

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

"Determinación de curvas de sedimentación utilizando reactor experimental tipo columna"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Carlos Eduardo Cheing Carcelén

Andrés Leonardo Guerrero Cabrera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar mi carrera Universitaria. A mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino. A la Ingeniera Alby Aguilar por su guía y sus consejos para la elaboración de esta tesis y al Ingeniero Julio García, por su ayuda a lo largo de la realización de este trabajo.

Andrés Leonardo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por cada una de las bendiciones brindadas y permitirme llegar hasta este punto de mi vida, con Él todo es posible. Un especial agradecimiento a nuestra directora de tesis la Ing. Alby Aguilar por su constante colaboración y guía para la elaboración de esta tesis. Al Ing. Julio García por su apoyo y aporte de conocimientos en la realización de los ensayos de laboratorio.

Carlos Eduardo

DEDICATORIA

A mi novia Betsabeth, por sus consejos, la motivación, el apoyo y el gran amor que siempre me ha brindado para seguir adelante y alcanzar mi objetivo de convertirme en un profesional.

Andrés Leonardo

DEDICATORIA

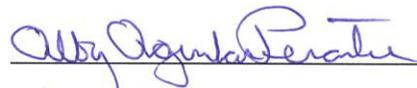
Dedico esta tesis a mis padres quienes han sido mi apoyo incondicional durante toda mi formación académica, gracias a sus consejos, valores inculcados y aliento que han servido de ayuda para cumplir cada uno de mis objetivos trazados.

Carlos Eduardo

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Maria Montoya Freire MSc.
PRESIDENTE



Ing. Alby Aguilar P. MSc.
DIRECTORA DE TESIS



Dr. Mijaíl Arias H.
VOCAL PRINCIPAL

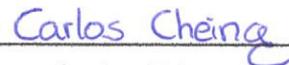
DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en esta Tesis de Grado nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Andrés Leonardo
Guerrero Cabrera



Carlos Eduardo
Cheing Carcelen

RESUMEN

La sedimentación ha sido ampliamente utilizada por el hombre como método primario para el tratamiento del agua. El uso de este mecanismo se ha implementado como base en el proceso de remoción de las partículas coloidales presentes en el agua. Mediante la coagulación y la floculación, como métodos que permiten la generación de partículas de mayor tamaño, se obtienen porcentajes más elevados de elementos removidos del agua mediante la sedimentación.

El estudio de este proceso físico es básico en la formación profesional del Ingeniero Civil, teniendo en consideración que su uso es elemental en el tratamiento del agua.

El presente artículo engloba el uso de un reactor experimental tipo columna para modelar las condiciones en que los sólidos totales se sedimentan dentro de un tanque de sedimentación real, con esto encontrar el porcentaje de remoción de partículas, así como el tiempo óptimo al que se alcanza dicho porcentaje y, con los datos encontrados, elaborar las curvas de sedimentación que nos permitirán observar el comportamiento de asentamiento de los cuerpos presentes en el agua.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la Carrera de Ingeniería Civil de la ESPOL y se utilizó agua proveniente del Lago de la misma.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VIII
INDICE GENERAL ,.....	X
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE FOTOS	XIV
INDICE DE GRÁFICAS	XV
INDICE DE TABLAS	XIX
ABREVIATURAS	XX
SIMBOLOGIA	XXI
CAPITULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación de la Tesis	2
1.3. Problemática	3
1.4. Alcance de la tesis	4
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos	5
CAPITULO II	6
2. LA SEDIMENTACIÓN	6

2.1. El proceso de sedimentación como método de remoción de partículas sedimentables	7
2.2. Tipos de Sedimentación	8
2.2.1. Sedimentación de Partículas Discretas	8
2.2.2. Sedimentación de Partículas Floculantes	13
2.2.3. Sedimentación Retardada o Zonal	18
2.2.4. Sedimentación por Compresión	22
2.3. Proceso de Sedimentación Asistido por Coagulantes	23
2.3.1. Coagulación	23
2.3.2. Coagulantes utilizados en el proceso de sedimentación	24
2.3.3. Floculación	29
2.4. Importancia del Potencial de Hidrógeno (pH) en el proceso de sedimentación con coagulantes	33
2.4.1. Modificadores de pH	34
CAPITULO III	36
3. METODOLOGÍA	36
3.1. Determinación de sitios de recolección de muestras	36
3.2. Proceso de Obtención de muestras	38
3.3. Montaje y puesta en marcha del reactor	39
3.4. Procesos de muestreo en el Reactor	45
3.5. Control de Calidad del Proceso	49
3.6. Ensayos Realizados	51

