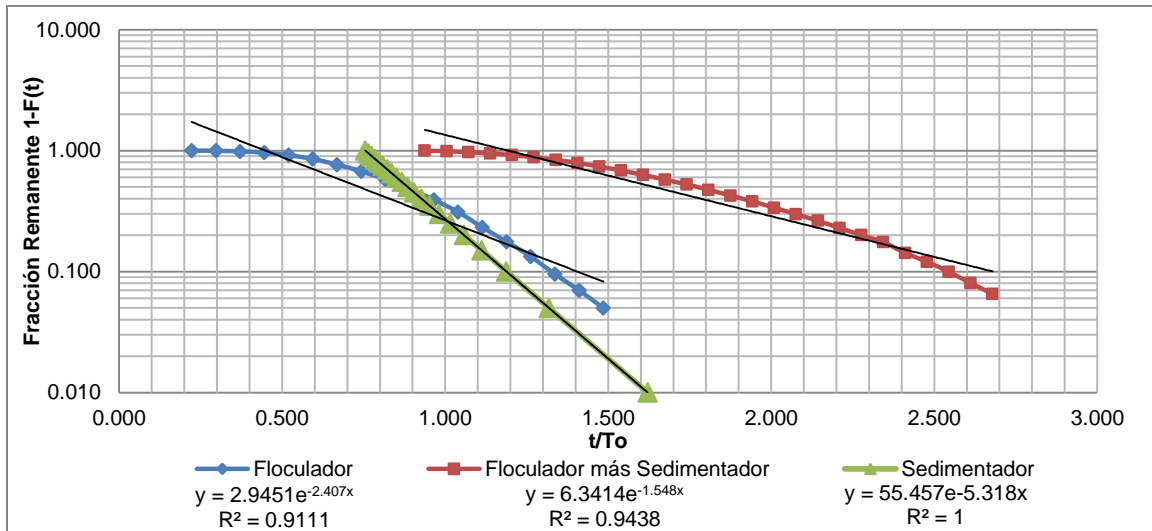


Figura A2.4. Curva  $t/T_o$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 1

Tabla A2.14. Tiempo medio de retención e índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el ensayo N°1

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum M_i$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0	0	0
4	30.0	0.0	0	0	0	0
5	33.0	0.0	0	0	0	0
6	36.0	0.0	0	0	0	0
7	39.0	0.0	0	0	0	0
8	42.0	0.0	0	5.642	228.510	0
9	45.0	3.8	49.670	14.579	634.197	1.129
10	48.0	6.0	128.345	20.709	962.975	2.917
11	51.0	7.8	231.978	27.452	1358.874	5.272
12	54.0	10.5	370.012	33.888	1779.140	8.409
13	57.0	12.1	530.306	40.555	2250.783	12.052
14	60.0	14.9	727.025	45.995	2690.703	16.523
15	63.0	15.8	935.211	50.516	3106.716	21.254
16	66.0	17.9	1171.728	54.117	3490.548	26.629
17	69.0	18.2	1411.617	55.343	3735.652	32.081
18	72.0	18.7	1658.927	55.190	3890.877	37.701
19	75.0	18.1	1897.467	53.121	3904.387	43.123
20	78.0	17.3	2126.564	51.742	3958.239	48.329
21	81.0	17.1	2352.963	50.592	4022.090	53.474
22	84.0	16.6	2571.941	47.527	3921.010	58.451
23	87.0	15.1	2771.359	44.769	3827.744	62.983
24	90.0	14.7	2966.054	41.781	3697.585	67.408
25	93.0	13.1	3139.164	37.566	3437.318	71.342
26	96.0	11.9	3296.760	35.114	3318.308	74.923
27	99.0	11.5	3448.285	32.049	3124.819	78.367
28	102.0	9.9	3578.899	27.605	2774.328	81.335
29	105.0	8.5	3691.301	29.138	3015.755	83.890
30	108.0	10.9	3835.406	27.682	2948.120	87.165
31	111.0	7.5	3934.992	21.935	2401.894	89.428

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
32	114.0	7.1	4028.507	20.403	2295.296	91.553
33	117.0	6.5	4114.602	17.338	2002.503	93.510
34	120.0	5.0	4181.135	12.894	1527.882	95.022
35	123.0	3.6	4228.107	10.518	1277.960	96.090
36	126.0	3.5	4273.729	9.522	1185.499	97.126
37	129.0	2.9	4311.932	7.836	999.137	97.995
38	132.0	2.3	4342.715	5.461	712.665	98.694
39	135.0	1.3	4360.007	3.852	514.234	99.087
40	138.0	1.3	4376.625	3.086	421.198	99.465
41	141.0	0.8	4387.171	2.013	280.810	99.705
42	144.0	0.5	4394.345	1.477	210.416	99.868
43	147.0	0.4	4400.170	0.662	96.274	100
	150.0	0.0	4400.170	0	0	100
Total				999.668	80004.446	

Tabla A2.15. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el ensayo N°1

Flujo a Pistón	0.7551	75.51%
Zonas Muertas	0.0570	5.70%
Zonas Mezcladas	0.1879	18.79%
Tiempo medio de retención	44.7 minutos	
Índice de Morril	2.37	

## ENSAYO 2

Tabla A2.16. Caudal estudiado durante el Ensayo 2

Caudal de operación de la Planta	156 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	82.9 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	72.9 L/s

### • Línea 1 de floculación

Volumen: 177.72 m<sup>3</sup>

Caudal: 82.9 l/s= 4.97 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 35.8 min

Tabla A2.17. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	147.2	0	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	147.3	0.08	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	6.0	154.2	0.17	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	9.0	154.7	0.25	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	12.0	156.6	0.34	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
6	15.0	161.9	0.42	2.8	2.8	2.8	42.175	42.175	0.992
7	18.0	170.3	0.50	7.6	7.6	10.5	113.828	156.002	0.969
8	21.0	182.4	0.59	14.6	14.6	25.0	217.043	373.045	0.927
9	24.0	193.5	0.67	20.9	20.9	45.9	311.727	684.772	0.865
10	27.0	205.0	0.76	27.5	27.5	73.4	409.824	1094.596	0.785
11	30.0	213.0	0.84	32.1	32.1	105.5	478.065	1572.661	0.690
12	33.0	216.0	0.92	33.8	33.8	139.2	503.656	2076.317	0.591
13	36.0	219.0	1.01	35.5	35.5	174.7	529.246	2605.563	0.487
14	39.0	215.0	1.09	33.2	33.2	207.9	495.125	3100.689	0.390
15	42.0	210.0	1.18	30.3	30.3	238.3	452.475	3553.163	0.301
16	45.0	204.0	1.26	26.9	26.9	265.2	401.294	3954.457	0.222
17	48.0	196.8	1.34	22.8	22.8	288.0	339.877	4294.334	0.155
18	51.0	188.7	1.43	18.2	18.2	306.1	270.783	4565.116	0.101
19	54.0	180.4	1.51	13.4	13.4	319.5	199.982	4765.099	0.062
20	57.0	175.2	1.59	10.4	10.4	330.0	155.626	4920.724	0.031
21	60.0	166.9	1.68	5.7	5.7	335.6	84.825	5005.550	0.015
22	63.0	163.1	1.76	3.5	3.5	339.2	52.411	5057.960	0.004
23	66.0	159.6	1.85	1.5	1.5	340.7	22.555	5080.516	0.000
24	69.0	156.7	1.93	0	0	340.7	0	5080.516	0.000
25	72.0	154.0	2.01	0	0	340.7	0	5080.516	0.000

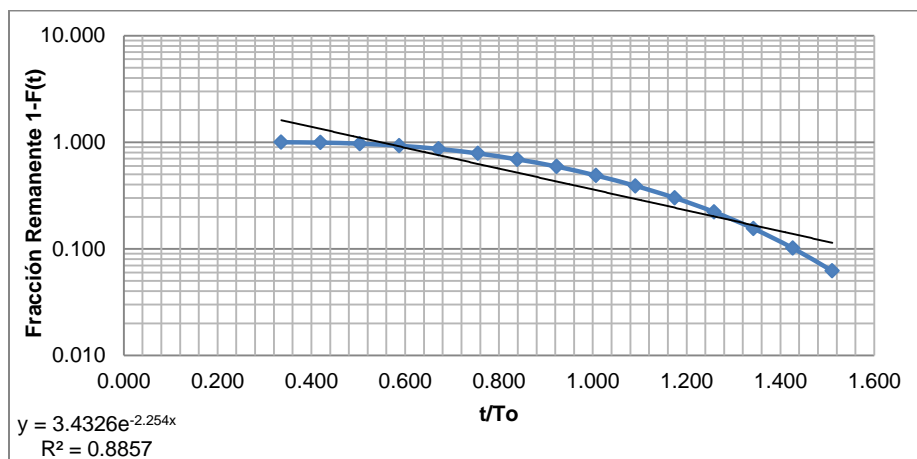


Figura A2.5. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 2

Tabla A2.18. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de floculación en el ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	ΣMi (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0.000			0
2	3.0	0.0	0.000	0	0	0.
3	6.0	0.0	0.000	0	0	0
4	9.0	0.0	0.000	0	0	0
5	12.0	0.0	10.547	4.242	44.541	0.000
6	15.0	2.8	68.311	15.691	211.828	0.830
7	18.0	7.6	175.317	33.279	549.111	3.071
8	21.0	14.6	394.295	53.184	1037.097	7.343
9	24.0	20.9	691.520	72.575	1632.930	13.478
10	27.0	27.5	1098.021	89.305	2277.282	21.545
11	30.0	32.1	1536.899	98.743	2814.172	30.955

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	$(Xi \cdot Ai)$	F (%)
12	33.0	33.8	1989.267	103.891	3272.558	40.868
13	36.0	35.5	2434.891	103.033	3554.630	51.285
14	39.0	33.2	2860.278	95.311	3574.162	61.031
15	42.0	30.3	3244.518	85.873	3477.868	69.937
16	45.0	26.9	3613.919	74.548	3242.838	77.836
17	48.0	22.8	3875.394	61.421	2856.076	84.526
18	51.0	18.2	4080.207	47.350	2343.835	89.855
19	54.0	13.4	4258.714	35.768	1877.797	93.792
20	57.0	10.4	4377.861	24.185	1342.262	96.855
21	60.0	5.7	4471.376	13.803	807.499	98.524
22	63.0	3.5	4541.282	7.540	463.722	99.556
23	66.0	1.5	4594.999	2.269	146.327	100
24	69.0	0.0	4635.225	0	0	100
25	72.0	0.0	4664.659	0	0	100
<b>Total</b>				1022.011	35526.535	

Tabla A2. 19. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 2

Flujo a Pistón	0.5472	54.72
Zonas Muertas	0.0095	0.95
Zonas Mezcladas	0.4434	44.34
Tiempo medio de retención	34.8 minutos	
Índice de Morril	2.75	

- **Línea 1 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 4.97 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 39.7 minutos

Tabla A2.20. Cálculo de las Fracciones Remanentes en la Línea 1 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (YS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	148.9	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	148.6	0.61	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	148.7	0.68	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	30.0	150.2	0.76	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	33.0	151.5	0.83	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
6	36.0	151.9	0.91	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
7	39.0	153.6	0.98	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
8	42.0	156.9	1.06	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
9	45.0	162.3	1.13	3.1	3.1	3.1	45.587	45.587	0.989
10	48.0	167.6	1.21	6.1	6.1	9.1	90.796	136.383	0.968
11	51.0	170.0	1.29	7.5	7.5	16.6	111.269	247.652	0.941
12	54.0	175.3	1.36	10.5	10.5	27.1	156.479	404.130	0.904
13	57.0	178.4	1.44	12.3	12.3	39.4	182.922	587.052	0.860
14	60.0	184.3	1.51	15.6	15.6	55.0	233.250	820.302	0.805
15	63.0	187.5	1.59	17.5	17.5	72.5	260.546	1080.849	0.743



Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
16	66.0	189.8	1.66	18.8	18.8	91.3	280.166	1361.014	0.676
17	69.0	190.0	1.74	18.9	18.9	110.2	281.872	1642.886	0.609
18	72.0	188.4	1.82	18.0	18.0	128.1	268.224	1911.110	0.545
19	75.0	187.1	1.89	17.2	17.2	145.4	257.134	2168.244	0.484
20	78.0	186.7	1.97	17.0	17.0	162.4	253.722	2421.966	0.424
21	81.0	183.5	2.04	15.2	15.2	177.6	226.426	2648.392	0.370
22	84.0	183.1	2.12	15.0	15.0	192.5	223.014	2871.406	0.317
23	87.0	182.9	2.19	14.8	14.8	207.4	221.308	3092.714	0.264
24	90.0	179.0	2.27	12.6	12.6	220.0	188.040	3280.754	0.219
25	93.0	174.3	2.34	9.9	9.9	229.9	147.948	3428.702	0.184
26	96.0	174.1	2.42	9.8	9.8	239.7	146.242	3574.945	0.149
27	99.0	173.1	2.50	9.2	9.2	248.9	137.712	3712.657	0.117
28	102.0	171.8	2.57	8.5	8.5	257.4	126.623	3839.280	0.086
29	105.0	167.3	2.65	5.9	5.9	263.4	88.237	3927.517	0.065
30	108.0	166.9	2.72	5.7	5.7	269.0	84.825	4012.343	0.045
31	111.0	165.2	2.80	4.7	4.7	273.8	70.324	4082.667	0.028
32	114.0	162.1	2.87	2.9	2.9	276.7	43.881	4126.547	0.018
33	117.0	161.2	2.95	2.4	2.4	279.1	36.203	4162.751	0.009
34	120.0	158.8	3.03	1.1	1.1	280.2	15.731	4178.482	0.006
35	123.0	158.5	3.10	0.9	0.9	281.1	13.172	4191.654	0.003
36	126.0	158.2	3.18	0.7	0.7	281.8	10.613	4202.267	0.000
37	129.0	156.4	3.25	0.0	0.0	281.8	0.000	4202.267	0.000
38	132.0	155.5	3.33	0.0	0.0	281.8	0.000	4202.267	0.000

Tabla A2. 21. Cálculo de la Fracción remanente en la línea 1 de sedimentación sin efecto del floculador para el Ensayo 2

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.311	0.547	0.764
0.95	1.342	0.570	0.772
0.9	1.374	0.594	0.780
0.85	1.409	0.619	0.789
0.8	1.445	0.646	0.799
0.75	1.484	0.675	0.809
0.7	1.525	0.705	0.820
0.65	1.570	0.738	0.831
0.6	1.618	0.774	0.844
0.55	1.670	0.812	0.857
0.5	1.727	0.855	0.872
0.45	1.790	0.901	0.889
0.4	1.861	0.954	0.907
0.35	1.941	1.013	0.928
0.3	2.034	1.081	0.952
0.25	2.143	1.162	0.981
0.2	2.277	1.261	1.016
0.15	2.450	1.389	1.061
0.1	2.693	1.569	1.124
0.05	3.109	1.876	1.233
0.01	4.075	2.590	1.485

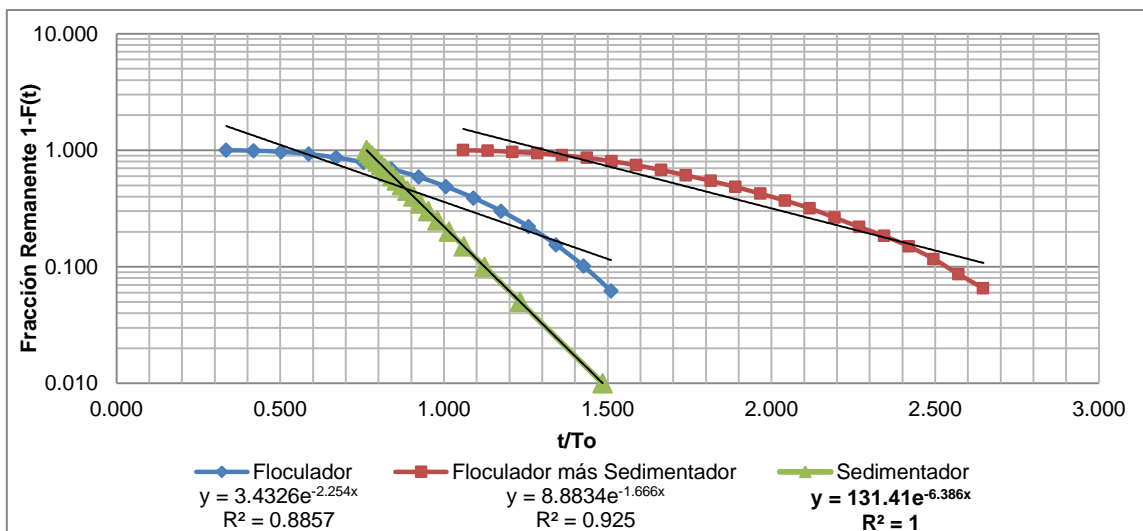


Figura A2. 6. Curva  $t/T_o$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 2

Tabla A2. 22. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0	0	0
4	30.0	0.0	0	0	0	0
5	33.0	0.0	0	0	0	0
6	36.0	0.0	0	0	0	0
7	39.0	0.0	0	0	0	0
8	42.0	0.0	0	4.585	185.699	1.085
9	45.0	3.1	45.587	13.718	596.716	3.245
10	48.0	6.1	136.383	20.324	945.067	5.893
11	51.0	7.5	247.652	26.930	1333.056	9.617
12	54.0	10.5	404.130	34.137	1792.214	13.970
13	57.0	12.3	587.052	41.859	2323.184	19.520
14	60.0	15.6	820.302	49.667	2905.504	25.721
15	63.0	17.5	1080.849	54.386	3344.715	32.388
16	66.0	18.8	1361.014	56.531	3646.220	39.095
17	69.0	18.9	1642.886	55.329	3734.733	45.478
18	72.0	18.0	1911.110	52.841	3725.308	51.597
19	75.0	17.2	2168.244	51.383	3776.628	57.635
20	78.0	17.0	2421.966	48.294	3694.490	63.023
21	81.0	15.2	2648.392	45.205	3593.819	68.330
22	84.0	15.0	2871.406	44.690	3686.965	73.596
23	87.0	14.8	3092.714	41.173	3520.274	78.071
24	90.0	12.6	3280.754	33.794	2990.788	81.592
25	93.0	9.9	3428.702	29.590	2707.498	85.072
26	96.0	9.8	3574.945	28.561	2698.974	88.349
27	99.0	9.2	3712.657	26.587	2592.255	91.362
28	102.0	8.5	3839.280	21.611	2171.903	93.462
29	105.0	5.9	3927.517	17.407	1801.614	95.480
30	108.0	5.7	4012.343	15.605	1661.949	97.154
31	111.0	4.7	4082.667	11.487	1257.813	98.198
32	114.0	2.9	4126.547	8.055	906.185	99.060

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
33	117.0	2.4	4162.751	5.224	603.332	99.434
34	120.0	1.1	4178.482	2.907	344.494	99.747
35	123.0	0.9	4191.654	2.392	290.670	100
36	126.0	0.7	4202.267	1.067	132.901	100
37	129.0	0.0	4202.267	0	0	100
38	132.0	0.0	4202.267	0	0	0
Total				845.340	62964.964	

Tabla A2.23. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 2

Flujo a Pistón	0.7639	76.391
Zonas Muertas	0.0796	7.960
Zonas Mezcladas	0.1565	15.649
Tiempo medio de retención	39.7 minutos	
Índice de Morril	2.09	

- Línea 2 de Floculación**

Volumen: 177.878 m<sup>3</sup>

Caudal: 72.9 L/s= 4.37 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico  $t_0$ : 40.69 minutos

Tabla A2.24. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-C_i)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	147.6	0.00	0	0	0	0	0	1.000
2	3.0	147.7	0.07	0	0	0	0	0	1.000
3	6.0	152.4	0.15	0	0	0	0	0	1.000
4	9.0	153.7	0.22	0	0	0	0	0	1.000
5	12.0	157.6	0.29	0.4	0.4	0.4	4.833	4.833	0.999
6	15.0	164.3	0.37	4.2	4.2	4.6	55.098	59.930	0.987
7	18.0	171.5	0.44	8.3	8.3	12.9	109.114	169.044	0.963
8	21.0	186.5	0.52	16.9	16.9	29.8	221.647	390.691	0.915
9	24.0	197.9	0.59	23.4	23.4	53.2	307.172	697.864	0.848
10	27.0	209.0	0.66	29.8	29.8	83.0	390.447	1088.311	0.763
11	30.0	218.0	0.74	34.9	34.9	117.9	457.967	1546.278	0.663
12	33.0	220.0	0.81	36.1	36.1	154.0	472.972	2019.250	0.560
13	36.0	220.0	0.88	36.1	36.1	190.0	472.972	2492.222	0.457
14	39.0	215.0	0.96	33.2	33.2	223.2	435.461	2927.682	0.362
15	42.0	209.0	1.03	29.8	29.8	253.0	390.447	3318.129	0.277
16	45.0	205.0	1.11	27.5	27.5	280.5	360.438	3678.568	0.198
17	48.0	195.4	1.18	22.0	22.0	302.4	288.417	3966.985	0.136
18	51.0	187.7	1.25	17.6	17.6	320.0	230.650	4197.634	0.085
19	54.0	177.3	1.33	11.6	11.6	331.7	152.627	4350.261	0.052
20	57.0	171.4	1.40	8.3	8.3	339.9	108.364	4458.625	0.028
21	60.0	165.3	1.47	4.8	4.8	344.7	62.600	4521.225	0.015
22	63.0	163.6	1.55	3.8	3.8	348.5	49.846	4571.071	0.004
23	66.0	159.4	1.62	1.4	1.4	349.9	18.337	4589.407	0

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
24	69.0	156.0	1.70	0	0	349.9	0	4589.407	0
25	72.0	154.0	1.77	0	0	349.9	0	4589.407	0

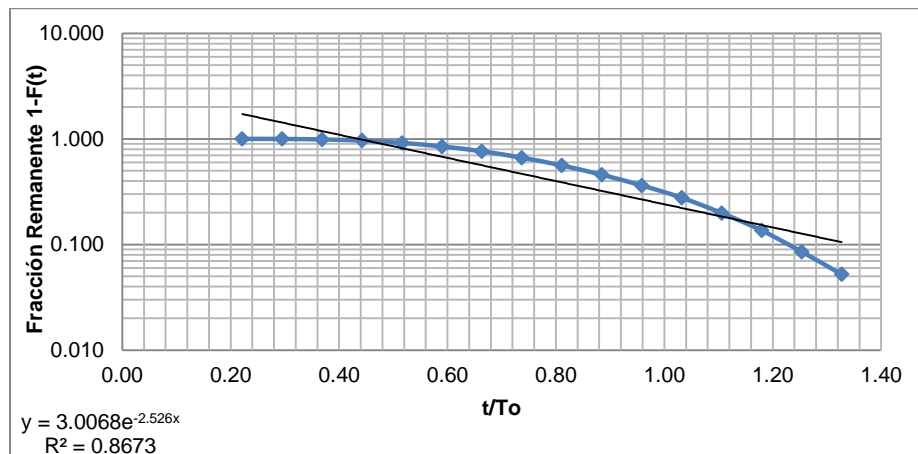


Figura A2.7. Curva t/T<sub>0</sub> Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Floculación en el Ensayo 2

Tabla A2.25. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	ΣMi (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.0	0	0	0	0
3	6.0	0.0	0	0	0	0
4	9.0	0.0	0	0.553	4.145	0
5	12.0	0.4	4.833	6.854	71.965	0.105
6	15.0	4.2	59.930	18.780	253.525	1.306
7	18.0	8.3	169.044	37.827	624.140	3.683
8	21.0	16.9	390.691	60.477	1179.306	8.513
9	24.0	23.4	697.864	79.782	1795.087	15.206
10	27.0	29.8	1088.311	97.027	2474.187	23.714
11	30.0	34.9	1546.278	106.465	3034.243	33.692
12	33.0	36.1	2019.250	108.181	3407.689	43.998
13	36.0	36.1	2492.222	103.891	3584.230	54.304
14	39.0	33.2	2927.682	94.453	3541.988	63.792
15	42.0	29.8	3318.129	85.873	3477.868	72.300
16	45.0	27.5	3678.568	74.205	3227.910	80.153
17	48.0	22.0	3966.985	59.362	2760.326	86.438
18	51.0	17.6	4197.634	43.833	2169.710	91.464
19	54.0	11.6	4350.261	29.848	1566.995	94.789
20	57.0	8.3	4458.625	19.552	1085.127	97.150
21	60.0	4.8	4521.225	12.860	752.288	98.514
22	63.0	3.8	4571.071	7.798	479.551	99.600
23	66.0	1.4	4589.407	2.097	135.259	100
24	69.0	0.0	4589.407	0	0	100
25	72.0	0.0	4589.407	0	0	100
<b>Total</b>				1049.714	35625.541	

Tabla A2.26. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 2

Flujo a Pistón	0.4358	43.582%
Zonas Muertas	0.1686	16.857%
Zonas Mezcladas	0.3956	39.561%
Tiempo medio de retención	33.9 minutos	
Índice de Morril	2.93	

• **Línea 2 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 72.9 L/s= 4.37 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 45.1 minutos

Tabla A2.27. Cálculo de Fracciones Remanentes en la Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 2

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	∑(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	∑Mi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	149.2	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	149.0	0.53	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	149.5	0.60	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	30.0	149.8	0.67	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	33.0	149.9	0.73	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
6	36.0	150.4	0.80	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
7	39.0	152.1	0.86	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
8	42.0	153.3	0.93	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
9	45.0	155.5	1.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
10	48.0	160.1	1.06	1.8	1.8	1.8	23.588	23.588	0.994
11	51.0	165.4	1.13	4.8	4.8	6.6	63.350	86.938	0.976
12	54.0	170.1	1.20	7.5	7.5	14.1	98.611	185.549	0.949
13	57.0	175.7	1.26	10.7	10.7	24.9	140.623	326.172	0.911
14	60.0	180.4	1.33	13.4	13.4	38.3	175.884	502.056	0.863
15	63.0	182.9	1.40	14.8	14.8	53.1	194.639	696.695	0.810
16	66.0	184.8	1.46	15.9	15.9	69.0	208.893	905.588	0.754
17	69.0	188.7	1.53	18.2	18.2	87.2	238.152	1143.740	0.689
18	72.0	189.0	1.60	18.3	18.3	105.5	240.403	1384.143	0.623
19	75.0	188.9	1.66	18.3	18.3	123.8	239.652	1623.795	0.558
20	78.0	188.9	1.73	18.3	18.3	142.1	239.652	1863.448	0.493
21	81.0	188.9	1.80	18.3	18.3	160.3	239.652	2103.100	0.428
22	84.0	188.5	1.86	18.0	18.0	178.4	236.652	2339.752	0.363
23	87.0	186.4	1.93	16.8	16.8	195.2	220.897	2560.649	0.303
24	90.0	180.9	2.00	13.7	13.7	208.9	179.635	2740.283	0.254
25	93.0	177.7	2.06	11.9	11.9	220.8	155.628	2895.911	0.212
26	96.0	177.5	2.13	11.8	11.8	232.5	154.127	3050.038	0.170
27	99.0	172.6	2.20	8.9	8.9	241.5	117.366	3167.404	0.138
28	102.0	170.9	2.26	8.0	8.0	249.5	104.612	3272.017	0.109
29	105.0	170.6	2.33	7.8	7.8	257.3	102.362	3374.378	0.082
30	108.0	167.7	2.39	6.1	6.1	263.4	80.605	3454.984	0.060
31	111.0	165.2	2.46	4.7	4.7	268.1	61.850	3516.833	0.043
32	114.0	164.8	2.53	4.5	4.5	272.6	58.849	3575.682	0.027
33	117.0	162.9	2.59	3.4	3.4	276.0	44.595	3620.277	0.015
34	120.0	160.8	2.66	2.2	2.2	278.2	28.840	3649.116	0.007

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
35	123.0	158.3	2.73	0.8	0.8	279.0	10.084	3659.201	0.004
36	126.0	158.0	2.79	0.6	0.6	279.6	7.834	3667.035	0.002
37	129.0	157.9	2.86	0.5	0.5	280.1	7.083	3674.118	0.000
38	132.0	156.9	2.93	0.0	0.0	280.1	0.000	3674.118	0.000
39	135.0	156.0	2.99	0.0	0.0	280.1	0.000	3674.118	0.000

Tabla A2. 28. Cálculo de Fracciones remanentes en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 2

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.228	0.436	0.793
0.95	1.255	0.456	0.798
0.9	1.282	0.478	0.805
0.85	1.311	0.500	0.811
0.8	1.342	0.524	0.818
0.75	1.375	0.550	0.825
0.7	1.410	0.577	0.833
0.65	1.448	0.606	0.841
0.6	1.489	0.638	0.851
0.55	1.533	0.672	0.860
0.5	1.581	0.710	0.871
0.45	1.635	0.752	0.883
0.4	1.695	0.799	0.896
0.35	1.763	0.851	0.912
0.3	1.841	0.912	0.929
0.25	1.934	0.985	0.950
0.2	2.048	1.073	0.975
0.15	2.194	1.187	1.008
0.1	2.401	1.347	1.053
0.05	2.754	1.622	1.132
0.01	3.573	2.259	1.314

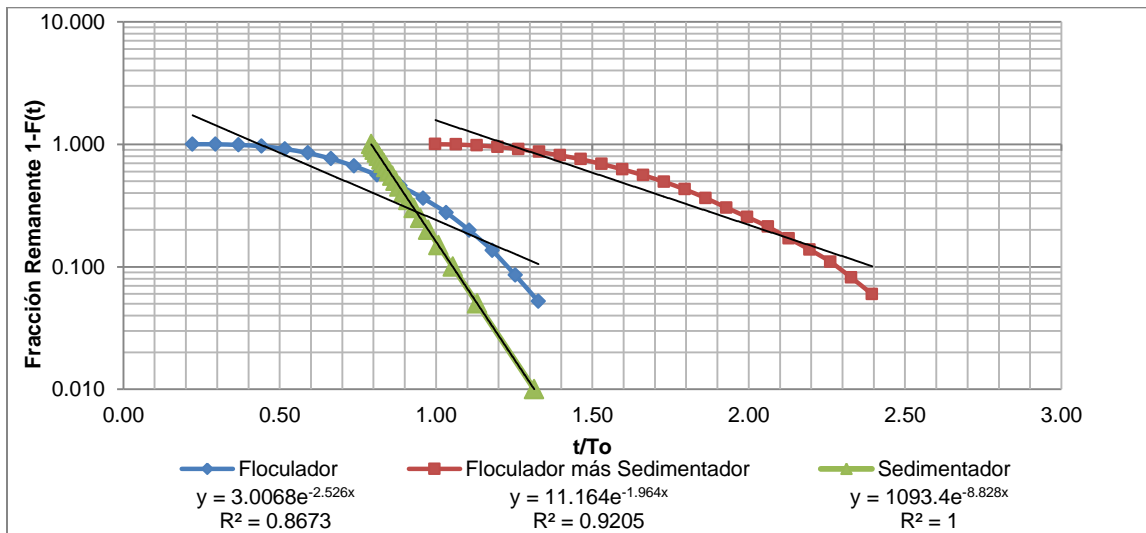


Figura A2.8. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 2

Tabla A2. 29. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 2

Muestra	Tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	$(Xi \cdot Ai)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0	0	0
4	30.0	0.0	0	0	0	0
5	33.0	0.0	0	0	0	0
6	36.0	0.0	0	0	0	0
7	39.0	0.0	0	0	0	0
8	42.0	0.0	0	0	0	0
9	45.0	0.0	0	2.698	117.347	0
10	48.0	1.8	23.588	9.943	462.327	0.642
11	51.0	4.8	86.938	18.522	916.852	2.366
12	54.0	7.5	185.549	27.359	1436.369	5.050
13	57.0	10.7	326.172	36.197	2008.908	8.878
14	60.0	13.4	502.056	42.374	2478.877	13.665
15	63.0	14.8	696.695	46.149	2838.166	18.962
16	66.0	15.9	905.588	51.125	3297.582	24.648
17	69.0	18.2	1143.740	54.729	3694.194	31.130
18	72.0	18.3	1384.143	54.900	3870.477	37.673
19	75.0	18.3	1623.795	54.815	4028.872	44.196
20	78.0	18.3	1863.448	54.815	4193.316	50.718
21	81.0	18.3	2103.100	54.471	4330.476	57.241
22	84.0	18.0	2339.752	52.326	4316.933	63.682
23	87.0	16.8	2560.649	45.806	3916.401	69.694
24	90.0	13.7	2740.283	38.341	3393.221	74.583
25	93.0	11.9	2895.911	35.424	3241.329	78.819
26	96.0	11.8	3050.038	31.049	2934.102	83.014
27	99.0	8.9	3167.404	25.386	2475.141	86.209
28	102.0	8.0	3272.017	23.670	2378.846	89.056
29	105.0	7.8	3374.378	20.925	2165.695	91.842
30	108.0	6.1	3454.984	16.292	1735.048	94.036
31	111.0	4.7	3516.833	13.803	1511.473	95.719
32	114.0	4.5	3575.682	11.830	1330.882	97.321
33	117.0	3.4	3620.277	8.398	969.988	98.535
34	120.0	2.2	3649.116	4.451	527.500	99.320
35	123.0	0.8	3659.201	2.049	248.972	99.594
36	126.0	0.6	3667.035	1.706	212.392	99.807
37	129.0	0.5	3674.118	0.810	103.285	100
38	132.0	0.0	3674.118	0	0	100
39	135.0	0.0	3674.118	0	0	100
Total				840.364	65134.973	

Tabla A2.30. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 2

Flujo a Pistón	0.7926	79.260
Zonas Muertas	0.0942	9.420
Zonas Mezcladas	0.1132	11.320
Tiempo medio de retención	43.6 minutos	
Índice de Morril	2.00	

### ENSAYO Nº 3

Tabla A2.31. Caudal estudiado durante el Ensayo 3

Caudal de operación de la Planta	175 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	93.6 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	81.7L/s

- **Línea 1 de floculación**

Volumen: 178.273 m<sup>3</sup>

Caudal: 93.6 L/s= 5.61621 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 31.7 minutos

Tabla A2.32. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	171.8	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	172.4	0.09	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	6.0	174.0	0.19	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	9.0	185.7	0.28	5.4	5.4	5.4	91.003	91.003	0.981
5	12.0	188.7	0.38	7.0	7.0	12.4	117.372	208.375	0.956
6	15.0	196.3	0.47	10.9	10.9	23.3	184.173	392.548	0.917
7	18.0	206.0	0.57	16.0	16.0	39.3	269.432	661.980	0.861
8	21.0	218.0	0.66	22.3	22.3	61.5	374.907	1036.887	0.782
9	24.0	228.0	0.76	27.5	27.5	89.0	462.803	1499.689	0.684
10	27.0	237.0	0.85	32.2	32.2	121.2	541.909	2041.598	0.570
11	30.0	239.0	0.95	33.2	33.2	154.4	559.488	2601.086	0.452
12	33.0	236.0	1.04	31.6	31.6	186.0	533.119	3134.205	0.340
13	36.0	230.0	1.13	28.5	28.5	214.5	480.382	3614.587	0.238
14	39.0	210.0	1.23	18.1	18.1	232.6	304.590	3919.177	0.174
15	42.0	210.0	1.32	18.1	18.1	250.7	304.590	4223.767	0.110
16	45.0	200.0	1.42	12.9	12.9	263.6	216.694	4440.461	0.064
17	48.0	192.7	1.51	9.1	9.1	272.6	152.530	4592.992	0.032
18	51.0	185.9	1.61	5.5	5.5	278.1	92.761	4685.753	0.013
19	54.0	180.3	1.70	2.6	2.6	280.7	43.540	4729.292	0.003
20	57.0	177.2	1.80	1.0	1.0	281.7	16.292	4745.584	0.000
21	60.0	172.2	1.89	0.0	0.0	281.7	0.000	4745.584	0.000
22	63.0	169.2	1.98	0.0	0.0	281.7	0.000	4745.584	0.000



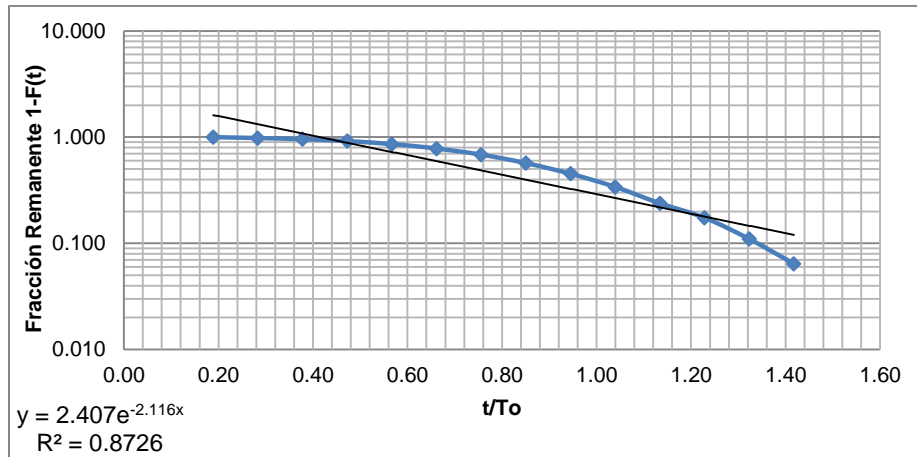


Figura A2.9. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 3

Tabla A2. 33. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.0	0	0	0	0
3	6.0	0.0	0	8.102	36.458	0
4	9.0	5.4	91.003	18.551	139.134	1.918
5	12.0	7.0	208.375	26.846	281.882	4.391
6	15.0	10.9	392.548	40.384	545.177	8.272
7	18.0	16.0	661.980	57.364	946.509	13.949
8	21.0	22.3	1036.887	74.580	1454.302	21.850
9	24.0	27.5	1499.689	89.447	2012.568	31.602
10	27.0	32.2	2041.598	98.055	2500.406	43.021
11	30.0	33.2	2601.086	97.273	2772.270	54.811
12	33.0	31.6	3134.205	90.230	2842.244	66.045
13	36.0	28.5	3614.587	69.884	2411.014	76.167
14	39.0	18.1	3919.177	54.234	2033.779	82.586
15	42.0	18.1	4223.767	46.409	1879.561	89.004
16	45.0	12.9	4440.461	32.871	1429.903	93.570
17	48.0	9.1	4592.992	21.838	1015.458	96.785
18	51.0	5.5	4685.753	12.135	600.662	98.739
19	54.0	2.6	4729.292	5.327	279.650	99.657
20	57.0	1.0	4745.584	1.450	80.499	100
21	60.0	0.0	4745.584	0	0	100
22	63.0	0.0	4745.584	0	0	100
<b>Total</b>				844.980	23261.478	

Tabla A2.34. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 3

Flujo a Pistón	0.4151	41.511%
Zonas Muertas	0.1126	11.262%
Zonas Mezcladas	0.4723	47.227%
Tiempo medio de retención	27.5 minutos	
Índice de Morril	3.39	

- **Línea 1 de Sedimentación**

Tabla A2.35. Cálculo de Fracciones Remanentes en Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	170.5	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	173.9	0.68	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	173.9	0.77	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	30.0	175.4	0.85	0.0	0.0	0.0	0.471	0.471	1.000
5	33.0	177.2	0.94	1.0	1.0	1.0	16.292	16.762	0.996
6	36.0	181.0	1.03	2.9	2.9	3.9	49.692	66.455	0.982
7	39.0	183.3	1.11	4.1	4.1	8.1	69.908	136.363	0.963
8	42.0	188.0	1.20	6.6	6.6	14.7	111.219	247.582	0.934
9	45.0	195.3	1.28	10.4	10.4	25.1	175.383	422.966	0.887
10	48.0	202	1.37	13.9	13.9	39.0	234.273	657.239	0.824
11	51.0	206	1.45	16.0	16.0	55.0	269.432	926.671	0.752
12	54.0	207	1.54	16.5	16.5	71.5	278.221	1204.892	0.677
13	57.0	217	1.62	21.7	21.7	93.2	366.117	1571.009	0.579
14	60.0	217	1.71	21.7	21.7	115.0	366.117	1937.126	0.481
15	63.0	212	1.79	19.1	19.1	134.1	322.169	2259.296	0.394
16	66.0	207	1.88	16.5	16.5	150.6	278.221	2537.517	0.320
17	69.0	207	1.97	16.5	16.5	167.1	278.221	2815.738	0.245
18	72.0	201	2.05	13.4	13.4	180.5	225.484	3041.222	0.185
19	75.0	194.7	2.14	10.1	10.1	190.6	170.110	3211.332	0.139
20	78.0	190.7	2.22	8.0	8.0	198.6	134.951	3346.283	0.103
21	81.0	197.1	2.31	11.3	11.3	210.0	191.204	3537.487	0.052
22	84.0	185.3	2.39	5.2	5.2	215.1	87.487	3624.975	0.028
23	87.0	181.6	2.48	3.3	3.3	218.4	54.966	3679.941	0.014
24	90.0	179.2	2.56	2.0	2.0	220.4	33.871	3713.812	0.004
25	93.0	176.3	2.65	0.5	0.5	220.9	8.381	3722.193	0.002
26	96.0	176.3	2.73	0.5	0.5	221.4	8.381	3730.574	0.000
27	99.0	174.9	2.82	0.0	0.0	221.4	0.000	3730.574	0.000
28	102.0	174.1	2.91	0.0	0.0	221.4	0.000	3730.574	0.000

Tabla A2. 36. Fracción remanente en la línea 1 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 3

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.135	0.415	0.720
0.95	1.163	0.439	0.723
0.9	1.192	0.465	0.727
0.85	1.223	0.492	0.731
0.8	1.256	0.521	0.736
0.75	1.291	0.551	0.740
0.7	1.329	0.584	0.745
0.65	1.369	0.619	0.750
0.6	1.413	0.657	0.756
0.55	1.460	0.698	0.762
0.5	1.512	0.743	0.769
0.45	1.569	0.792	0.777
0.4	1.633	0.848	0.785
0.35	1.706	0.911	0.794

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
0.3	1.789	0.984	0.805
0.25	1.889	1.070	0.818
0.2	2.010	1.176	0.834
0.15	2.166	1.312	0.855
0.1	2.387	1.503	0.884
0.05	2.764	1.831	0.933
0.01	3.639	2.591	1.047

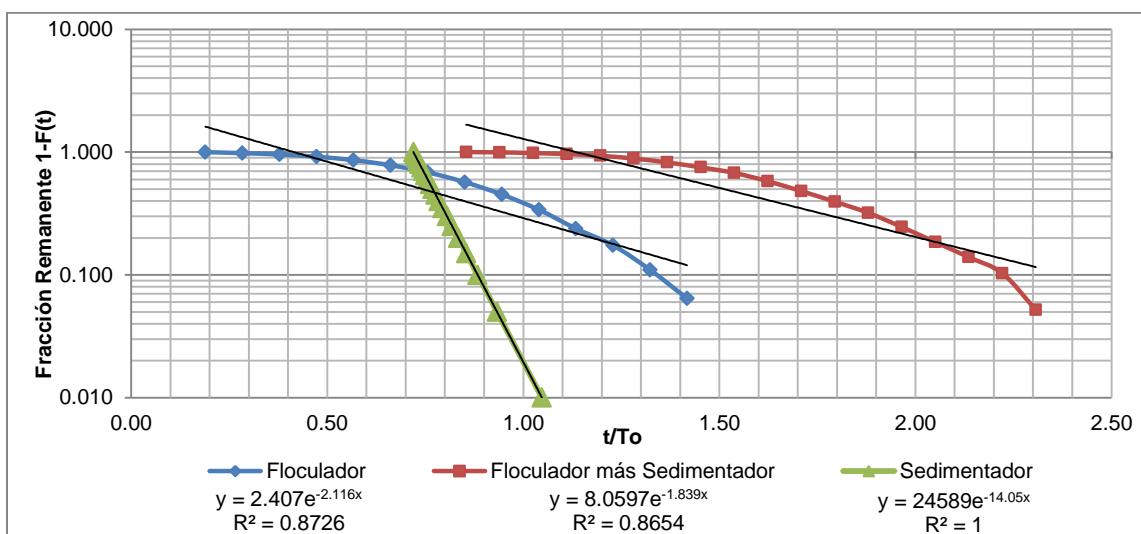


Figura A2.10. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 3

Tabla A2.37 Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0.042	1.068	0
4	30.0	0.0	0.471	1.492	42.531	0.013
5	33.0	1.0	16.762	5.874	185.045	0.449
6	36.0	2.9	66.455	10.648	367.349	1.781
7	39.0	4.1	136.363	16.125	604.704	3.655
8	42.0	6.6	247.582	25.516	1033.384	6.637
9	45.0	10.4	422.966	36.471	1586.485	11.338
10	48.0	13.9	657.239	44.844	2085.240	17.618
11	51.0	16.0	926.671	48.756	2413.445	24.840
12	54.0	16.5	1204.892	57.364	3011.619	32.298
13	57.0	21.7	1571.009	65.189	3618.010	42.112
14	60.0	21.7	1937.126	61.277	3584.691	51.926
15	63.0	19.1	2259.296	53.452	3287.272	60.562
16	66.0	16.5	2537.517	49.539	3195.265	68.019
17	69.0	16.5	2815.738	44.844	3026.961	75.477
18	72.0	13.4	3041.222	35.219	2482.932	81.522
19	75.0	10.1	3211.332	27.159	1996.182	86.081
20	78.0	8.0	3346.283	29.037	2221.330	89.699
21	81.0	11.3	3537.487	24.811	1972.505	94.824
22	84.0	5.2	3624.975	12.682	1046.294	97.169

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
23	87.0	3.3	3679.941	7.909	676.218	98.643
24	90.0	2.0	3713.812	3.762	332.904	99.551
25	93.0	0.5	3722.193	1.492	136.548	99.775
26	96.0	0.5	3730.574	0.746	70.512	100
27	99.0	0.0	3730.574	0	0	100
28	102.0	0.0	3730.574	0	0	100
Total				664.251	38978.494	

Tabla A2.38. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el ensayo 3

Flujo a Pistón	0.7196	71.95%
Zonas Muertas	0.2093	20.93%
Zonas Mezcladas	0.0711	7.11%
Tiempo medio de retención	31.2 minutos	
Índice de Morril	2.06	

- Línea 2 de Floculación**

Volumen: 178.511 m<sup>3</sup>

Caudal: 81.7 L/s= 4.90 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 36.4 minutos

Tabla A2. 39. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	171.5	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	174.7	0.08	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	6.0	179.8	0.16	2.3	2.3	2.3	34.185	34.185	0.992
4	9.0	182.7	0.25	3.8	3.8	6.2	56.446	90.631	0.978
5	12.0	188.8	0.33	7.0	7.0	13.2	103.269	193.900	0.953
6	15.0	199.3	0.41	12.5	12.5	25.7	183.867	377.766	0.908
7	18.0	208.0	0.49	17.0	17.0	42.7	250.648	628.414	0.846
8	21.0	216.0	0.58	21.2	21.2	63.9	312.055	940.469	0.770
9	24.0	232.0	0.66	29.6	29.6	93.5	434.871	1375.340	0.664
10	27.0	239.0	0.74	33.2	33.2	126.7	488.603	1863.943	0.544
11	30.0	239.0	0.82	33.2	33.2	159.9	488.603	2352.546	0.425
12	33.0	233.0	0.91	30.1	30.1	190.0	442.547	2795.092	0.317
13	36.0	228.0	0.99	27.5	27.5	217.4	404.167	3199.260	0.218
14	39.0	218.0	1.07	22.3	22.3	239.7	327.407	3526.667	0.138
15	42.0	205.0	1.15	15.5	15.5	255.2	227.620	3754.286	0.082
16	45.0	196.8	1.24	11.2	11.2	266.3	164.677	3918.963	0.042
17	48.0	188.0	1.32	6.6	6.6	272.9	97.128	4016.091	0.018
18	51.0	182.5	1.40	3.7	3.7	276.7	54.910	4071.002	0.005
19	54.0	178.0	1.48	1.4	1.4	278.1	20.368	4091.370	0.000
20	57.0	173.0	1.57	0.0	0.0	278.1	0.000	4091.370	0.000
21	60.0	170.2	1.65	0.0	0.0	278.1	0.000	4091.370	0.000

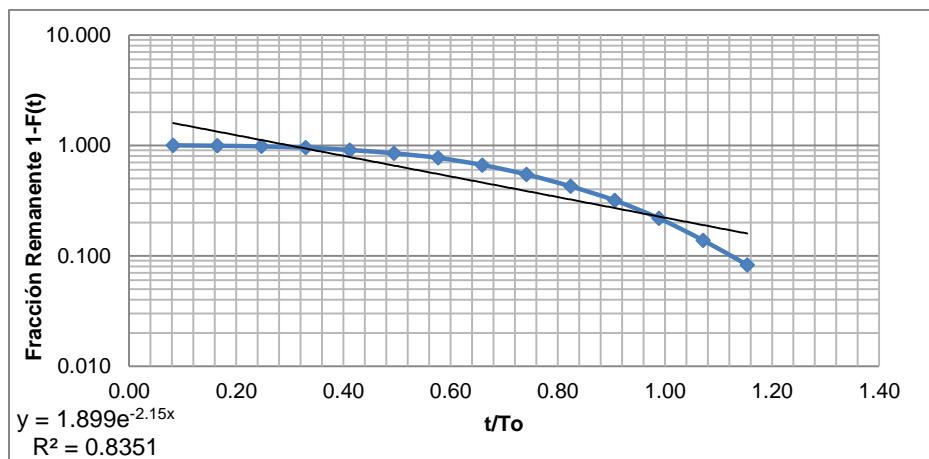


Figura A2. 11. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 3

Tabla A2. 40. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.0	0	3.485	5.227	0
3	6.0	2.3	34.185	9.239	41.577	0.836
4	9.0	3.8	90.631	16.282	122.114	2.215
5	12.0	7.0	193.900	29.272	307.353	4.739
6	15.0	12.5	377.766	44.296	597.997	9.233
7	18.0	17.0	628.414	57.364	946.509	15.360
8	21.0	21.2	940.469	76.145	1484.820	22.987
9	24.0	29.6	1375.340	94.143	2118.208	33.616
10	27.0	33.2	1863.943	99.620	2540.315	45.558
11	30.0	33.2	2352.546	94.925	2705.365	57.500
12	33.0	30.1	2795.092	86.317	2718.997	68.317
13	36.0	27.5	3199.260	74.580	2572.996	78.195
14	39.0	22.3	3526.667	56.582	2121.812	86.198
15	42.0	15.5	3754.286	39.992	1619.686	91.761
16	45.0	11.2	3918.963	26.689	1160.990	95.786
17	48.0	6.6	4016.091	15.499	720.723	98.160
18	51.0	3.7	4071.002	7.674	379.874	99.502
19	54.0	1.4	4091.370	2.076	109.013	100
20	57.0	0.0	4091.370	0	0	100
21	60.0	0.0	4091.370	0	0	100
<b>Total</b>				834.181	22273.578	

Tabla A2.41. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 3

Flujo a Pistón	0.2983	29.83%
Zonas Muertas	0.2369	23.69%
Zonas Mezcladas	0.4648	46.48%
Tiempo medio de retención	26.7 minutos	
Índice de Morril	3.55	

- Línea 2 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 4.90 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 40.2 minutos

Tabla A2.42. Cálculo de Fracciones Remanentes en la Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	169.2	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	173.0	0.60	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	173.5	0.67	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	30.0	174.8	0.75	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	33.0	176.8	0.82	0.8	0.8	0.8	11.157	11.157	0.997
6	36.0	181.5	0.90	3.2	3.2	4.0	47.234	58.392	0.984
7	39.0	183.0	0.97	4.0	4.0	8.0	58.748	117.140	0.967
8	42.0	187.8	1.04	6.5	6.5	14.5	95.593	212.733	0.940
9	45.0	195.0	1.12	10.3	10.3	24.7	150.860	363.593	0.898
10	48.0	199.4	1.19	12.5	12.5	37.3	184.634	548.227	0.846
11	51.0	204.0	1.27	14.9	14.9	52.2	219.944	768.171	0.784
12	54.0	208.0	1.34	17.0	17.0	69.2	250.648	1018.819	0.714
13	57.0	213.0	1.42	19.6	19.6	88.9	289.027	1307.846	0.632
14	60.0	217.0	1.49	21.7	21.7	110.6	319.731	1627.577	0.542
15	63.0	214.0	1.57	20.2	20.2	130.8	296.703	1924.281	0.459
16	66.0	210.0	1.64	18.1	18.1	148.9	266.000	2190.280	0.384
17	69.0	207.0	1.72	16.5	16.5	165.4	242.972	2433.252	0.316
18	72.0	206.0	1.79	16.0	16.0	181.4	235.296	2668.548	0.250
19	75.0	201.0	1.87	13.4	13.4	194.7	196.916	2865.463	0.194
20	78.0	200.0	1.94	12.9	12.9	207.6	189.240	3054.703	0.141
21	81.0	195.6	2.01	10.6	10.6	218.2	155.466	3210.169	0.097
22	84.0	191.5	2.09	8.4	8.4	226.6	123.994	3334.163	0.063
23	87.0	185.1	2.16	5.1	5.1	231.7	74.868	3409.031	0.041
24	90.0	183.2	2.24	4.1	4.1	235.8	60.284	3469.314	0.025
25	93.0	183.0	2.31	4.0	4.0	239.8	58.748	3528.063	0.008
26	96.0	178.8	2.39	1.8	1.8	241.6	26.509	3554.572	0.001
27	99.0	174.5	2.46	0.0	0.0	241.6	0.000	3554.572	0.001
28	102.0	175.6	2.54	0.1	0.1	241.7	1.946	3556.518	0.000
29	105.0	173.9	2.61	0.0	0.0	241.7	0.000	3556.518	0.000

Tabla A2.43. Fracción remanente en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 3

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.005	0.298	0.706
0.95	1.031	0.322	0.709
0.9	1.060	0.347	0.712
0.85	1.090	0.374	0.716
0.8	1.121	0.402	0.719
0.75	1.155	0.432	0.723
0.7	1.191	0.464	0.727
0.65	1.230	0.499	0.731
0.6	1.272	0.536	0.736
0.55	1.317	0.576	0.741

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
0.5	1.367	0.621	0.747
0.45	1.422	0.670	0.753
0.4	1.484	0.724	0.760
0.35	1.554	0.787	0.767
0.3	1.635	0.858	0.776
0.25	1.730	0.943	0.787
0.2	1.847	1.047	0.800
0.15	1.997	1.181	0.817
0.1	2.210	1.369	0.840
0.05	2.572	1.692	0.881
0.01	3.414	2.440	0.974

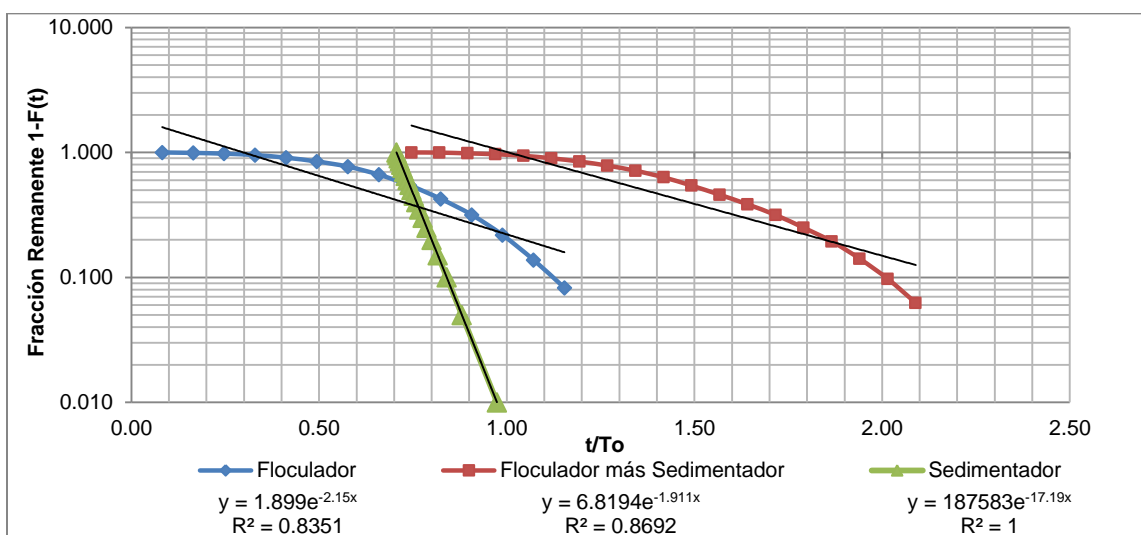


Figura A2. 12. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 3

Tabla A2. 44. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 3

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0	0	0
4	30.0	0.0	0	1.137	32.417	0
5	33.0	0.8	11.157	5.953	187.510	0.314
6	36.0	3.2	58.392	10.804	372.748	1.642
7	39.0	4.0	117.140	15.734	590.031	3.294
8	42.0	6.5	212.733	25.124	1017.538	5.981
9	45.0	10.3	363.593	34.202	1487.770	10.223
10	48.0	12.5	548.227	41.244	1917.859	15.415
11	51.0	14.9	768.171	47.974	2374.710	21.599
12	54.0	17.0	1018.819	55.017	2888.372	28.647
13	57.0	19.6	1307.846	62.059	3444.290	36.773
14	60.0	21.7	1627.577	62.842	3676.246	45.763
15	63.0	20.2	1924.281	57.364	3527.897	54.106
16	66.0	18.1	2190.280	51.887	3346.682	61.585
17	69.0	16.5	2433.252	48.756	3291.061	68.417

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
18	72.0	16.0	2668.548	44.061	3106.325	75.033
19	75.0	13.4	2865.463	39.366	2893.419	80.569
20	78.0	12.9	3054.703	35.141	2688.259	85.890
21	81.0	10.6	3210.169	28.489	2264.894	90.262
22	84.0	8.4	3334.163	20.273	1672.504	93.748
23	87.0	5.1	3409.031	13.778	1178.008	95.853
24	90.0	4.1	3469.314	12.135	1073.911	97.548
25	93.0	4.0	3528.063	8.691	795.272	99.200
26	96.0	1.8	3554.572	2.702	255.382	99.945
27	99.0	0.0	3554.572	0.198	19.344	99.945
28	102.0	0.1	3556.518	0.198	19.939	100
29	105.0	0.0	3556.518	0	0	100
Total				725.131	44122.389	

Tabla A2.45. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 3

Flujo a Pistón	0.7063	70.63
Zonas Muertas	0.2355	23.55
Zonas Mezcladas	0.0581	5.81
Tiempo medio de retención	34.1 minutos	
Índice de Morril	2.09	

## ENSAYO Nº 4

Tabla A2.46. Caudal estudiado durante el ensayo 4

Caudal de operación de la Planta	173 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	92.5 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	80.5 L/s

### • Línea 1 de floculación

Volumen: 178.144 m<sup>3</sup>

Caudal: 92.5 L/s= 5.551 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 32.1 minutos

Tabla A2.47. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	170.6	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	170.6	0.09	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	6.0	176.0	0.19	0.9	0.9	0.9	15.137	15.137	0.996
4	9.0	176.0	0.28	0.9	0.9	1.8	15.137	30.274	0.992
5	12.0	180.4	0.37	3.0	3.0	4.8	49.200	79.474	0.980
6	15.0	186.1	0.47	5.6	5.6	10.4	93.326	172.800	0.956
7	18.0	195.3	0.56	9.9	9.9	20.3	164.548	337.348	0.913
8	21.0	208.0	0.65	15.8	15.8	36.0	262.865	600.214	0.846
9	24.0	221.0	0.75	21.8	21.8	57.9	363.505	963.718	0.752



Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
10	27.0	230.0	0.84	26.0	26.0	83.9	433.178	1396.897	0.641
11	30.0	234.0	0.93	27.9	27.9	111.8	464.144	1861.041	0.521
12	33.0	233.0	1.03	27.4	27.4	139.2	456.403	2317.444	0.404
13	36.0	229.0	1.12	25.5	25.5	164.7	425.437	2742.881	0.295
14	39.0	221.0	1.22	21.8	21.8	186.6	363.505	3106.386	0.201
15	42.0	214.0	1.31	18.6	18.6	205.1	309.314	3415.701	0.121
16	45.0	204.0	1.40	13.9	13.9	219.1	231.899	3647.600	0.062
17	48.0	194.9	1.50	9.7	9.7	228.8	161.452	3809.051	0.020
18	51.0	182.6	1.59	4.0	4.0	232.7	66.231	3875.282	0.003
19	54.0	175.7	1.68	0.8	0.8	233.5	12.815	3888.097	0.000
20	57.0	170.5	1.78	0.0	0.0	233.5	0.000	3888.097	0.000
21	60.0	165.1	1.87	0.0	0.0	233.5	0.000	3888.097	0.000

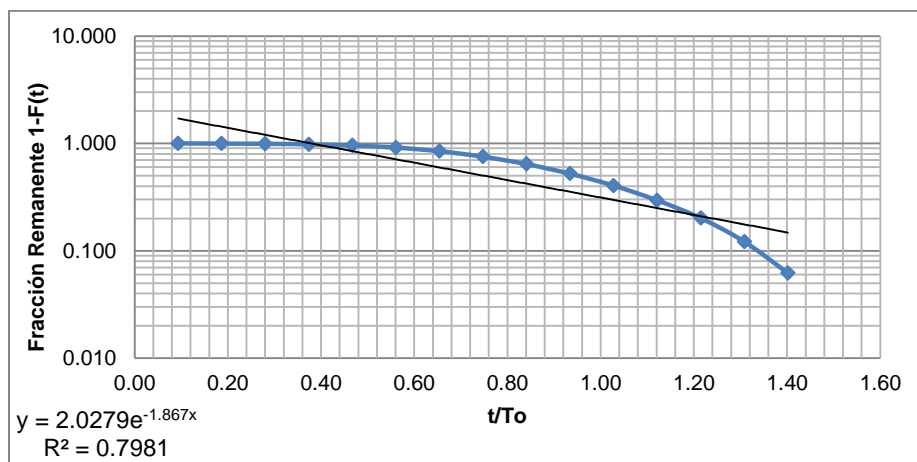


Figura A2. 13. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 4

Tabla A2.48. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	ΣMi (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.0	0	1.364	2.045	0
3	6.0	0.9	15.137	2.727	12.272	0.389
4	9.0	0.9	30.274	5.796	43.468	0.779
5	12.0	3.0	79.474	12.839	134.812	2.044
6	15.0	5.6	172.800	23.230	313.609	4.444
7	18.0	9.9	337.348	38.503	635.300	8.676
8	21.0	15.8	600.214	56.426	1100.303	15.437
9	24.0	21.8	963.718	71.768	1614.785	24.786
10	27.0	26.0	1396.897	80.834	2061.273	35.928
11	30.0	27.9	1861.041	82.926	2363.402	47.865
12	33.0	27.4	2317.444	79.439	2502.343	59.604
13	36.0	25.5	2742.881	71.071	2451.944	70.546
14	39.0	21.8	3106.386	60.610	2272.878	79.895
15	42.0	18.6	3415.701	48.755	1974.560	87.850
16	45.0	13.9	3647.600	35.435	1541.402	93.815
17	48.0	9.7	3809.051	20.511	953.738	97.967

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
18	51.0	4.0	3875.282	7.121	352.476	99.670
19	54.0	0.8	3888.097	1.154	60.605	100
20	57.0	0.0	3888.097	0	0	100
21	60.0	0.0	3888.097	0	0	100
<b>Total</b>				700.509	20391.215	

Tabla A2.49. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 4

Flujo a Pistón	0.3787	37.87%
Zonas Muertas	0.0861	8.61%
Zonas Mezcladas	0.5353	53.53%
Tiempo medio de retención	29.1 minutos	
Índice de Morril	3.17	

- Línea 1 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 5.55 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 35.5 minutos

Tabla A2.50. Cálculo de Fracciones Remanentes en la Línea 1 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	167.7	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	168.000	0.68	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	170.100	0.76	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	30.0	170.900	0.84	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	33.0	172.300	0.93	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
6	36.0	175.400	1.01	0.6	0.6	0.6	10.492	10.492	0.996
7	39.0	179.000	1.10	2.3	2.3	2.9	38.362	48.854	0.981
8	42.0	183.200	1.18	4.3	4.3	7.2	70.876	119.730	0.953
9	45.0	184.500	1.27	4.9	4.9	12.1	80.940	200.670	0.921
10	48.0	194.500	1.35	9.5	9.5	21.6	158.355	359.024	0.858
11	51.0	197.800	1.44	11.0	11.0	32.6	183.902	542.926	0.786
12	54.0	205.000	1.52	14.4	14.4	47.0	239.641	782.567	0.691
13	57.0	207.000	1.60	15.3	15.3	62.3	255.124	1037.691	0.590
14	60.0	209.000	1.69	16.3	16.3	78.6	270.607	1308.298	0.484
15	63.0	202.000	1.77	13.0	13.0	91.6	216.416	1524.714	0.398
16	66.0	198.400	1.86	11.3	11.3	102.9	188.547	1713.261	0.324
17	69.0	194.500	1.94	9.5	9.5	112.4	158.355	1871.616	0.261
18	72.0	194.300	2.03	9.4	9.4	121.8	156.807	2028.422	0.199
19	75.0	195.300	2.11	9.9	9.9	131.7	164.548	2192.971	0.135
20	78.0	188.900	2.20	6.9	6.9	138.6	115.003	2307.973	0.089
21	81.0	186.800	2.28	5.9	5.9	144.5	98.745	2406.718	0.050
22	84.0	181.000	2.36	3.2	3.2	147.8	53.845	2460.563	0.029
23	87.0	179.400	2.45	2.5	2.5	150.3	41.458	2502.021	0.013

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
24	90.0	176.600	2.53	1.2	1.2	151.4	19.782	2521.803	0.005
25	93.0	175.600	2.62	0.7	0.7	152.2	12.040	2533.844	0.000
26	96.0	172.800	2.70	0.0	0.0	152.2	0.000	2533.844	0.000
27	99.0	171.000	2.79	0.0	0.0	152.2	0.000	2533.844	0.000

Tabla A2. 51. Fracción remanente en la línea 1 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 4

1-F(t)	t/T <sub>0</sub> Floculador + Sedimentador	t/T <sub>0</sub> Floculador	t/T <sub>0</sub> Sedimentador
1	1.183	0.379	0.805
0.95	1.209	0.406	0.802
0.9	1.235	0.435	0.800
0.85	1.263	0.466	0.797
0.8	1.293	0.498	0.795
0.75	1.325	0.533	0.792
0.7	1.358	0.570	0.789
0.65	1.395	0.609	0.785
0.6	1.434	0.652	0.782
0.55	1.477	0.699	0.778
0.5	1.523	0.750	0.773
0.45	1.575	0.806	0.769
0.4	1.633	0.869	0.763
0.35	1.698	0.941	0.757
0.3	1.774	1.024	0.750
0.25	1.863	1.121	0.742
0.2	1.973	1.241	0.732
0.15	2.114	1.395	0.719
0.1	2.313	1.612	0.701
0.05	2.653	1.983	0.669
0.01	3.442	2.845	0.597

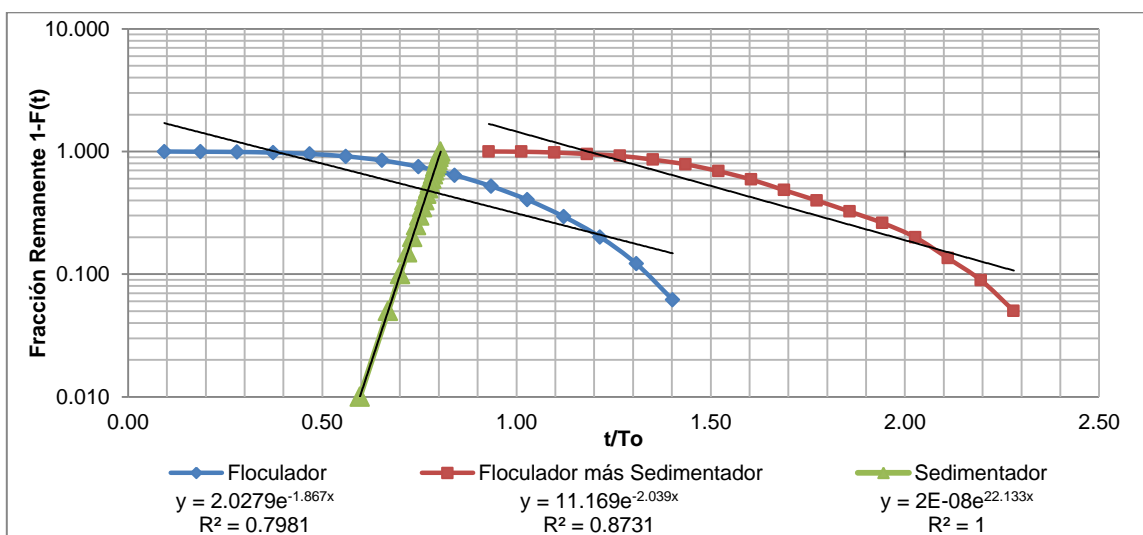


Figura A2.14. Curva t/T<sub>0</sub> Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 4

Tabla A2. 52. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	0	0	0
3	27.0	0.0	0	0	0	0
4	30.0	0.0	0	0	0	0
5	33.0	0.0	0	0.945	29.773	0
6	36.0	0.6	10.492	4.401	151.832	0.414
7	39.0	2.3	48.854	9.841	369.020	1.928
8	42.0	4.3	119.730	13.676	553.884	4.725
9	45.0	4.9	200.670	21.557	937.711	7.920
10	48.0	9.5	359.024	30.832	1433.678	14.169
11	51.0	11.0	542.926	38.154	1888.639	21.427
12	54.0	14.4	782.567	44.570	2339.938	30.885
13	57.0	15.3	1037.691	47.360	2628.468	40.953
14	60.0	16.3	1308.298	43.873	2566.563	51.633
15	63.0	13.0	1524.714	36.481	2243.557	60.174
16	66.0	11.3	1713.261	31.250	2015.639	67.615
17	69.0	9.5	1871.616	28.391	1916.389	73.865
18	72.0	9.4	2028.422	28.949	2040.894	80.053
19	75.0	9.9	2192.971	25.183	1850.949	86.547
20	78.0	6.9	2307.973	19.255	1473.024	91.086
21	81.0	5.9	2406.718	13.746	1092.797	94.983
22	84.0	3.2	2460.563	8.585	708.282	97.108
23	87.0	2.5	2502.021	5.517	471.681	98.744
24	90.0	1.2	2521.803	2.867	253.701	99.525
25	93.0	0.7	2533.844	1.085	99.245	100
26	96.0	0.0	2533.844	0	0	100
27	99.0	0.0	2533.844	0	0	100
Total				456.516	27065.662	

Tabla A2.53. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 4

Flujo a Pistón	0.8010	80.10%
Zonas Muertas	0.1539	15.39%
Zonas Mezcladas	0.0452	4.52%
Tiempo medio de retención	30.2 minutos	
Índice de Morril	1.90	

- **Línea 2 de Floculación**

Volumen: 178.251 m<sup>3</sup>

Caudal: 80.5 L/s= 4.83 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 36.9 minutos

Tabla A2.54 . Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	170.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	174.3	0.08	0.1	0.1	0.1	1.721	1.721	1.000
3	6.0	175.8	0.16	0.8	0.8	0.9	11.831	13.552	0.996
4	9.0	177.7	0.24	1.7	1.7	2.6	24.637	38.189	0.990
5	12.0	181.2	0.33	3.3	3.3	6.0	48.227	86.416	0.977
6	15.0	185.5	0.41	5.3	5.3	11.3	77.209	163.625	0.957
7	18.0	194.9	0.49	9.7	9.7	21.0	140.566	304.191	0.920
8	21.0	213.0	0.57	18.1	18.1	39.1	262.561	566.752	0.851
9	24.0	227.0	0.65	24.6	24.6	63.7	356.922	923.674	0.758
10	27.0	239.0	0.73	30.2	30.2	93.9	437.802	1361.477	0.643
11	30.0	244.0	0.81	32.5	32.5	126.4	471.503	1832.979	0.519
12	33.0	243.0	0.89	32.1	32.1	158.5	464.763	2297.742	0.398
13	36.0	240.0	0.98	30.7	30.7	189.2	444.543	2742.285	0.281
14	39.0	229.0	1.06	25.5	25.5	214.7	370.402	3112.687	0.184
15	42.0	217.0	1.14	20.0	20.0	234.7	289.521	3402.208	0.108
16	45.0	203.0	1.22	13.5	13.5	248.1	195.160	3597.368	0.057
17	48.0	192.3	1.30	8.5	8.5	256.6	123.042	3720.410	0.025
18	51.0	184.6	1.38	4.9	4.9	261.5	71.143	3791.554	0.006
19	54.0	177.4	1.46	1.6	1.6	263.1	22.615	3814.169	0.000
20	57.0	171.9	1.55	0.0	0.0	263.1	0.000	3814.169	0.000
21	60.0	170.9	1.627	0.0	0.0	263.1	0.000	3814.169	0.000

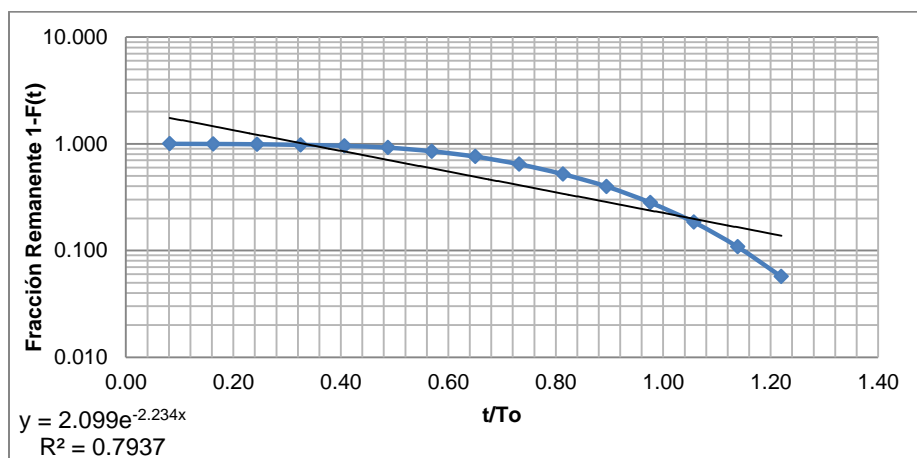


Figura A2. 15. Curva t/To Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 4

Tabla A2. 55. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	ΣMi (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.1	1.721	1.402	2.103	0.045
3	6.0	0.8	13.552	3.773	16.980	0.355
4	9.0	1.7	38.189	7.539	56.544	1.001
5	12.0	3.3	86.416	12.979	136.277	2.266
6	15.0	5.3	163.625	22.533	304.194	4.290

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
7	18.0	9.7	304.191	41.711	688.231	7.975
8	21.0	18.1	566.752	64.097	1249.892	14.859
9	24.0	24.6	923.674	82.229	1850.152	24.217
10	27.0	30.2	1361.477	94.085	2399.155	35.695
11	30.0	32.5	1832.979	96.874	2760.911	48.057
12	33.0	32.1	2297.742	94.085	2963.662	60.242
13	36.0	30.7	2742.285	84.321	2909.079	71.897
14	39.0	25.5	3112.687	68.281	2560.549	81.609
15	42.0	20.0	3402.208	50.149	2031.048	89.199
16	45.0	13.5	3597.368	32.924	1432.191	94.316
17	48.0	8.5	3720.410	20.092	934.281	97.542
18	51.0	4.9	3791.554	9.701	480.202	99.407
19	54.0	1.6	3814.169	2.340	122.847	100
20	57.0	0.0	3814.169	0	0	100
21	60.0	0.0	3814.169	0	0	100
<b>Total</b>				789.115	22898.299	

Tabla A2. 56, Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 4

Flujo a Pistón	0.3319	33.19%
Zonas Muertas	0.2208	22.08%
Zonas Mezcladas	0.4473	44.73%
Tiempo medio de retención	29 minutos	
Índice de Morril	3.15	

- Línea 2 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 4.83 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 40.8 minutos

Tabla A2.57. Cálculo de Fracciones Remanentes en Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	170.3	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	24.0	173.2	0.59	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	27.0	174.5	0.66	0.2	0.2	0.2	3.069	3.069	0.998
4	30.0	174.8	0.74	0.4	0.4	0.6	5.091	8.160	0.996
5	33.0	174.8	0.81	0.4	0.4	0.9	5.091	13.251	0.993
6	36.0	174.8	0.88	0.4	0.4	1.3	5.091	18.341	0.991
7	39.0	176.9	0.96	1.3	1.3	2.6	19.245	37.586	0.982
8	42.0	179.2	1.03	2.4	2.4	5.0	34.747	72.333	0.964
9	45.0	181.4	1.10	3.4	3.4	8.4	49.575	121.909	0.940
10	48.0	187.1	1.18	6.1	6.1	14.5	87.994	209.902	0.897
11	51.0	192.8	1.25	8.7	8.7	23.2	126.412	336.314	0.834
12	54.0	198.2	1.32	11.2	11.2	34.4	162.808	499.122	0.754
13	57.0	205.0	1.40	14.4	14.4	48.8	208.641	707.763	0.652

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
14	60.0	210.0	1.47	16.7	16.7	65.5	242.341	950.104	0.532
15	63.0	204.0	1.54	13.9	13.9	79.5	201.901	1152.004	0.433
16	66.0	203.0	1.62	11.9	11.9	91.4	172.918	1324.922	0.348
17	69.0	199.7	1.69	10.9	10.9	102.3	158.090	1483.013	0.270
18	72.0	197.5	1.76	9.9	9.9	112.2	143.936	1626.949	0.199
19	75.0	195.4	1.84	9.9	9.9	122.1	143.262	1770.211	0.129
20	78.0	195.3	1.91	7.4	7.4	129.5	106.866	1877.076	0.076
21	81.0	<b>189.9</b>	1.99	4.9	4.9	134.3	70.469	1947.546	0.042
22	84.0	184.5	2.06	2.4	2.4	136.8	35.421	1982.967	0.024
23	87.0	179.3	2.13	2.1	2.1	138.9	30.703	2013.670	0.009
24	90.0	178.6	2.21	0.7	0.7	139.6	9.809	2023.479	0.004
25	93.0	175.5	2.28	0.6	0.6	140.2	8.461	2031.940	0.000
26	96.0	175.3	2.35	0.0	0.0	140.2	0.000	2031.940	0.000
27	99.0	173.3	2.43	0.0	0.0	140.2	0.000	2031.940	0.000

Tabla A2. 58. Fracción remanente en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 4

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	0.914	0.332	0.583
0.95	0.941	0.355	0.586
0.9	0.969	0.379	0.590
0.85	0.999	0.405	0.594
0.8	1.030	0.432	0.598
0.75	1.063	0.461	0.603
0.7	1.099	0.492	0.608
0.65	1.138	0.525	0.613
0.6	1.179	0.561	0.618
0.55	1.224	0.600	0.625
0.5	1.273	0.642	0.631
0.45	1.328	0.689	0.639
0.4	1.389	0.742	0.647
0.35	1.458	0.802	0.656
0.3	1.538	0.871	0.667
0.25	1.632	0.952	0.680
0.2	1.748	1.052	0.696
0.15	1.897	1.181	0.716
0.1	2.107	1.363	0.744
0.05	2.466	1.673	0.793
0.01	3.299	2.393	0.906

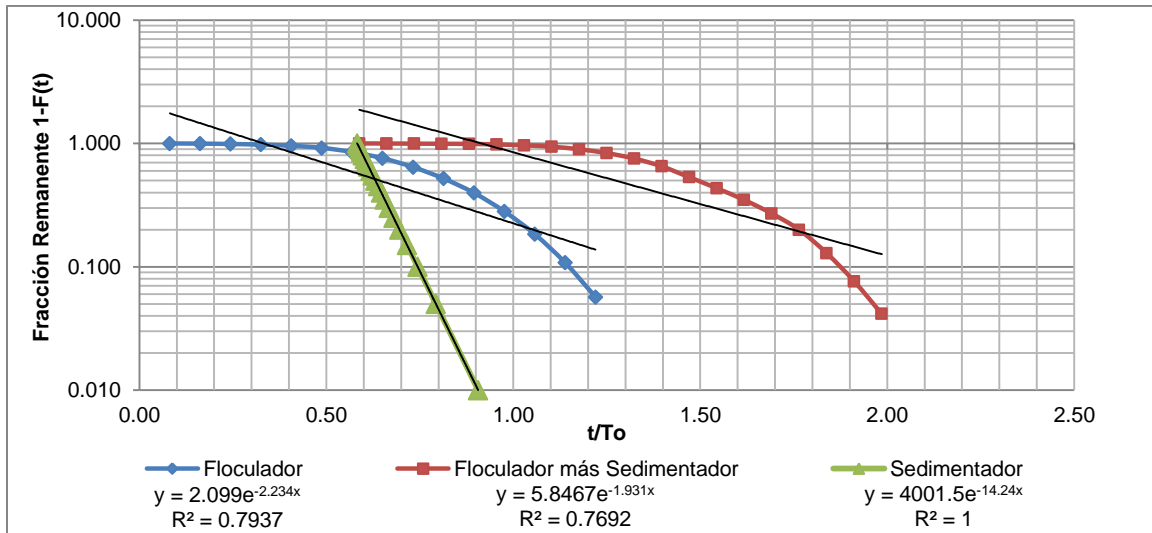


Figura A2. 16. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 4

Tabla A2. 59. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 4

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	24.0	0.0	0	2.540	30.483	0
3	27.0	0.2	3.069	0.844	21.529	0.151
4	30.0	0.4	8.160	1.053	30.024	0.402
5	33.0	0.4	13.251	1.053	33.185	0.652
6	36.0	0.4	18.341	2.518	86.871	0.903
7	39.0	1.3	37.586	5.586	209.493	1.850
8	42.0	2.4	72.333	8.725	353.351	3.560
9	45.0	3.4	121.909	14.234	619.181	6.000
10	48.0	6.1	209.902	22.184	1031.566	10.330
11	51.0	8.7	336.314	29.925	1481.297	16.551
12	54.0	11.2	499.122	38.433	2017.747	24.564
13	57.0	14.4	707.763	46.662	2589.763	34.832
14	60.0	16.7	950.104	45.965	2688.954	46.758
15	63.0	13.9	1152.004	38.782	2385.091	56.695
16	66.0	11.9	1324.922	34.249	2209.058	65.205
17	69.0	10.9	1483.013	31.250	2109.390	72.985
18	72.0	9.9	1626.949	29.716	2094.976	80.069
19	75.0	9.9	1770.211	25.880	1902.206	87.119
20	78.0	7.4	1877.076	18.349	1403.669	92.379
21	81.0	4.9	1947.546	10.956	871.029	95.847
22	84.0	2.4	1982.967	6.842	564.446	97.590
23	87.0	2.1	2013.670	4.192	358.391	99.101
24	90.0	0.7	2023.479	1.890	167.296	99.584
25	93.0	0.6	2031.940	0.875	80.102	100
26	96.0	0.0	2031.940	0	0	100
27	99.0	0.0	2031.940	0	0	100
Total				422.706	25339.097	



Tabla A2.60. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 4

Flujo a Pistón	0.5825	58.25%
Zonas Muertas	0.3473	34.73%
Zonas Mezcladas	0.0702	7.02%
Tiempo medio de retención	30.9 minutos	
Índice de Morril	1.99	

## ENSAYO Nº 5

Tabla A2.61. Caudal estudiado durante el ensayo 5

Caudal de operación de la Planta	216 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	112.1 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	103.5 L/s

### • Línea 1 de floculación

Volumen: 180.263 m<sup>3</sup>

Caudal: 112.1 L/s= 6.73 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 26.8 minutos

Tabla A2.62. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	175.9	0.00	0.1	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	183.0	0.11	3.6	3.5	3.5	71.060	71.060	0.987
3	6.0	184.9	0.22	4.6	4.5	8.0	90.077	161.137	0.970
4	9.0	188.9	0.34	6.6	6.4	14.4	130.111	291.248	0.946
5	12.0	200.0	0.45	12.1	12.0	26.4	241.205	532.453	0.901
6	15.0	216.0	0.56	20.0	19.9	46.3	401.341	933.794	0.826
7	18.0	231.0	0.67	27.5	27.3	73.6	551.469	1485.263	0.723
8	21.0	244.0	0.78	33.9	33.8	107.4	681.580	2166.843	0.595
9	24.0	246.0	0.90	34.9	34.8	142.2	701.597	2868.439	0.464
10	27.0	240.0	1.01	31.9	31.8	174.0	641.546	3509.985	0.345
11	30.0	230.0	1.12	27.0	26.8	200.8	541.460	4051.445	0.244
12	33.0	217.0	1.23	20.5	20.4	221.2	411.350	4462.795	0.167
13	36.0	207.0	1.34	15.6	15.4	236.6	311.265	4774.060	0.109
14	39.0	197.3	1.46	10.7	10.6	247.2	214.182	4988.242	0.069
15	42.0	192.5	1.57	8.4	8.2	255.5	166.141	5154.383	0.038
16	45.0	184.6	1.68	4.4	4.3	259.8	87.074	5241.457	0.021
17	48.0	182.9	1.79	3.6	3.5	263.3	70.060	5311.517	0.008
18	51.0	178.0	1.90	1.2	1.0	264.3	21.018	5332.535	0.004
19	54.0	177.9	2.01	1.1	1.0	265.3	20.017	5352.552	0.001
20	57.0	176.1	2.13	0.2	0.1	265.4	2.002	5354.553	0.000
21	60.0	176.0	2.24	0.2	0.0	265.4	1.001	5355.554	0.000
22	63.0	176.0	2.35	0.2	0.0	265.5	1.001	5356.555	0.000

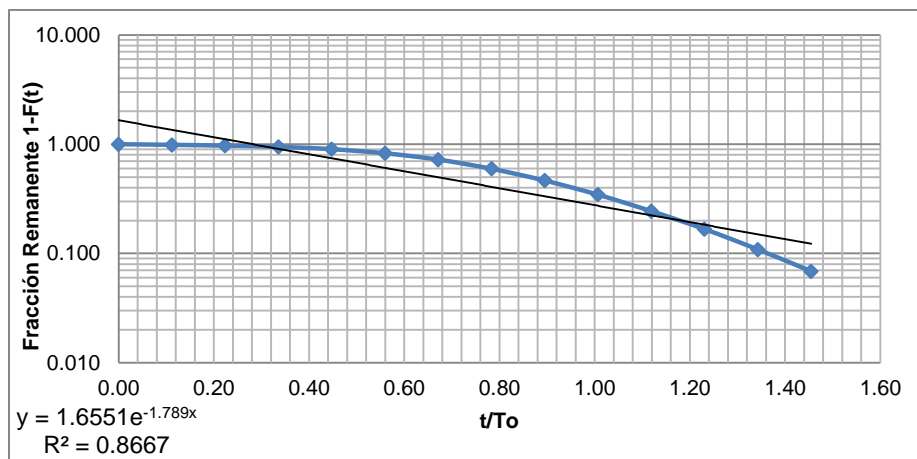


Figura A2. 17. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 5

Tabla A2.63. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	3.5	71.060	11.980	17.970	1.327
3	6.0	4.5	161.137	16.370	73.666	3.008
4	9.0	6.4	291.248	27.606	207.047	5.437
5	12.0	12.0	532.453	47.771	501.600	9.940
6	15.0	19.9	933.794	70.839	956.321	17.433
7	18.0	27.3	1485.263	91.673	1512.612	27.728
8	21.0	33.8	2166.843	102.835	2005.283	40.452
9	24.0	34.8	2868.439	99.859	2246.819	53.550
10	27.0	31.8	3509.985	87.953	2242.800	65.527
11	30.0	26.8	4051.445	70.839	2018.900	75.635
12	33.0	20.4	4462.795	53.724	1692.313	83.315
13	36.0	15.4	4774.060	39.065	1347.756	89.126
14	39.0	10.6	4988.242	28.276	1060.347	93.124
15	42.0	8.2	5154.383	18.826	762.445	96.226
16	45.0	4.3	5241.457	11.682	508.185	97.851
17	48.0	3.5	5311.517	6.771	314.867	99.159
18	51.0	1.0	5332.535	3.051	151.016	99.552
19	54.0	1.0	5352.552	1.637	85.944	99.925
20	57.0	0.1	5354.553	0.223	12.389	99.963
21	60.0	0.0	5355.554	0.149	8.706	99.981
22	63.0	0.0	5356.555	0.074	4.576	100
<b>Total</b>				791.205	17731.562	

Tabla A2.64. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 5

Flujo a Pistón	0.2816	28.16
Zonas Muertas	0.1598	15.98
Zonas Mezcladas	0.5586	55.86
Tiempo medio de retención	22.4 minutos	
Índice de Morril	5.38	

- **Línea 1 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 6.7 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 29.3 minutos

Tabla A2.65. Cálculo de Fracciones Remanentes en la Línea 1 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	176.2	0.00	0.3	0.0	0.0	0	0	1.000
2	15.0	177.0	0.51	0.7	0.4	0.4	8.007	8.007	0.998
3	21.0	177.3	0.72	0.8	0.5	0.9	22.019	30.026	0.994
4	24.0	177.900	0.82	1.1	0.8	1.8	17.014	36.031	0.992
5	27.0	178.500	0.92	1.4	1.1	2.9	23.020	59.050	0.987
6	30.0	182.000	1.02	3.1	2.9	5.8	58.049	117.100	0.975
7	33.0	185.300	1.13	4.8	4.5	10.3	91.077	208.177	0.955
8	36.0	190.000	1.23	7.1	6.8	17.2	138.117	346.294	0.926
9	39.0	194.300	1.33	9.3	9.0	26.1	181.154	527.449	0.887
10	42.0	205.000	1.43	14.6	14.3	40.4	288.245	815.694	0.825
11	45.0	211.000	1.53	17.5	17.3	57.7	348.296	1163.990	0.750
12	48.0	<b>213.000</b>	1.64	18.5	18.3	75.9	368.313	1532.303	0.670
13	51.0	212.000	1.74	18.0	17.8	93.7	358.305	1890.608	0.593
14	54.0	210.000	1.84	17.0	16.8	110.5	338.288	2228.895	0.521
15	57.0	208.000	1.94	16.0	15.8	126.2	318.271	2547.166	0.452
16	60.0	206.000	2.05	15.1	14.8	141.0	298.254	2845.420	0.388
17	63.0	200.000	2.15	12.1	11.8	152.8	238.203	3083.622	0.337
18	66.0	197.200	2.25	10.7	10.4	163.3	210.179	3293.801	0.291
19	69.0	196.800	2.35	10.5	10.2	173.5	206.175	3499.976	0.247
20	72.0	189.800	2.46	7.0	6.7	180.2	136.116	3636.092	0.218
21	75.0	190.900	2.56	7.6	7.3	187.5	147.125	3783.217	0.186
22	78.0	188.900	2.66	6.6	6.3	193.8	127.108	3910.325	0.159
23	81.0	188.200	2.76	6.2	6.0	199.8	120.102	4030.427	0.133
24	84.0	186.400	2.87	5.3	5.1	204.8	102.087	4132.514	0.111
25	87.0	185.700	2.97	5.0	4.7	209.5	95.081	4227.595	0.091
26	90.0	185.000	3.07	4.6	4.4	213.9	88.075	4315.670	0.072
27	93.0	183.300	3.17	3.8	3.5	217.4	71.060	4386.730	0.056
28	96.0	181.500	3.27	2.9	2.6	220.1	53.045	4439.775	0.045
29	99.0	180.400	3.38	2.4	2.1	222.1	42.036	4481.811	0.036
30	102.0	180.300	3.48	2.3	2.0	224.2	41.035	4522.846	0.027
31	105.0	180.500	3.58	2.4	2.1	226.3	43.037	4565.883	0.018
32	108.0	179.600	3.68	2.0	1.7	228.0	34.029	4599.912	0.011
33	111.0	178.800	3.79	1.6	1.3	229.3	26.022	4625.934	0.005
34	114.0	178.400	3.89	1.4	1.1	230.4	22.019	4647.952	0.000
35	117.0	176.300	3.99	0.3	0.0	230.4	1.001	4648.953	0.000

Tabla A2.66. Cálculo de Fracciones remanentes en la línea 1 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 5

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	0.930	0.282	0.648
0.95	0.978	0.310	0.667
0.9	1.028	0.341	0.688
0.85	1.082	0.372	0.709
0.8	1.139	0.406	0.732
0.75	1.199	0.442	0.757
0.7	1.264	0.481	0.783
0.65	1.333	0.522	0.811
0.6	1.408	0.567	0.841
0.55	1.490	0.616	0.874
0.5	1.579	0.669	0.910
0.45	1.678	0.728	0.950
0.4	1.788	0.794	0.994
0.35	1.913	0.868	1.045
0.3	2.058	0.955	1.103
0.25	2.229	1.057	1.172
0.2	2.438	1.181	1.257
0.15	2.708	1.342	1.365
0.1	3.088	1.569	1.519
0.05	3.737	1.956	1.781
0.01	5.246	2.856	2.390

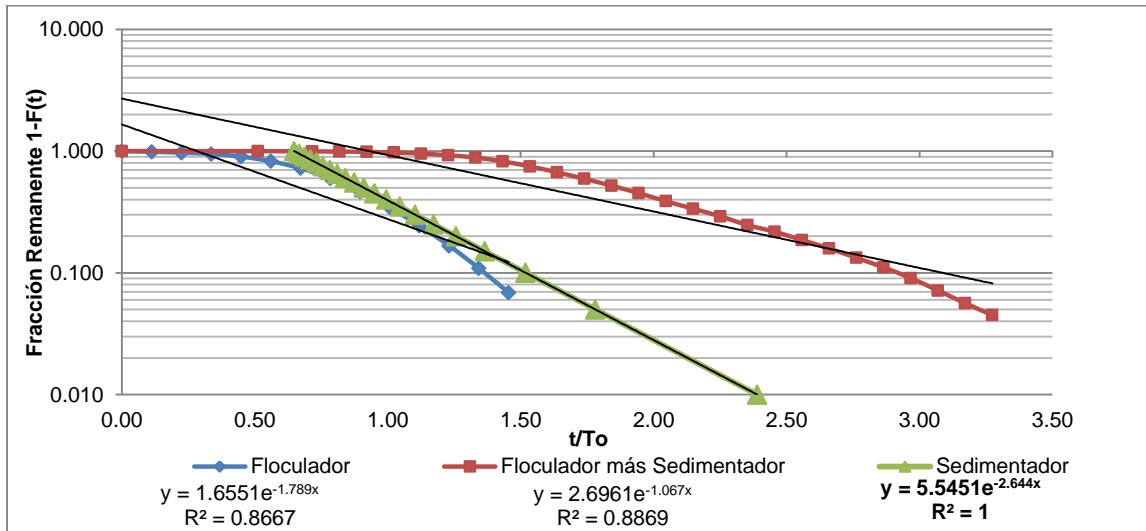


Figura A2.18. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 5

Tabla A2.67. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0.000
2	15.0	0.4	8.007	7.069	53.017	0.172
3	21.0	0.5	19.016	4.167	75.006	0.409
4	24.0	0.8	36.031	2.976	66.969	0.775
5	27.0	1.1	59.050	6.027	153.694	1.270
6	30.0	2.9	117.100	11.087	315.983	2.519
7	33.0	4.5	208.177	17.040	536.759	4.478
8	36.0	6.8	346.294	23.737	818.922	7.449
9	39.0	9.0	527.449	34.898	1308.691	11.346
10	42.0	14.3	815.694	47.325	1916.660	17.546
11	45.0	17.3	1163.990	53.278	2317.583	25.038
12	48.0	18.3	1532.303	54.022	2512.017	32.960
13	51.0	17.8	1890.608	51.790	2563.583	40.667
14	54.0	16.8	2228.895	48.813	2562.690	47.944
15	57.0	15.8	2547.166	45.837	2543.939	54.790
16	60.0	14.8	2845.420	39.884	2333.209	61.206
17	63.0	11.8	3083.622	33.336	2050.152	66.329
18	66.0	10.4	3293.801	30.955	1996.577	70.850
19	69.0	10.2	3499.976	25.448	1717.761	75.285
20	72.0	6.7	3636.092	21.058	1484.597	78.213
21	75.0	7.3	3783.217	20.388	1498.549	81.378
22	78.0	6.3	3910.325	18.379	1406.020	84.112
23	81.0	6.0	4030.427	16.519	1313.267	86.695
24	84.0	5.1	4132.514	14.659	1209.353	88.891
25	87.0	4.7	4227.595	13.617	1164.261	90.936
26	90.0	4.4	4315.670	11.831	1047.064	92.831
27	93.0	3.5	4386.730	9.227	844.259	94.360
28	96.0	2.6	4439.775	7.069	668.018	95.501
29*	99.0	2.1	4481.811	6.176	602.165	96.405
30	102.0	2.0	4522.846	6.250	628.172	97.287
31	105.0	2.1	4565.883	5.730	593.013	98.213
32	108.0	1.7	4599.912	4.465	475.482	98.945
33	111.0	1.3	4625.934	3.572	391.100	99.505
34	114.0	1.1	4647.952	1.711	192.537	99.978
35	117.0	0.0	4648.953	0.074	8.594	100
Total				698.415	39369.664	

Tabla A2. 68. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 5

Flujo a Pistón	0.6478	64.7850
Zonas Muertas	-0.0258	-2.5808
Zonas Mezcladas	0.3780	37.7958
Tiempo medio de retención	34 minutos	
Índice de Morril	3.00	

• **Línea 2 de Flocculación**

Volumen: 180.563 m<sup>3</sup>

Caudal: 103.5 L/s= 6.21 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 29.1 min

Tabla A2.69. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
1	0.0	176.2	0.00	0.3	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	178.9	0.10	1.6	1.3	1.3	24.944	24.944	0.995
3	6.0	181.9	0.21	3.1	2.8	4.2	52.660	77.605	0.984
4	9.0	185.5	0.31	4.9	4.6	8.8	85.919	163.524	0.967
5	12.0	194.9	0.41	9.5	9.3	18.1	172.762	336.286	0.932
6	15.0	213.0	0.52	18.5	18.3	36.3	339.982	676.268	0.863
7	18.0	233.0	0.62	28.4	28.2	64.5	524.754	1201.022	0.756
8	21.0	235.0	0.72	29.4	29.2	93.7	543.232	1744.254	0.646
9	24.0	<b>249.0</b>	0.83	36.4	36.1	129.8	672.572	2416.826	0.509
10	27.0	246.0	0.93	34.9	34.6	164.4	644.857	3061.683	0.378
11	30.0	234.0	1.03	28.9	28.7	193.1	533.993	3595.676	0.270
12	33.0	223.0	1.13	23.5	23.2	216.3	432.368	4028.044	0.182
13	36.0	208.0	1.24	16.0	15.8	232.1	293.789	4321.832	0.122
14	39.0	201.0	1.34	12.6	12.3	244.4	229.118	4550.950	0.076
15	42.0	194.5	1.44	9.4	9.1	253.4	169.067	4720.017	0.041
16	45.0	185.5	1.55	4.9	4.6	258.1	85.919	4805.937	0.024
17	48.0	182.0	1.65	3.1	2.9	260.9	53.584	4859.521	0.013
18	51.0	180.4	1.75	2.4	2.1	263.0	38.802	4898.323	0.005
19	54.0	178.0	1.86	1.2	0.9	263.9	16.630	4914.952	0.002
20	57.0	176.9	1.96	0.6	0.3	264.3	6.467	4921.419	0.001
21	60.0	176.5	2.06	0.4	0.1	264.4	2.772	4924.191	0.000
22	63.0	176.2	2.17	0.3	0.0	264.4	0.000	4924.191	0.000
23	66.0	175.2	2.27	0.0	0.0	264.4	0.000	4924.191	0.000

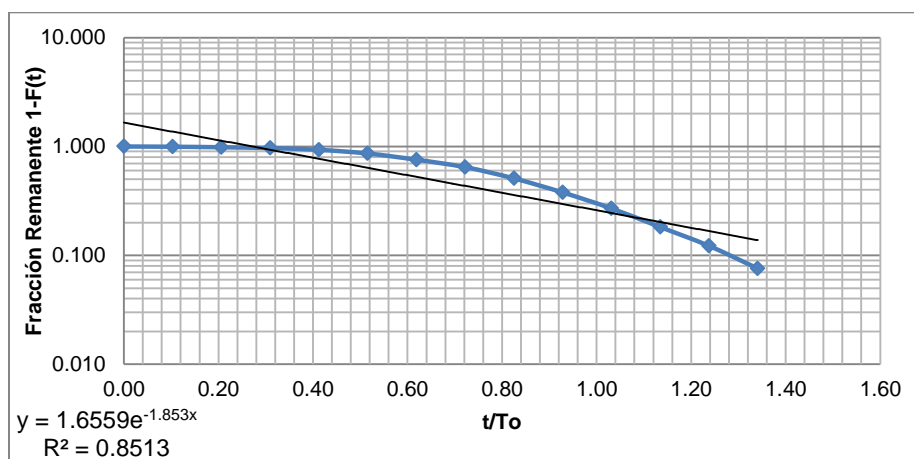


Figura A2.19. Curva t/T<sub>0</sub> Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 5

Tabla A2. 70. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	1.3	24.944	6.250	9.376	0.507
3	6.0	2.8	77.605	11.162	50.227	1.576
4	9.0	4.6	163.524	20.835	156.262	3.321
5	12.0	9.3	336.286	41.298	433.626	6.829
6	15.0	18.3	676.268	69.648	940.248	13.734
7	18.0	28.2	1201.022	86.018	1419.302	24.390
8	21.0	29.2	1744.254	97.924	1909.517	35.422
9	24.0	36.1	2416.826	106.109	2387.454	49.081
10	27.0	34.6	3061.683	94.948	2421.162	62.176
11	30.0	28.7	3595.676	77.833	2218.245	73.021
12	33.0	23.2	4028.044	58.486	1842.324	81.801
13	36.0	15.8	4321.832	42.116	1453.010	87.767
14	39.0	12.3	4550.950	32.071	1202.656	92.420
15	42.0	9.1	4720.017	20.537	831.758	95.854
16	45.0	4.6	4805.937	11.236	488.764	97.598
17	48.0	2.9	4859.521	7.441	346.008	98.687
18	51.0	2.1	4898.323	4.465	220.999	99.475
19	54.0	0.9	4914.952	1.860	97.664	99.812
20	57.0	0.3	4921.419	0.744	41.298	99.944
21	60.0	0.1	4924.191	0.223	13.059	100
22	63.0	0.0	4924.191	0	0	100
23	66.0	0.0	4924.191	0	0	100
<b>Total</b>				791.205	18482.957	

Tabla A2. 71. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 5

Flujo a Pistón	0.2722	27.22%
Zonas Muertas	0.1885	18.85%
Zonas Mezcladas	0.5393	53.93%
Tiempo medio de retención	23.4 minutos	
Índice de Morril	4.49	

- Segunda Línea de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 6.21 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 31.8 minutos

Tabla A2. 72. Cálculo de Fracciones Remanentes en Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (uS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	176.7	0.00	0.5	0.0	0.0	0	0	1.000
2	15.0	176.7	0.47	0.5	0.0	0.0	0	0	1.000
3	18.0	176.7	0.57	0.5	0.0	0.0	0	0	1.000

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
4	21.0	177.1	0.66	0.7	0.2	0.2	3.695	3.695	0.999
5	24.0	177.4	0.76	0.9	0.3	0.5	6.467	10.162	0.998
6	27.0	178.3	0.85	1.3	0.8	1.3	14.782	24.944	0.994
7	30.0	179.4	0.94	1.9	1.3	2.7	24.944	49.889	0.988
8	33.0	184.0	1.04	4.1	3.6	6.3	67.442	117.331	0.972
9	36.0	188.1	1.13	6.2	5.7	12.0	105.320	222.651	0.947
10	39.0	193.7	1.23	9.0	8.4	20.4	157.057	379.708	0.910
11	42.0	202.0	1.32	13.1	12.6	32.9	233.737	613.445	0.855
12	45.0	208.0	1.42	16.0	15.5	48.5	289.169	902.614	0.786
13	48.0	214.0	1.51	19.0	18.5	67.0	344.601	1247.215	0.705
14	51.0	<b>215.0</b>	1.61	19.5	19.0	86.0	353.840	1601.055	0.621
15	54.0	214.0	1.70	19.0	18.5	104.5	344.601	1945.656	0.539
16	57.0	211.0	1.79	17.5	17.0	121.5	316.885	2262.541	0.464
17	60.0	206.0	1.89	15.1	14.5	136.0	270.692	2533.233	0.400
18	63.0	204.0	1.98	12.6	12.1	148.1	224.499	2757.732	0.347
19	66.0	201.0	2.08	13.1	12.6	160.6	233.737	2991.469	0.292
20	69.0	202.0	2.17	8.5	8.0	168.6	148.742	3140.211	0.256
21	72.0	192.8	2.27	8.4	7.9	176.5	146.894	3287.105	0.222
22	75.0	192.6	2.36	8.0	7.4	183.9	138.579	3425.685	0.189
23	78.0	191.7	2.46	6.8	6.3	190.2	116.407	3542.092	0.161
24	81.0	189.3	2.55	5.8	5.3	195.5	97.930	3640.021	0.138
25	84.0	187.3	2.64	7.5	6.9	202.4	129.341	3769.362	0.107
26	87.0	190.7	2.74	6.5	6.0	208.4	111.787	3881.149	0.081
27	90.0	188.8	2.83	6.4	5.9	214.3	109.016	3990.165	0.055
28	93.0	188.5	2.93	4.1	3.6	217.9	67.442	4057.607	0.039
29	96.0	184.0	3.02	3.4	2.9	220.8	53.584	4111.191	0.026
30	99.0	182.5	3.12	2.9	2.3	223.1	43.422	4154.613	0.016
31	102.0	181.4	3.21	2.0	1.4	224.5	26.792	4181.405	0.010
32	105.0	179.6	3.31	1.9	1.3	225.9	24.944	4206.349	0.004
33	108.0	179.4	3.40	1.4	0.9	226.8	16.630	4222.979	0.000
34	111.0	178.5	3.49	0.0	0.0	226.8	0.000	4222.979	0.000

Tabla A2. 73. Fracción remanente en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 5

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	0.988	0.272	0.716
0.95	1.030	0.300	0.730
0.9	1.073	0.329	0.744
0.85	1.120	0.360	0.760
0.8	1.169	0.393	0.776
0.75	1.221	0.427	0.794
0.7	1.277	0.465	0.812
0.65	1.337	0.505	0.832
0.6	1.402	0.548	0.854
0.55	1.472	0.595	0.877
0.5	1.549	0.646	0.903
0.45	1.635	0.703	0.932
0.4	1.730	0.767	0.963
0.35	1.838	0.839	0.999
0.3	1.963	0.922	1.041
0.25	2.111	1.020	1.090
0.2	2.291	1.141	1.151



1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
0.15	2.524	1.296	1.228
0.1	2.853	1.515	1.338
0.05	3.414	1.889	1.525
1	0.988	0.272	0.716

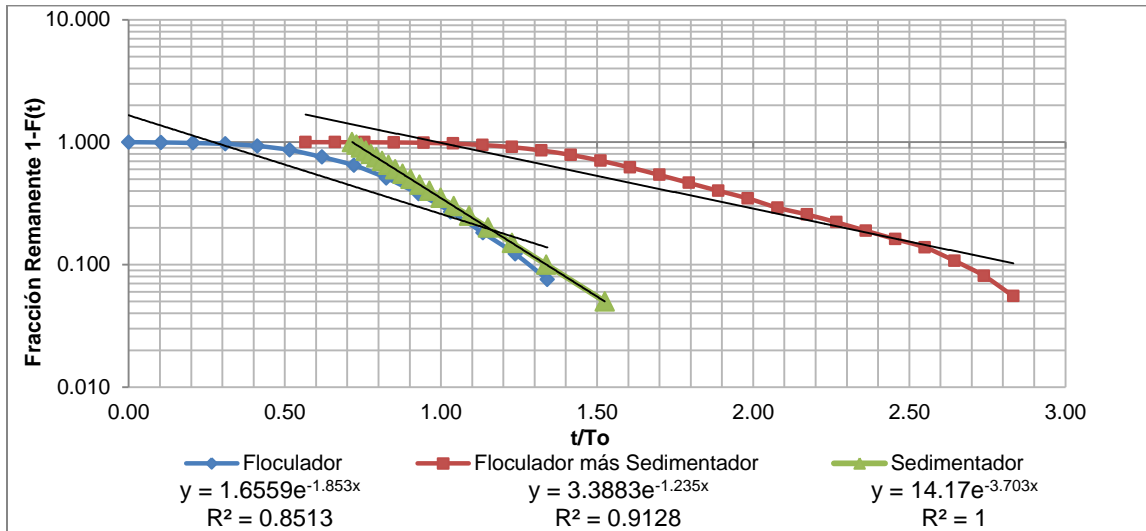


Figura A2.20. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 5

Tabla A2. 74. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 5

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum Mi$ (g)	Área Ai	$(Xi \cdot Ai)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0.000
2	15.0	0.0	0	0	0	0.000
3	18.0	0.0	0	0.298	4.911	0.000
4	21.0	0.2	3.695	0.819	15.961	0.088
5	24.0	0.3	10.162	1.711	38.507	0.243
6	27.0	0.8	24.944	3.200	81.591	0.597
7	30.0	1.3	49.889	7.441	212.069	1.193
8	33.0	3.6	117.331	13.915	438.314	2.806
9	36.0	5.7	222.651	21.133	729.072	5.325
10	39.0	8.4	379.708	31.476	1180.333	9.081
11	42.0	12.6	613.445	42.116	1705.707	14.671
12	45.0	15.5	902.614	51.045	2220.477	21.586
13	48.0	18.5	1247.215	56.254	2615.819	29.828
14	51.0	19.0	1601.055	56.254	2784.582	38.290
15	54.0	18.5	1945.656	53.278	2797.083	46.531
16	57.0	17.0	2262.541	47.325	2626.534	54.110
17	60.0	14.5	2533.233	39.884	2333.209	60.583
18	63.0	12.1	2757.732	36.908	2269.811	65.952
19	66.0	12.6	2991.469	30.806	1986.978	71.542
20	69.0	8.0	3140.211	23.811	1607.262	75.099
21	72.0	7.9	3287.105	22.993	1620.991	78.612
22	75.0	7.4	3425.685	20.537	1509.487	81.927
23	78.0	6.3	3542.092	17.263	1320.634	84.711

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
24	81.0	5.3	3640.021	18.305	1455.242	87.053
25	84.0	6.9	3769.362	19.421	1602.239	90.146
26	87.0	6.0	3881.149	17.784	1520.537	92.819
27	90.0	5.9	3990.165	14.212	1257.794	95.426
28	93.0	3.6	4057.607	9.748	891.919	97.039
29	96.0	2.9	4111.191	7.813	738.336	98.321
30	99.0	2.3	4154.613	5.655	551.380	99.359
31	102.0	1.4	4181.405	4.167	418.781	100
32	105.0	1.3	4206.349	3.348	346.566	0.000
33	108.0	0.9	4222.979	1.339	142.645	0.000
34	111.0	0.0	4222.979	0	0	0.000
Total				680.259	39024.772	

Tabla A2. 75. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 5

Flujo a Pistón	0.7159	71.59%
Zonas Muertas	0.0142	1.42%
Zonas Mezcladas	0.2699	26.99%
Tiempo medio de retención	34 minutos	
Índice de Morril	2.58	

## ENSAYO Nº 6

Tabla A2.76. Caudal estudiado durante el ensayo 6

Caudal de operación de la Planta	215 L/s
Caudal en Primera Línea de Tratamiento	113.9 L/s
Caudal en Segunda Línea de Tratamiento	101.1 L/s

### • Línea 1 de floculación

Volumen: 180.263 m<sup>3</sup>

Caudal: 113.872 L/s= 6.83 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico t<sub>0</sub>: 26.4 minutos

Tabla A2.77. Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	188.7	0.00	0.7	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	188.8	0.11	0.7	0.1	0.1	1.053	1.053	1.000
3	6.0	193.8	0.23	3.3	2.6	2.7	53.708	54.762	0.990
4	9.0	201.0	0.34	7.0	6.3	9.0	129.532	184.294	0.966
5	12.0	210.0	0.45	11.6	10.9	19.9	224.312	408.605	0.924
6	15.0	223.0	0.57	18.3	17.6	37.6	361.216	769.821	0.858
7	18.0	237.0	0.68	25.5	24.8	62.4	508.651	1278.472	0.763
8	21.0	253.0	0.80	33.7	33.0	95.4	677.148	1955.619	0.638

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (4S)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t)
9	24.0	259.0	0.91	36.8	36.1	131.5	740.334	2695.953	0.501
10	27.0	253.0	1.02	33.7	33.0	164.6	677.148	3373.101	0.376
11	30.0	244.0	1.14	29.1	28.4	193.0	582.368	3955.469	0.268
12	33.0	235.0	1.25	24.5	23.8	216.8	487.588	4443.057	0.178
13	36.0	221.0	1.36	17.3	16.6	233.4	340.153	4783.211	0.115
14	39.0	212.0	1.48	12.6	12.0	245.3	245.374	5028.585	0.070
15	42.0	204.0	1.59	8.5	7.9	253.2	161.125	5189.710	0.040
16	45.0	199.9	1.71	6.4	5.8	258.9	117.948	5307.658	0.018
17	48.0	194.1	1.82	3.5	2.8	261.7	56.868	5364.526	0.007
18	51.0	191.7	1.93	2.2	1.5	263.3	31.593	5396.119	0.002
19	54.0	189.5	2.05	1.1	0.4	263.7	8.425	5404.544	0.000
20	57.0	188.2	2.16	0.4	0.0	263.7	0.000	5404.544	0.000
21	60.0	188.0	2.27	0.3	0.0	263.7	0.000	5404.544	0.000
22	63.0	187.1	2.39	0.0	0.0	263.7	0.000	5404.544	0.000

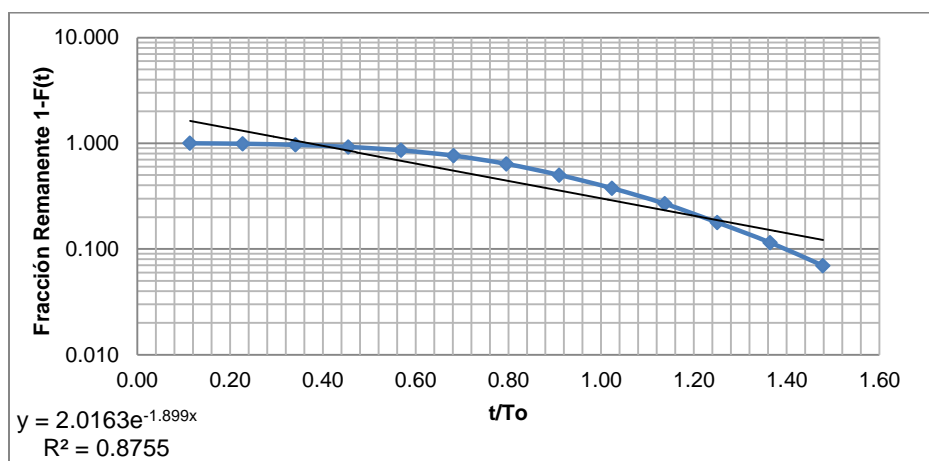


Figura A2.21. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 6

Tabla A2.78. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	ΣMi (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
1	0.0	0.7	0			0
2	3.0	0.7	1.053	6.043	9.065	0.0195
3	6.0	3.3	54.762	15.445	69.505	1.0133
4	9.0	7.0	184.294	27.930	209.479	3.4100
5	12.0	11.6	408.605	44.885	471.297	7.5604
6	15.0	18.3	769.821	65.694	886.866	14.2440
7	18.0	25.5	1278.472	88.814	1465.434	23.6555
8	21.0	33.7	1955.619	105.769	2062.498	36.1847
9	24.0	36.8	2695.953	105.769	2379.805	49.8831
10	27.0	33.7	3373.101	94.209	2402.328	62.4123
11	30.0	29.1	3955.469	80.337	2289.596	73.1878
12	33.0	24.5	4443.057	62.611	1972.248	82.2097
13	36.0	17.3	4783.211	44.885	1548.547	88.5035
14	39.0	12.6	5028.585	31.784	1191.896	93.0436
15	42.0	8.5	5189.710	22.459	909.576	96.0249
16	45.0	6.4	5307.658	14.829	645.059	98.2073
17	48.0	3.5	5364.526	8.509	395.685	99.2595

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	$(Xi \cdot Ai)$	F (%)
18	51.0	2.2	5396.119	4.964	245.730	99.8441
19	54.0	1.1	5404.544	2.267	119.010	100
20	57.0	0.4	5404.544	1.111	61.651	100
21	60.0	0.3	5404.544	0.478	27.983	100
22	63.0	0.0	5404.544	0	0	100
<b>Total</b>				828.794	19363.256	

Tabla A2.79. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de floculación en el Ensayo 6

Flujo a Pistón	0.3693	36.93
Zonas Muertas	0.1045	10.45
Zonas Mezcladas	0.5262	52.62
Tiempo medio de retención	23.4 minutos	
Índice de Morril	4.07	

- Línea 1 de Sedimentación**

VOLUMEN: 197.164 m<sup>3</sup>

CAUDAL: 6.83 m<sup>3</sup>/min

TIEMPO TEÓRICO T<sub>0</sub>: 28.9 minutos

Tabla A2.80. Cálculo de Fracciones Remanentes en Línea 1 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/T <sub>0</sub>	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	186.8	0.000	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	12.0	186.8	0.42	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	15.0	188.8	0.52	0.7	0.7	0.7	14.961	14.961	0.997
4	18.0	188.000	0.62	0.3	0.3	1.0	6.536	21.498	0.996
5	21.0	188.300	0.73	0.5	0.5	1.5	9.696	31.194	0.994
6	24.0	188.700	0.83	0.7	0.7	2.2	13.908	45.102	0.991
7	27.0	189.800	0.94	1.2	1.2	3.4	25.492	70.594	0.986
8	30.0	192.100	1.04	2.4	2.4	5.9	49.714	120.308	0.976
9	33.0	199.000	1.14	6.0	6.0	11.8	122.378	242.686	0.952
10	36.0	205.000	1.25	9.1	9.1	20.9	185.565	428.251	0.915
11	39.0	213.000	1.35	13.2	13.2	34.1	269.813	698.064	0.861
12	42.0	219.000	1.46	16.2	16.2	50.3	333.000	1031.064	0.794
13	45.0	224.000	1.56	18.8	18.8	69.1	385.655	1416.719	0.717
14	48.0	228.000	1.66	20.9	20.9	90.0	427.779	1844.498	0.632
15	51.0	<b>232.000</b>	1.77	22.9	22.9	112.9	469.903	2314.401	0.538
16	54.0	225.000	1.87	19.3	19.3	132.2	396.186	2710.587	0.459
17	57.0	216.000	1.98	14.7	14.7	146.9	301.406	3011.994	0.399
18	60.0	215.000	2.08	14.2	14.2	161.1	290.875	3302.869	0.341
19	63.0	213.000	2.18	13.2	13.2	174.3	269.813	3572.682	0.287
20	66.0	211.000	2.29	12.1	12.1	186.4	248.751	3821.433	0.238
21	69.0	204.000	2.39	8.5	8.5	195.0	175.034	3996.467	0.203
22	72.0	206.000	2.50	9.6	9.6	204.5	196.096	4192.562	0.164
23	75.0	203.000	2.60	8.0	8.0	212.6	164.502	4357.065	0.131
24	78.0	203.000	2.70	8.0	8.0	220.6	164.502	4521.567	0.098

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
25	81.0	199.800	2.81	6.4	6.4	227.0	130.803	4652.371	0.072
26	84.0	194.300	2.91	3.6	3.6	230.5	72.882	4725.253	0.057
27	87.0	194.200	3.01	3.5	3.5	234.0	71.829	4797.082	0.043
28	90.0	194.000	3.12	3.4	3.4	237.4	69.723	4866.805	0.029
29	93.0	191.300	3.22	2.0	2.0	239.5	41.289	4908.094	0.021
30	96.0	191.100	3.33	1.9	1.9	241.4	39.183	4947.277	0.013
31	99.0	191.700	3.43	2.2	2.2	243.6	45.501	4992.778	0.004
32	102.0	188.200	3.53	0.4	0.4	244.0	8.643	5001.421	0.002
33	105.0	188.000	3.64	0.3	0.3	244.3	6.536	5007.957	0.001
34	108.0	187.900	3.74	0.3	0.3	244.6	5.483	5013.441	0.000
35	111.0	187.100	3.85	0.0	0.0	244.6	0.000	5013.441	0.000

Tabla A2. 81. Fracción remanente en la línea 1 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 6

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	0.928	0.369	0.559
0.95	0.974	0.396	0.577
0.9	1.022	0.425	0.597
0.85	1.072	0.455	0.618
0.8	1.126	0.487	0.640
0.75	1.184	0.521	0.663
0.7	1.245	0.557	0.688
0.65	1.311	0.596	0.715
0.6	1.382	0.638	0.744
0.55	1.459	0.684	0.775
0.5	1.544	0.734	0.809
0.45	1.637	0.790	0.848
0.4	1.742	0.852	0.890
0.35	1.860	0.922	0.938
0.3	1.997	1.003	0.994
0.25	2.159	1.099	1.060
0.2	2.357	1.217	1.141
0.15	2.613	1.368	1.245
0.1	2.973	1.582	1.391
0.05	3.589	1.947	1.642
0.01	5.018	2.794	2.224

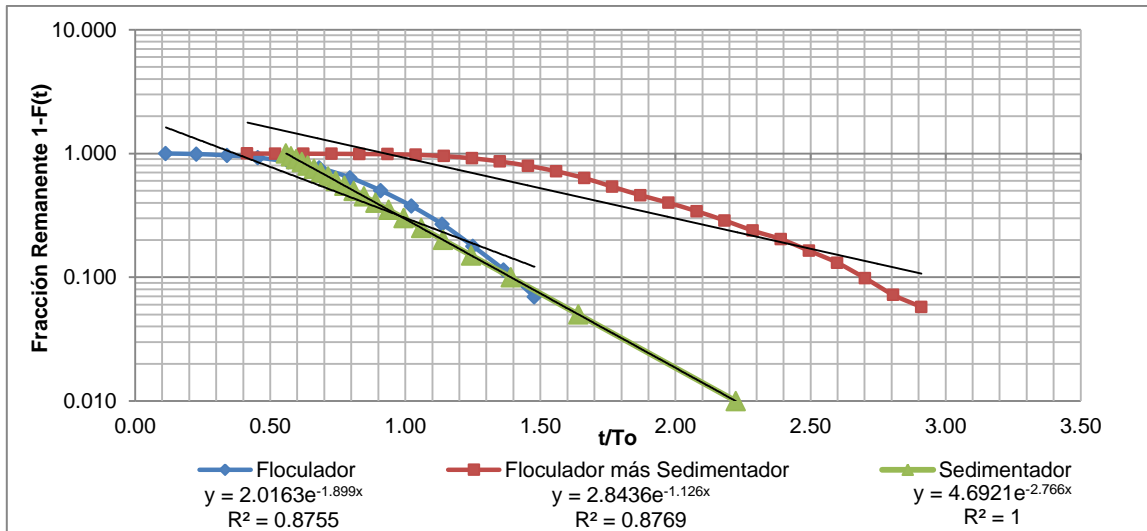


Figura A2.22. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 1 de Sedimentación en el Ensayo 6

Tabla A2. 82. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	12.0	0.0	0	4.3796	26.2774	0
3	15.0	0.7	14.961	1.5732	21.2388	0.298
4	18.0	0.3	21.498	1.1879	19.6004	0.429
5	21.0	0.5	31.194	1.7274	33.6839	0.622
6	24.0	0.7	45.102	2.8834	64.8765	0.900
7	27.0	1.2	70.594	5.5037	140.3446	1.408
8	30.0	2.4	120.308	12.5940	358.9279	2.400
9	33.0	6.0	242.686	22.5357	709.8754	4.841
10	36.0	9.1	428.251	33.3252	1149.7208	8.542
11	39.0	13.2	698.064	44.1148	1654.3032	13.924
12	42.0	16.2	1031.064	52.5922	2129.9852	20.566
13	45.0	18.8	1416.719	59.5283	2589.4829	28.258
14	48.0	20.9	1844.498	65.6938	3054.7607	36.791
15	51.0	22.9	2314.401	63.3817	3137.3962	46.164
16	54.0	19.3	2710.587	51.0509	2680.1706	54.066
17	57.0	14.7	3011.994	43.3441	2405.5961	60.078
18	60.0	14.2	3302.869	41.0320	2400.3740	65.880
19	63.0	13.2	3572.682	37.9493	2333.8830	71.262
20	66.0	12.1	3821.433	31.0132	2000.3515	76.224
21	69.0	8.5	3996.467	27.1598	1833.2867	79.715
22	72.0	9.6	4192.562	26.3891	1860.4333	83.626
23	75.0	8.0	4357.065	24.0771	1769.6658	86.908
24	78.0	8.0	4521.567	21.6109	1653.2347	90.189
25	81.0	6.4	4652.371	14.9060	1185.0270	92.798
26	84.0	3.6	4725.253	10.5902	873.6910	94.252
27	87.0	3.5	4797.082	10.3590	885.6937	95.684
28	90.0	3.4	4866.805	8.1240	718.9757	97.075
29*	93.0	2.0	4908.094	5.8890	538.8480	97.899
30	96.0	1.9	4947.277	6.1973	585.6468	98.680

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
31	99.0	2.2	4992.778	3.9624	386.3291	99.588
32	102.0	0.4	5001.421	1.1108	111.6390	99.760
33	105.0	0.3	5007.957	0.8796	91.0419	99.891
34	108.0	0.3	5013.441	0.4013	42.7365	100
35	111.0	0.0	5013.441	0	0	100
Total				737.067	39447.099	

Tabla A2. 83. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 1 de sedimentación en el Ensayo 6

Flujo a Pistón	0.5589	55.89
Zonas Muertas	0.0798	7.98
Zonas Mezcladas	0.3613	36.13
Tiempo medio de retención	3.2 minutos	
Índice de Morril	2.94	

- **Línea 2 de Floculación**

Volumen: 180.563 m<sup>3</sup>

Caudal: 101.1L/s= 6.066984 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 29.8 minutos

Tabla A2.84 . Cálculo de Fracciones Remanentes para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	Concentración de sal (mg/L)	C-Ci (mg/L)	$\Sigma(C-Ci)$ (mg/L)	Mi (g)	$\Sigma Mi$ (g)	1-F(t)
1	0.0	187.5	0.00	0.1	0.0	0.0	0	0	1.000
2	3.0	188.9	0.10	0.8	0.7	0.7	13.092	13.092	0.997
3	6.0	190.4	0.20	1.6	1.5	2.2	27.119	40.211	0.992
4	9.0	193.3	0.30	3.0	3.0	5.2	54.238	94.449	0.982
5	12.0	201.0	0.40	7.0	6.9	12.1	126.244	220.693	0.957
6	15.0	224.0	0.50	18.8	18.8	30.9	341.326	562.019	0.891
7	18.0	238.0	0.60	26.0	25.9	56.8	472.246	1034.265	0.800
8	21.0	256.0	0.71	35.3	35.2	92.0	640.571	1674.836	0.676
9	24.0	<b>263.0</b>	0.81	38.9	38.8	130.8	706.031	2380.867	0.540
10	27.0	258.0	0.91	36.3	36.2	167.0	659.274	3040.140	0.412
11	30.0	250.0	1.01	32.2	32.1	199.1	584.463	3624.603	0.299
12	33.0	237.0	1.11	25.5	25.4	224.6	462.894	4087.497	0.209
13	36.0	227.0	1.21	20.4	20.3	244.9	369.380	4456.878	0.138
14	39.0	215.0	1.31	14.2	14.1	259.0	257.164	4714.041	0.088
15	42.0	208.0	1.41	10.6	10.5	269.5	191.704	4905.745	0.051
16	45.0	199.0	1.51	6.0	5.9	275.4	107.541	5013.286	0.030
17	48.0	194.5	1.61	3.7	3.6	279.0	65.460	5078.746	0.018
18	51.0	192.1	1.71	2.4	2.4	281.4	43.016	5121.762	0.009
19	54.0	190.6	1.81	1.7	1.6	283.0	28.989	5150.751	0.004
20	57.0	189.6	1.92	1.1	1.1	284.1	19.638	5170.389	0.000
21	60.0	188.7	2.02	0.7	0.0	284.1	0.000	5170.389	0.000
22	63.0	187.7	2.12	0.2	0.0	284.1	0.000	5170.389	0.000
23	66.0	187.2	2.22	0.0	0.0	284.1	0.000	5170.389	0.000

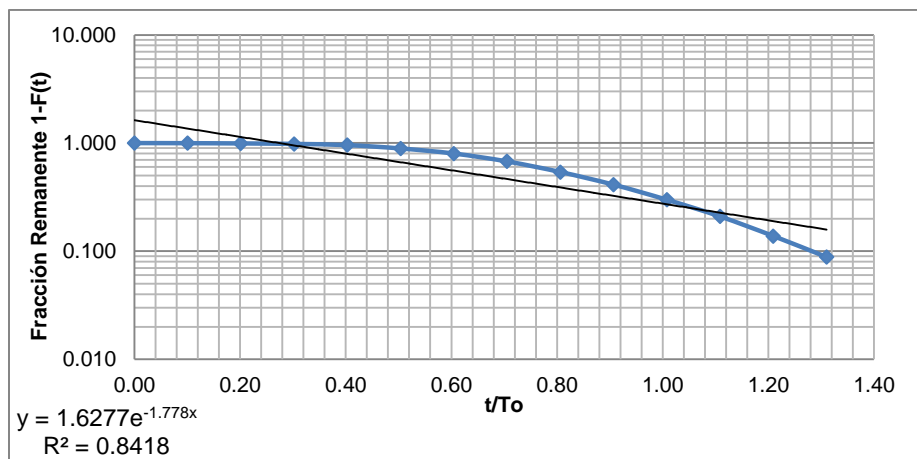


Figura A2. 23. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 6

Tabla A2. 85. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	3.0	0.7	13.092	3.314	4.971	0.253
3	6.0	1.5	40.211	6.705	30.172	0.778
4	9.0	3.0	94.449	14.874	111.556	1.827
5	12.0	6.9	220.693	38.534	404.607	4.268
6	15.0	18.8	562.019	67.049	905.163	10.870
7	18.0	25.9	1034.265	91.711	1513.229	20.004
8	21.0	35.2	1674.836	110.978	2164.068	32.393
9	24.0	38.8	2380.867	112.519	2531.682	46.048
10	27.0	36.2	3040.140	102.500	2613.760	58.799
11	30.0	32.1	3624.603	86.316	2460.009	70.103
12	33.0	25.4	4087.497	68.590	2160.600	79.056
13	36.0	20.3	4456.878	51.636	1781.426	86.200
14	39.0	14.1	4714.041	36.993	1387.223	91.174
15	42.0	10.5	4905.745	24.662	998.801	94.882
16	45.0	5.9	5013.286	14.258	620.204	96.961
17	48.0	3.6	5078.746	8.940	415.705	98.228
18	51.0	2.4	5121.762	5.934	293.744	99.060
19	54.0	1.6	5150.751	4.008	210.396	99.620
20	57.0	1.1	5170.389	1.618	89.823	100
21	60.0	0.0	5170.389	0	0	100
22	63.0	0.0	5170.389	0	0	100
23	66.0	0.0	5170.389	0	0	100
<b>Total</b>				851.138	20697.138	

Tabla A2.86. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de floculación en el Ensayo 6

Flujo a Pistón	0.2740	27.40%
Zonas Muertas	0.1640	16.40%
Zonas Mezcladas	0.5620	56.20%
Tiempo medio de retención	24.3 minutos	
Índice de Morril	3.97	



- **Línea 2 de Sedimentación**

Volumen: 197.164 m<sup>3</sup>

Caudal: 6.07 m<sup>3</sup>/min

Tiempo teórico to: 32.5 minutos

Tabla A2. 87. Cálculo de Fracciones Remanentes en Línea 2 de Sedimentación incluido el efecto del floculador para el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Conductividad (µS)	t/To	C (mg/L)	C-Ci (mg/L)	Σ(C-Ci) (mg/L)	Mi (g)	ΣMi (g)	1-F(t) Floculador más Sedimentador
1	0.0	186.5	0.00	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
2	12.0	186.6	0.37	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
3	15.0	186.6	0.46	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
4	18.0	187.1	0.55	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
5	21.0	187.2	0.65	0.0	0.0	0.0	0	0	1.000
6	24.0	187.8	0.74	0.2	0.2	0.2	3.934	3.934	0.999
7	27.0	188.4	0.83	0.5	0.5	0.7	9.545	13.479	0.998
8	30.0	188.8	0.92	0.7	0.7	1.5	13.285	26.764	0.995
9	33.0	192.5	1.02	2.6	2.6	4.1	47.886	74.650	0.986
10	36.0	197.2	1.11	5.0	5.0	9.1	91.837	166.487	0.970
11	39.0	201.0	1.20	7.0	7.0	16.1	127.372	293.860	0.946
12	42.0	209.0	1.29	11.1	11.1	27.3	202.184	496.043	0.909
13	45.0	217.0	1.38	15.2	15.2	42.5	276.995	773.038	0.859
14	48.0	221.0	1.48	17.3	17.3	59.7	314.401	1087.439	0.801
15	51.0	226.0	1.57	19.8	19.8	79.6	361.158	1448.596	0.735
16	54.0	229.0	1.66	21.4	21.4	101.0	389.212	1837.808	0.664
17	57.0	<b>232.0</b>	1.75	22.9	22.9	123.9	417.266	2255.074	0.588
18	60.0	226.0	1.85	19.8	19.8	143.7	361.158	2616.231	0.522
19	63.0	224.0	1.94	18.8	18.8	162.6	342.455	2958.686	0.460
20	66.0	221.0	2.03	17.3	17.3	179.8	314.401	3273.086	0.402
21	69.0	213.0	2.12	13.2	13.2	193.0	239.589	3512.676	0.358
22	72.0	215.0	2.22	14.2	14.2	207.2	258.292	3770.968	0.311
23	75.0	215.0	2.31	14.2	14.2	221.4	258.292	4029.260	0.264
24	78.0	215.0	2.40	14.2	14.2	235.6	258.292	4287.552	0.217
25	81.0	212.0	2.49	12.6	12.6	248.2	230.238	4517.790	0.175
26	84.0	206.0	2.58	9.6	9.6	257.8	174.129	4691.919	0.143
27	87.0	206.0	2.68	9.6	9.6	267.4	174.129	4866.049	0.111
28	90.0	202.0	2.77	7.5	7.5	274.9	136.724	5002.773	0.086
29	93.0	199.5	2.86	6.2	6.2	281.1	113.345	5116.118	0.066
30	96.0	197.1	2.95	5.0	5.0	286.1	90.902	5207.020	0.049
31	99.0	193.7	3.05	3.2	3.2	289.3	59.107	5266.128	0.038
32	102.0	192.3	3.14	2.5	2.5	291.9	46.015	5312.143	0.030
33	105.0	191.7	3.23	2.2	2.2	294.1	40.404	5352.547	0.022
34	108.0	191.7	3.32	2.2	2.2	296.3	40.404	5392.952	0.015
35	111.0	191.8	3.42	2.3	2.3	298.6	41.340	5434.291	0.007
36	114.0	190.5	3.51	1.6	1.6	300.2	29.183	5463.474	0.002
37	117.0	188.6	3.60	0.6	0.6	300.8	11.415	5474.889	0.000

Tabla A2. 88. Fracción remanente en la línea 2 de sedimentación sin en efecto del floculador para el Ensayo 6

1-F(t)	t/To Floculador + Sedimentador	t/To Floculador	t/To Sedimentador
1	1.074	0.274	0.800
0.95	1.117	0.303	0.814
0.9	1.162	0.333	0.829
0.85	1.210	0.365	0.845
0.8	1.261	0.400	0.861
0.75	1.315	0.436	0.879
0.7	1.373	0.475	0.898
0.65	1.435	0.516	0.919
0.6	1.502	0.561	0.941
0.55	1.575	0.610	0.965
0.5	1.655	0.664	0.991
0.45	1.743	0.723	1.020
0.4	1.842	0.789	1.052
0.35	1.954	0.864	1.089
0.3	2.083	0.951	1.132
0.25	2.236	1.054	1.182
0.2	2.423	1.179	1.244
0.15	2.664	1.341	1.323
0.1	3.004	1.569	1.435
0.05	3.585	1.959	1.626

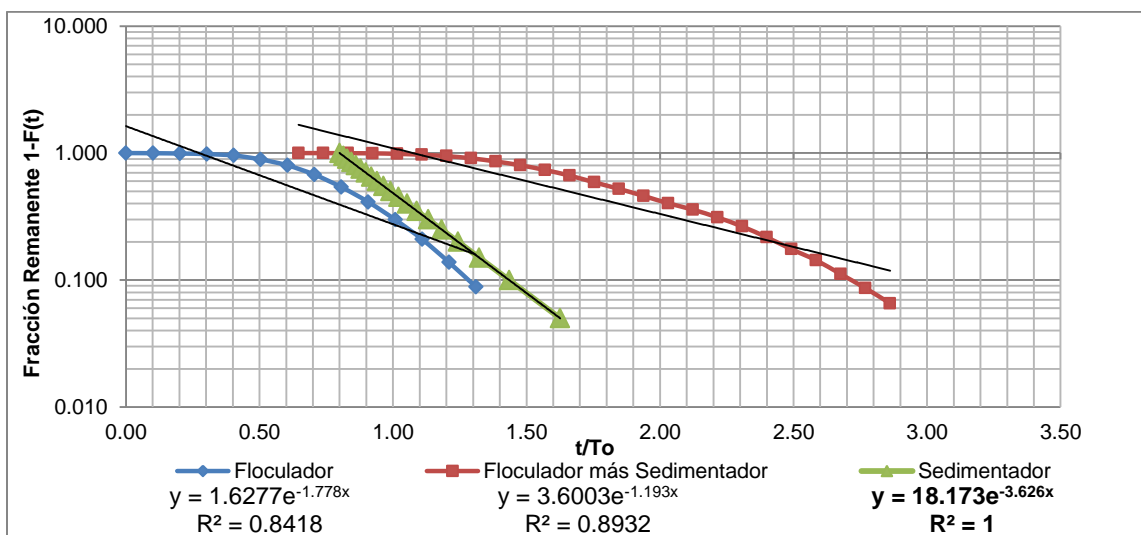


Figura A2.24. Curva  $t/T_0$  Vs Fracción Remanente para la Línea 2 de Sedimentación en el Ensayo 6

Tabla A2. 89. Cálculo del Tiempo medio de retención y del índice de Morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 6

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\sum Mi$ (g)	Área $A_i$	$(X_i \cdot A_i)$	F (%)
1	0.0	0.0	0			0
2	12.0	0.0	0	0	0	0
3	15.0	0.0	0	0	0	0
4	18.0	0.0	0	0	0	0
5	21.0	0.0	0	0.324	6.322	0

Muestra	tiempo (min)	Concentración de sal (mg/L)	$\Sigma Mi$ (g)	Área Ai	(Xi*Ai)	F (%)
6	24.0	0.2	3.934	1.111	24.994	0.07185541
7	27.0	0.5	13.479	1.882	47.979	0.24619399
8	30.0	0.7	26.764	5.041	143.677	0.4888547
9	33.0	2.6	74.650	11.515	362.723	1.36349498
10	36.0	5.0	166.487	18.066	623.270	3.04092013
11	39.0	7.0	293.860	27.160	1018.493	5.36740539
12	42.0	11.1	496.043	39.491	1599.372	9.06033299
13	45.0	15.2	773.038	48.739	2120.139	14.1197029
14	48.0	17.3	1087.439	55.675	2588.885	19.862294
15	51.0	19.8	1448.596	61.840	3061.099	26.4589116
16	54.0	21.4	1837.808	66.464	3489.384	33.567945
17	57.0	22.9	2255.074	64.152	3560.459	41.1893943
18	60.0	19.8	2616.231	57.987	3392.239	47.7860119
19	63.0	18.8	2958.686	54.134	3329.216	54.0410188
20	66.0	17.3	3273.086	45.656	2944.819	59.7836099
21	69.0	13.2	3512.676	41.032	2769.662	64.1597587
22	72.0	14.2	3770.968	42.573	3001.424	68.877518
23	75.0	14.2	4029.260	42.573	3129.144	73.5952774
24	78.0	14.2	4287.552	40.261	3079.994	78.3130367
25	81.0	12.6	4517.790	33.325	2649.357	82.5183802
26	84.0	9.6	4691.919	28.701	2367.846	85.6988919
27	87.0	9.6	4866.049	25.618	2190.377	88.8794036
28	90.0	7.5	5002.773	20.609	1823.899	91.3766942
29	93.0	6.2	5116.118	16.833	1540.192	93.4469715
30	96.0	5.0	5207.020	12.363	1168.281	95.1073161
31	99.0	3.2	5266.128	8.663	844.691	96.1869228
32	102.0	2.5	5312.143	7.122	715.775	97.027402
33	105.0	2.2	5352.547	6.660	689.282	97.765398
34	108.0	2.2	5392.952	6.737	717.469	98.5033941
	111.0	2.3	5434.291	5.812	636.412	99.2584707
	114.0	1.6	5463.474	3.346	376.403	99.7915004
	117.0	0.6	5474.889	0.941	108.658	100
Total				902.407	56121.934	

Tabla A2. 90. Comportamiento de flujo, tiempo medio de retención e índice de morril para la línea 2 de sedimentación en el Ensayo 6

Flujo a Pistón	0.7998	79.98%
Zonas Muertas	-0.0754	-7.54%
Zonas Mezcladas	0.2756	27.56%
Tiempo medio de retención	37.9 minutos	
Índice de Morril	2.76	

## ANEXO III. MEMORÍAS DE CÁLCULO PARA DETERMINAR EL GRADIENTE DE FLOCULACIÓN

### ENSAYO 1

Caudal de operación de la PTAP: 156L/s

Temperatura: 15.2°C

Peso específico del agua: 9797.64 N/m<sup>3</sup>

Coefficiente de Viscosidad absoluta: 0.00113752 N•s/m<sup>2</sup>

#### • Línea 1 de Floculación

Nivel Inicial del agua: 2.808 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0824 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.02176 m<sup>3</sup>

#### Cálculo Tipo

##### ○ Área del Compartimiento

Los valores correspondientes al área de cada compartimiento se obtuvieron a partir de los planos de la PTAP suministrados por el acueducto.

##### ○ Nivel de agua en cada compartimiento

Compartimiento 1:

$$\text{Nivel del Agua}_1 = \text{Nivel inicial del agua} - \text{Pérdida de Carga}_{E-1}$$

$$\text{Nivel del Agua}_1 = 2.808m - 0.019m = 2.79m$$

Compartimiento 2:

$$\text{Nivel del Agua}_2 = \text{Nivel del Agua}_1 - \text{Pérdida de Carga}_{1-2}$$

$$\text{Nivel del Agua}_2 = 2.789m - 0.011m = 2.78m$$

##### ○ Volumen de cada Compartimiento

Compartimiento 1:

$$\text{Volumen}_1 = \text{Área}_1 * \text{Nivel del Agua}_1$$

$$\text{Volumen}_1 = 7.69m^2 * 2.79m = 21.45m^3$$

##### ○ Tiempo medio de retención en cada compartimiento

El tiempo medio de retención en cada compartimiento se determinó calculando el tiempo teórico de retención en cada compartimiento y los porcentajes del tiempo teórico de floculación correspondientes en cada compartimiento de la siguiente manera:

Para el Compartimiento 1

Tiempo teórico de retención:

$$T_{O_1} = \frac{Volumen_1}{Q_{Linea1}} = \frac{21.45m^3}{0.82m^3/s} = 260.36s = 4.34min$$

Porcentaje del Tiempo teórico de retención:

$$\% \text{ del Tiempo Teórico} = \frac{T_{O_1} * 100\%}{T_o} = \frac{4.34min * 100\%}{35.54min} = 12.21\%$$

Por lo tanto el Tiempo medio de retención en el compartimiento 1 corresponde a:

$$Tiempo \text{ medio de retención}_1 (tm_1) = \frac{35.95min * 12.21\%}{100\%} = 4.39min = 263.31s$$

- Gradientes de floculación puntuales

Para el Compartimiento 1

$$G_1 = \frac{\gamma \Delta h}{\mu t m} = \frac{9797.64 \frac{N}{m^3} * 0.019m}{0.00113752 N \cdot \frac{s}{m^2} * 263.31s} = 24.93s^{-1}$$

- Gradiente Total de floculación

Tomando el tiempo medio de floculación para el Ensayo 1 presentado en la Tabla A2. 4, del Anexo 2.

$$t_m = 35.94min = 2156.4s$$

$$G = \frac{\gamma \Delta h}{\mu t m} = \frac{9797.64 \frac{N}{m^3} * 0.066m}{0.00113752 N \cdot \frac{s}{m^2} * 2156.4s} = 16.2 s^{-1}$$

Los resultados para cada compartimiento se presentan en la Tabla A3.1

Tabla A3.1. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 1

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	1.900	0.019	7.69	2.79	21.45	260.4	4.34	12.21	4.39	263.31	24.93	16.2
1-2	1.100	0.011	8.07	2.78	22.42	272.1	4.54	12.76	4.59	275.19	18.55	
2-3	1.000	0.010	7.93	2.77	21.94	266.3	4.44	12.49	4.49	269.34	17.88	
3-4	0.600	0.006	7.93	2.76	21.89	265.8	4.43	12.46	4.48	268.76	13.87	
4-5	0.400	0.004	7.93	2.76	21.86	265.4	4.42	12.44	4.47	268.37	11.33	
5-6	0.600	0.006	7.93	2.75	21.82	264.8	4.41	12.42	4.46	267.78	13.89	
6-7	0.550	0.006	7.90	2.75	21.69	263.3	4.39	12.35	4.44	266.27	13.34	
7-8	0.450	0.005	8.25	2.74	22.62	274.6	4.58	12.88	4.63	277.68	11.81	
Suma	6.6	0.066	****	****	175.70	2132.6	35.54	100	35.95	2156.70	****	

- Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.808 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0734 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.02176 m<sup>3</sup>

Tabla A3. 2. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 1

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	1.7	0.0170	7.69	2.79	21.47	292.60	4.88	12.21	4.31	258.58	23.80	16.2
1-2	1.1	0.0110	8.07	2.78	22.43	305.81	5.10	12.76	4.50	270.26	18.72	
2-3	1.2	0.0120	7.93	2.77	21.94	299.10	4.98	12.48	4.41	264.32	19.77	
3-4	0.5	0.0050	7.93	2.76	21.90	298.56	4.98	12.46	4.40	263.84	12.78	
4-5	0.5	0.0050	7.93	2.76	21.86	298.02	4.97	12.44	4.39	263.37	12.79	
5-6	0.5	0.0050	7.93	2.75	21.82	297.48	4.96	12.42	4.38	262.89	12.80	
6-7	0.5	0.0050	7.90	2.75	21.70	295.85	4.93	12.35	4.36	261.45	12.83	
7-8	0.5	0.0045	8.25	2.74	22.63	308.53	5.14	12.88	4.54	272.66	11.92	
Suma	6.5	0.0645	****	****	175.77	2395.94	39.93	100.00	35.29	2117.36	****	

## ENSAYO 2

Caudal de operación de la PTAP: 156L/s

Temperatura: 16.2°C

Peso específico del agua: 9795.84 N/m<sup>3</sup>

Coefficiente de Viscosidad absoluta: 0.00113012 N•s/m<sup>2</sup>

- **Línea 1 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.81 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0824 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0232 m<sup>3</sup>

Tabla A3.3. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 2

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	1.9	0.019	7.69	2.79	21.47	259.08	4.32	12.22	4.25	254.81	25.4	16.7
1-2	1.2	0.012	8.07	2.78	22.43	270.68	4.51	12.76	4.44	266.22	19.8	
2-3	1.25	0.0125	7.93	2.77	21.93	264.69	4.41	12.48	4.34	260.33	20.4	
3-4	0.5	0.005	7.93	2.76	21.89	264.21	4.40	12.46	4.33	259.85	12.9	
4-5	0.5	0.005	7.93	2.76	21.85	263.73	4.40	12.44	4.32	259.38	12.9	
5-6	0.45	0.0045	7.93	2.75	21.82	263.30	4.39	12.42	4.32	258.96	12.3	
6-7	0.55	0.0055	7.90	2.75	21.69	261.82	4.36	12.35	4.29	257.50	13.6	
7-8	0.35	0.0035	8.25	2.74	22.63	273.14	4.55	12.88	4.48	268.63	10.6	
Suma	6.7	0.067	****	****	175.70	2120.66	35.34	100.00	34.76	2085.68	****	

- **Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.81 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0729 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0232 m<sup>3</sup>

Tabla A3.4. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 2

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	1.7	0.017	7.69	2.79	21.48	294.79	4.91	12.22	4.15	248.74	24.3	16.7
1-2	1.1	0.011	8.07	2.78	22.45	308.10	5.14	12.77	4.33	259.97	19.2	
2-3	1.2	0.012	7.93	2.77	21.96	301.34	5.02	12.49	4.24	254.26	20.2	
3-4	0.6	0.006	7.93	2.76	21.91	300.69	5.01	12.46	4.23	253.71	14.3	
4-5	0.5	0.005	7.93	2.76	21.87	300.14	5.00	12.44	4.22	253.25	13.1	
5-6	0.5	0.005	7.93	2.75	21.83	299.60	4.99	12.41	4.21	252.79	13.1	
6-7	0.5	0.005	7.90	2.75	21.71	297.96	4.97	12.35	4.19	251.41	13.1	
7-8	0.45	0.0045	8.25	2.74	22.64	310.73	5.18	12.88	4.37	262.18	12.2	
Suma	6.55	0.0655	****	****	175.85	2413.35	40.22	100.00	33.94	2036.30	****	

### ENSAYO 3

Caudal de operación de la PTAP: 175 L/s

Temperatura: 15.9 °C

Peso específico del agua: 9793.6 N/m<sup>3</sup>

Coeficiente de Viscosidad absoluta: 0.0011323 N•s/m<sup>2</sup>

- **Línea 1 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.833 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0836 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0398 m<sup>3</sup>



Tabla A3.5. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 3

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	2.5	0.025	7.69	2.81	21.60	230.72	3.85	12.25	3.37	202.41	32.69	21.5
1-2	1.6	0.016	8.07	2.79	22.53	240.71	4.01	12.78	3.52	211.18	25.60	
2-3	1.25	0.0125	7.93	2.78	22.03	235.39	3.92	12.50	3.44	206.50	22.88	
3-4	0.95	0.0095	7.93	2.77	21.96	234.58	3.91	12.46	3.43	205.80	19.98	
4-5	0.7	0.007	7.93	2.76	21.90	233.99	3.90	12.43	3.42	205.28	17.18	
5-6	0.6	0.006	7.93	2.76	21.85	233.48	3.89	12.40	3.41	204.83	15.92	
6-7	0.8	0.008	7.90	2.75	21.71	231.95	3.87	12.32	3.39	203.49	18.44	
7-8	0.4	0.004	8.25	2.75	22.65	241.94	4.03	12.85	3.54	212.25	12.77	
Suma	8.8	0.088	****	****	176.23	1882.77	31.38	100.00	27.53	1651.74	****	

- **Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.839 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0817 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0441 m<sup>3</sup>

Tabla A3.6. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 3

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	2.4	0.024	7.69	2.82	21.65	264.85	4.41	12.27	3.28	196.55	32.5	22.3
1-2	1.8	0.018	8.07	2.80	22.57	276.13	4.60	12.79	3.42	204.92	27.6	
2-3	1.5	0.015	7.93	2.78	22.05	269.78	4.50	12.50	3.34	200.21	25.5	
3-4	0.7	0.007	7.93	2.78	22.00	269.10	4.49	12.47	3.33	199.71	17.4	
4-5	0.9	0.009	7.93	2.77	21.93	268.23	4.47	12.43	3.32	199.06	19.8	
5-6	0.6	0.006	7.93	2.76	21.88	267.65	4.46	12.40	3.31	198.63	16.2	
6-7	0.9	0.009	7.90	2.75	21.73	265.80	4.43	12.31	3.29	197.25	19.9	
7-8	0.4	0.004	8.25	2.75	22.66	277.24	4.62	12.84	3.43	205.75	13.0	
Suma	9.2	0.092	****	****	176.47	2158.77	35.98	100.00	26.70	1602.07	****	

## ENSAYO 4

Caudal de operación de la PTAP: 173 L/s

Temperatura: 16.4 °C

Peso específico del agua: 9795.4 N/m<sup>3</sup>

Coefficiente de Viscosidad absoluta: 0.0011286 N•s/m<sup>2</sup>

- **Línea 1 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.826 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0925 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0347 m<sup>3</sup>

Tabla A3.7. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 4

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	2.4	0.024	7.69	2.82	21.65	264.85	4.41	12.27	3.28	196.55	32.5	20.7
1-2	1.8	0.018	8.07	2.80	22.57	276.13	4.60	12.79	3.42	204.92	27.6	
2-3	1.5	0.015	7.93	2.78	22.05	269.78	4.50	12.50	3.34	200.21	25.5	
3-4	0.7	0.007	7.93	2.78	22.00	269.10	4.49	12.47	3.33	199.71	17.4	
4-5	0.9	0.009	7.93	2.77	21.93	268.23	4.47	12.43	3.32	199.06	19.8	
5-6	0.6	0.006	7.93	2.76	21.88	267.65	4.46	12.40	3.31	198.63	16.2	
6-7	0.9	0.009	7.90	2.75	21.73	265.80	4.43	12.31	3.29	197.25	19.9	
7-8	0.4	0.004	8.25	2.75	22.66	277.24	4.62	12.84	3.43	205.75	13.0	
Suma	9.2	0.092	****	****	176.47	2158.77	35.98	100.00	26.70	1602.07	****	

- **Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.832 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.0805 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.039 m<sup>3</sup>

Tabla A3.8. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 4

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	2.1	0.021	7.69	2.81	21.62	268.43	4.47	12.27	3.56	213.61	29.2	21.3
1-2	1.7	0.017	8.07	2.79	22.55	279.96	4.67	12.80	3.71	222.78	25.7	
2-3	1.6	0.016	7.93	2.78	22.02	273.42	4.56	12.50	3.63	217.58	25.3	
3-4	0.6	0.006	7.93	2.77	21.97	272.83	4.55	12.47	3.62	217.11	15.5	
4-5	1.0	0.01	7.93	2.76	21.89	271.85	4.53	12.43	3.61	216.33	20.0	
5-6	0.7	0.007	7.93	2.76	21.84	271.16	4.52	12.39	3.60	215.78	16.8	
6-7	0.7	0.007	7.90	2.75	21.70	269.48	4.49	12.32	3.57	214.44	16.8	
7-8	0.7	0.007	8.25	2.74	22.61	280.77	4.68	12.83	3.72	223.43	16.5	
Suma	9.1	0.091	****	****	176.21	2187.89	36.46	100.00	29.02	1741.06	****	

## ENSAYO 5

Caudal de operación de la PTAP: 216 L/s

Temperatura: 16.3 °C

Peso específico del agua: 9795.66 N/m<sup>3</sup>

Coefficiente de Viscosidad absoluta: 0.0011294 N•s/m<sup>2</sup>

- **Línea 1 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.891 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.1121 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.08152 m<sup>3</sup>

Tabla A3.9. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 5

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	3	0.03	7.69	2.86	22.00	196.31	3.27	12.35	2.78	166.67	39.5	29.3
1-2	2.4	0.024	8.07	2.84	22.89	204.26	3.40	12.85	2.89	173.41	34.6	
2-3	1.8	0.018	7.93	2.82	22.35	199.36	3.32	12.54	2.82	169.26	30.4	
3-4	1.7	0.017	7.93	2.80	22.21	198.16	3.30	12.47	2.80	168.24	29.6	
4-5	1.5	0.015	7.93	2.79	22.09	197.10	3.29	12.40	2.79	167.34	27.9	
5-6	1.0	0.01	7.93	2.78	22.01	196.39	3.27	12.35	2.78	166.74	22.8	
6-7	0.85	0.0085	7.90	2.77	21.87	195.08	3.25	12.27	2.76	165.62	21.1	
7-8	1.05	0.0105	8.25	2.76	22.75	203.00	3.38	12.77	2.87	172.35	23.0	
Suma	13.3	0.133	****	****	178.18	1589.67	26.49	100.00	22.49	1349.63	****	

- **Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.901 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.1035 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0887 m<sup>3</sup>

Tabla A3.10. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 5

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	3	0.03	7.69	2.87	22.08	213.41	3.56	12.37	2.89	173.41	38.7	29.4
1-2	2.8	0.028	8.07	2.84	22.94	221.75	3.70	12.86	3.00	180.18	36.7	
2-3	2.4	0.024	7.93	2.82	22.35	215.98	3.60	12.52	2.92	175.49	34.4	
3-4	1.2	0.012	7.93	2.81	22.25	215.06	3.58	12.47	2.91	174.75	24.4	
4-5	1.55	0.0155	7.93	2.79	22.13	213.87	3.56	12.40	2.90	173.78	27.8	
5-6	0.95	0.0095	7.93	2.78	22.05	213.14	3.55	12.36	2.89	173.19	21.8	
6-7	1.0	0.01	7.90	2.77	21.89	211.60	3.53	12.27	2.87	171.94	22.5	
7-8	1.1	0.011	8.25	2.76	22.78	220.15	3.67	12.76	2.98	178.89	23.1	
Suma	14	0.14	****	****	178.47	1724.97	28.75	100.00	23.36	1401.63	****	

## ENSAYO 6

Caudal de operación de la PTAP: 215 L/s

Temperatura: 16.3 °C

Peso específico del agua: 9795.66 N/m<sup>3</sup>

Coeficiente de Viscosidad absoluta: 0.0011294 N•s/m<sup>2</sup>

- Línea 1 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.891 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.1139 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.08152 m<sup>3</sup>

Tabla A3.11. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 1 de floculación en el Ensayo 6

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	3	0.03	7.69	2.86	22.00	193.23	3.22	12.35	2.89	173.11	38.8	28.7
1-2	2.4	0.024	8.07	2.84	22.89	201.06	3.35	12.85	3.00	180.12	34.0	
2-3	1.8	0.018	7.93	2.82	22.35	196.24	3.27	12.54	2.93	175.80	29.8	
3-4	1.7	0.017	7.93	2.80	22.21	195.06	3.25	12.47	2.91	174.74	29.0	
4-5	1.5	0.015	7.93	2.79	22.09	194.01	3.23	12.40	2.90	173.81	27.4	
5-6	1	0.01	7.93	2.78	22.01	193.32	3.22	12.35	2.89	173.18	22.4	
6-7	0.85	0.0085	7.90	2.77	21.87	192.02	3.20	12.27	2.87	172.02	20.7	
7-8	1.05	0.0105	8.25	2.76	22.75	199.82	3.33	12.77	2.98	179.01	22.6	
Suma	13.3	0.133	****	****	178.18	1564.75	26.08	100.00	23.36	1401.79	****	

- Línea 2 de floculación**

Nivel Inicial del agua: 2.901 m

Caudal por línea de tratamiento: 0.1011 m<sup>3</sup>/s

Volumen en la Entrada: 2.0887 m<sup>3</sup>

Tabla A3. 12. Gradientes puntuales y Gradiente medio de velocidad para la Línea 2 de floculación en el Ensayo 6

Compartimientos	Pérdida de Carga (cm)	Pérdida de Carga (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Nivel del agua en cada compartimiento (m)	Volumen de cada compartimiento (m <sup>3</sup> )	Tiempo Teórico de retención (s)	Tiempo Teórico de retención (min)	% del tiempo teórico	Tiempo medio de retención (min)	Tiempo medio de retención (s)	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )	Gradiente Medio de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Entrada-1	3	0.03	7.69	2.87	22.08	218.37	3.64	12.37	3.01	180.51	38.0	28.8
1-2	2.8	0.028	8.07	2.84	22.94	226.90	3.78	12.86	3.13	187.56	36.0	
2-3	2.4	0.024	7.93	2.82	22.35	220.99	3.68	12.52	3.04	182.68	33.8	
3-4	1.2	0.012	7.93	2.81	22.25	220.05	3.67	12.47	3.03	181.90	23.9	
4-5	1.55	0.0155	7.93	2.79	22.13	218.84	3.65	12.40	3.01	180.90	27.3	
5-6	0.95	0.0095	7.93	2.78	22.05	218.09	3.63	12.36	3.00	180.28	21.4	
6-7	1.0	0.01	7.90	2.77	21.89	216.52	3.61	12.27	2.98	178.98	22.0	
7-8	1.1	0.011	8.25	2.76	22.78	225.27	3.75	12.76	3.10	186.21	22.6	
Suma	14	0.14	****	****	178.47	1765.03	29.42	100.00	24.32	1459.02	****	

## ANEXO IV. CARGA SUPERFICIAL Y PRUEBAS DE SEDIMENTABILIDAD

- **CARGA SUPERFICIAL**

- Características de los tanques de cada sedimentador

Longitud: 15.02 m

Ancho: 2.4 m

Tabla A4. 1. Características de las placas y muros de los sedimentadores

	Número	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Inclinación
Placas	96	1.4	2.4	0.008	60°
Muros	2	1.4	2.4	0.2	

### Cálculo Tipo

- Área superficial de un tanque

$$A_{superficial} = Longitud \times Ancho - A_{ocupada\ por\ placas} - A_{ocupada\ por\ muros}$$

$$A_{sup} = 15.02 \times 2.4 - 96 \cdot 1.4 \times 2.4 - 2 \cdot 1.4 \times 2.4 = 33.245m^2$$

- Área superficial Total

$$A_{supTotal} = 33.245 \times 2 = 66.490m^2$$

- Longitud útil ocupada por el agua

$$l_u = \frac{A_{sup}}{ancho}$$

$$l_u = \frac{33.245}{2.4} = 13.842m$$

- Separación entre placas

$$e = \frac{l_u}{número\ de\ placas}$$

$$e = \frac{13.842}{96} = 0.144m$$

- Área horizontal

$$A_h = A_{supTotal} \cdot \text{sen}60$$

$$A_h = 66.490 \times \text{sen}60 = 57.582m^2$$

Para Línea 1 de sedimentación en el Ensayo 1

- Carga superficial

$$C_s = \frac{Q}{A_{supTotal}}$$

$$C_s = \frac{82.4}{66.490} \times \frac{86400}{1000} = 107.057m/d$$

- Velocidad de flujo

$$V_0 = \frac{Q}{A_h}$$

$$V_0 = \frac{82.4}{57.582} \times \frac{86400}{1000} = 123.619 \text{ m/d}$$

- Número de Reynolds

$$R_e = \frac{2V_0 e}{\vartheta}$$

$$R_e = \frac{2 \times 123.619 \times 0.144}{1.134 \times 10^{-6}} = 364.107$$

- Carga Superficial Equivalente (Velocidad crítica de sedimentación)

$$V_{sc} = \frac{V_0}{\text{sen}\theta + \frac{l}{e} - 0.013R_e \text{ Cos}\theta}$$

$$V_{sc} = \frac{123.619}{\text{sen}60 + \frac{1.4}{0.144} - 0.013 \times 364.107 \text{ Cos}60} = 36.894 \text{ m/d} = 2.562 \text{ cm/min}$$

Tabla A4. 2. Cargas superficiales para Línea 1 de sedimentación

Número de Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea (L/s)	Velocidad de flujo Vo (m/d)	Reynolds	Carga superficial	Carga superficial equivalente (m/d)	Carga superficial equivalente (cm/min)
1	156	82.4	123.619	364.107	107.057	36.894	2.562
2	156	82.9	124.317	375.433	107.662	37.936	2.634
3	175	93.6	140.450	420.912	121.633	47.109	3.271
4	173	92.5	138.804	421.118	120.208	46.578	3.235
5	216	112.1	168.184	508.996	145.652	69.820	4.849
6	215	113.9	170.862	517.103	147.971	72.518	5.036

Tabla A4. 3. Cargas superficiales para Línea 2 de Sedimentación

Número de Ensayo	Caudal (L/s)	Caudal por línea (L/s)	Velocidad de flujo Vo (m/d)	Reynolds	Carga superficial	Carga superficial equivalente (m/d)	Carga superficial equivalente (cm/min)
1	156	73.4	110.076	324.217	95.328	30.493	2.118
2	156	72.9	109.276	330.011	94.636	30.590	2.124
3	175	81.7	122.655	367.584	106.223	36.855	2.559
4	173	80.5	120.848	366.641	104.657	36.246	2.517
5	216	103.5	155.247	469.843	134.448	58.291	4.048
6	215	101.1	152.162	436.446	131.776	48.338	3.357



- **PRUEBAS DE SEDIMENTABILIDAD**

**Para Caudal de 175 L/s**

- Prueba 1

Turbiedad inicial: 14.4 NTU

Cálculo Tipo

Para la línea 1 de tratamiento en el tiempo 5 minutos.

- Velocidad de sedimentación

$$V_s = \frac{H}{\text{tiempo}} = \frac{5}{9.6} = 1.92 \text{ cm/min}$$

- Fracción Remanente

$$\text{Fracción Remanente} = \frac{\text{Turbiedad Remanente}}{\text{Turbiedad inicial}}$$

$$\text{Fracción Remanente} = \frac{10.6}{14.4} = 0.8833$$

Tabla A4.4. Velocidades de sedimentación y Fracciones remanentes para la Prueba 1 un caudal de 175 L/s

Línea de Tratamiento	Línea 1				Línea 2				
	Tiempo (min)	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente
	5	9.6	10.6	1.920	0.8833	9.7	10.7	1.940	0.8917
	10	9.4	10.4	0.940	0.8667	9.35	8.49	0.935	0.7075
	15	9.2	7.88	0.613	0.6567	9	7.32	0.600	0.6100
	20	8.9	7.14	0.445	0.5950	8.7	7.21	0.435	0.6008
	30	8.7	4.83	0.290	0.4025	8.3	5.03	0.277	0.4192
	40	8.45	3.92	0.211	0.3267	8	4.31	0.200	0.3592
	50	8.15	3.19	0.163	0.2658	7.5	3.2	0.150	0.2667
	60	7.89	2.31	0.132	0.1925	7.1	2.63	0.118	0.2192

- Prueba 2

Turbiedad Inicial: 14.2 NTU

Tabla A4.5. Velocidades de sedimentación y Fracciones remanentes para la Prueba 2 un caudal de 175 L/s

Línea de Tratamiento	Línea 1				Línea 2			
Tiempo (min)	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente
5	9.9	14	1.980	0.9459	9.9	14.6	1.980	0.9865
10	9.7	14	0.970	0.9459	9.7	14.6	0.970	0.9865
15	9.4	13.7	0.627	0.9257	9.5	14.4	0.633	0.9730
20	9.1	12.1	0.455	0.8176	9.1	11.5	0.455	0.7770
30	8.6	7.93	0.287	0.5358	8.7	6.8	0.290	0.4595
40	8.3	5.42	0.208	0.3662	8.5	5.24	0.213	0.3541
50	7.9	5.21	0.158	0.3520	8.3	4.69	0.166	0.3169
60	7.5	4.25	0.125	0.2872	8.1	4.26	0.135	0.2878

### Para Caudal de 216 L/s

- Prueba 1

Turbiedad inicial: 12 NTU

Tabla A4. 6. Velocidades de sedimentación y Fracciones remanentes para la Prueba 2 con un caudal de 216 L/s

Línea de Tratamiento	Línea 1				Línea 2			
Tiempo (min)	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación Vs (cm/min)	Fracción Remanente
5	9.6	10.6	1.920	0.8833	9.7	10.7	1.940	0.8917
10	9.4	10.4	0.940	0.8667	9.35	8.49	0.935	0.7075
15	9.2	7.88	0.613	0.6567	9	7.32	0.600	0.6100
20	8.9	7.14	0.445	0.5950	8.7	7.21	0.435	0.6008
30	8.7	4.83	0.290	0.4025	8.3	5.03	0.277	0.4192
40	8.45	3.92	0.211	0.3267	8	4.31	0.200	0.3592
50	8.15	3.19	0.163	0.2658	7.5	3.2	0.150	0.2667
60	7.89	2.31	0.132	0.1925	7.1	2.63	0.118	0.2192

- Prueba 2

Turbiedad inicial: 9.82 NTU

Tabla A4.7. Velocidades de sedimentación y Fracciones remanentes para la Prueba 2 con un caudal de 216 L/s

Línea de Tratamiento	Línea 1				Línea 2			
Tiempo (min)	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación $V_s$ (cm/min)	Fracción Remanente	H (cm)	Turbiedad remanente (UNT)	Velocidad de sedimentación $V_s$ (cm/min)	Fracción Remanente
5	9.4	8.87	1.880	0.9033	9.7	8.52	1.940	0.8676
10	9.2	8.58	0.920	0.8737	9.2	8.04	0.920	0.8187
15	9	6.21	0.600	0.6324	8.8	5.48	0.587	0.5580
20	8.75	5.9	0.438	0.6008	8.6	4.72	0.430	0.4807
30	8.5	4.03	0.283	0.4104	8	3.27	0.267	0.3330
40	8.29	2.88	0.207	0.2933	7.6	2.97	0.190	0.3024
50	8.1	2.57	0.162	0.2617	7.2	2.06	0.144	0.2098
60	7.85	2.08	0.131	0.2118	6.8	2.04	0.113	0.2077

## • CÁLCULO DE EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

Se determinó la eficiencia de remoción para tres valores de velocidad de sedimentación teóricos teniendo en cuenta las curvas de sedimentabilidad mostradas en la Figura 15 y Figura 19.

### Para Caudal de 175 L/s

Cálculo Tipo: Para la Línea 1 de tratamiento

#### ○ Cálculo de C

Asumiendo una Velocidad crítica de sedimentación (Carga superficial) de 0.5 cm/min y a partir de su ecuación de regresión se obtiene el siguiente valor de Fracción remanente

$$C = 0.2981 \ln V_s + 0.8854$$

$$C = 0.2981 \ln 0.5 + 0.8854 = 0.68$$

#### ○ Área bajo la curva

Dividiendo el área en 10 trapecios de 0.04 unidades de altura y uno de 0.02 unidades, se obtuvo la siguiente ecuación para determinar el área total

$$A = 0.04 \times \frac{0.5 + 0.44}{2} + \frac{0.44 + 0.38}{2} + \frac{0.38 + 0.34}{2} + \frac{0.34 + 0.29}{2} + \frac{0.29 + 0.26}{2} + \frac{0.26 + 0.23}{2}$$

$$+ \frac{0.23 + 0.2}{2} + \frac{0.2 + 0.18}{2} + \frac{0.18 + 0.15}{2} + \frac{0.15 + 0.14}{2} + 0.02 \times \frac{0.14 + 0.13}{2}$$

$$A = 0.1231$$

#### ○ Eficiencia de Remoción

$$E = 1 - C + \frac{A}{V_{sc}} = 1 - 0.68 + \frac{0.1231}{0.5}$$

$$E = 0.567 = 56.7\%$$

Tabla A4.8. Eficiencias de remoción para cargas superficiales teóricas con un caudal de 175 L/s

Línea de Tratamiento	Carga superficial (cm/min)	C	Área	Eficiencia
1	0.5	0.68	0.1231	0.56
	0.2	0.41	0.0227	0.71
	0.14	0.30	0.0027	0.72
2	0.5	0.72	0.1086	0.50
	0.2	0.45	0.0188	0.64
	0.14	0.35	0.0054	0.69

**Para caudal de 216 L/s**

Tabla A4.9. Eficiencias de remoción para cargas superficiales teóricas con un caudal de 216 L/s

Línea de Tratamiento	Carga superficial (cm/min)	C	Área	Eficiencia
1	0.5	0.59	0.1069	0.62
	0.2	0.33	0.0192	0.77
	0.14	0.23	0.0056	0.81
2	0.5	0.56	0.086	0.61
	0.2	0.33	0.0184	0.76
	0.14	0.24	0.0052	0.80