CAPITULO IV	53
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1. Concentración Inicial de Sólidos totales	53
4.2. Dosis óptima de Sulfato de Aluminio	55
4.2.1. Ensayos a 30 mg/L de Sulfato de Aluminio	56
4.2.2. Ensayos a 50 mg/L de Sulfato de Aluminio	68
4.2.3. Ensayos a 70 mg/L de Sulfato de Aluminio	80
4.3. Porcentaje de Remoción de Sólidos Suspendidos	91
4.3.1. Remoción a 0.40 m de profundidad	92
4.3.2. Remoción a 0.80 m de profundidad	94
4.3.3. Remoción a 1.20 m de profundidad	97
4.3.4. Remoción a 1.60 m de profundidad	99
4.3.5. Curvas de Isoporcentajes de Remoción.....	102
4.4. Tiempo óptimo de Sedimentación	104
4.4.1. Resuspensión de Sólidos	104
4.4.2. Velocidad de Sedimentación.....	105
CAPITULO V	106
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
5.1. Conclusiones	106
5.2. Recomendaciones	107
BIBLIOGRAFÍA	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fueras actuantes sobre una partícula suspendida	9
Figura 2: Esquema de una columna de Sedimentación	14
Figura 3: Grafica de Isoporcentajes de Remoción de una Columna de Sedimentación	16
Figura 4: Esquema idealizado de Sedimentación tipo III	19
Figura 5: Curva de Sedimentación Zonal o Retardada	20
Figura 6: Análisis de Curva de Sedimentación Tipo III	21
Figura 7: Esquema de Interacción Coloide -Al ⁺⁺⁺	26
Figura 8: Efecto del periodo de floculación en la Sedimentación	32
Figura 9: Ubicación del Lago de la Espol	38
Figura 10: Esquema del Reactor empleado	40

INDICE DE FOTOS

Foto 1: Flóculos formados durante el ensayo	41
Foto 2: Compresor empleado para la limpieza del Reactor	42
Foto 3: Recipientes utilizados para el proceso de secado de las muestras	42
Foto 4: Ingreso de valores en base de datos	43
Foto 5: Vasos de precipitación graduados para extracción de Muestras	43
Foto 6: Balanza empleada en los ensayos	44
Foto 7: Tanque con muestra de agua	45
Foto 8: Sulfato de aluminio	46
Foto 9: Mezclado manual, lento 1 minuto; rápido, 10 minutos	47
Foto 10: Vasos de precipitación luego de tomar las muestras del reactor	47
Foto 11: Horno empleado para el proceso de secado de Muestras	48
Foto 12: Balanza con estructura aislante	50
Foto 13: Tirilla empleadas para medir el pH.	52

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Relación entre número de Reynolds y el Coeficiente de Arrastre	13
Gráfica 2: Grafico de Concentraciones por muestra de agua	54
Gráfica 3: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 1)	57
Gráfica 4: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 1)	57
Gráfica 5: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 1)	58
Gráfica 6: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 1)	59
Gráfica 7: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 2)	61
Gráfica 8: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 2)	61
Gráfica 9: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 2)	62
Gráfica 10: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 2)	63
Gráfica 11: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 3)	65
Gráfica 12: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 3)	65
Gráfica 13: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 3)	66
Gráfica 14: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 3)	67
Gráfica 15: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de	

0.40 m (Ensayo No. 4)	69
Gráfica 16: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 4)	69
Gráfica 17: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 4)	70
Gráfica 18: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 4)	71
Gráfica 19: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 5)	73
Gráfica 20: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 5)	74
Gráfica 21: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 5)	74
Gráfica 22: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 5)	75
Gráfica 23: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 6)	77
Gráfica 24: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 6)	77
Gráfica 25: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 6)	78
Gráfica 26: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 6)	78
Gráfica 27: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 7)	81
Gráfica 28: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 7)	81
Gráfica 29: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 7)	82
Gráfica 30: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de	

1.60 m (Ensayo No. 7)	83
Gráfica 31: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 8)	85
Gráfica 32: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 8)	85
Gráfica 33: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 8)	86
Gráfica 34: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 8)	86
Gráfica 35: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 9)	88
Gráfica 36: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 9)	89
Gráfica 37: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 9)	89
Gráfica 38: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 9)	90
Gráfica 39: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L	91
Gráfica 40: Gráfica t vs % de Remoción, para un profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L	91
Gráfica 41: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 70 mg/L	92
Gráfica 42: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio	93
Gráfica 43: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L	94
Gráfica 44: Gráfica t vs % de Remoción, para un profundidad de 0.80 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L	94
Gráfica 45: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de	

0.80 m y una dosis de sulfato de 70 mg/L	95
Gráfica 46: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio	95
Gráfica 47: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L	96
Gráfica 48: Gráfica t vs % de Remoción, para un profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L	96
Gráfica 49: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 70 mg/L	97
Gráfica 50: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio	97
Gráfica 51: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L	99
Gráfica 52: Gráfica t vs % de Remoción, para un profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L	99
Gráfica 53: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 70 mg/L	100
Gráfica 54: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio	101
Gráfica 55: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 30 mg/L de Sulfato de Aluminio.....	102
Gráfica 56: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 50 mg/L de Sulfato de Aluminio.....	103
Gráfica 57: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 50 mg/L de Sulfato de Aluminio.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Concentraciones de S.S en mg/L, obtenidas por cada ensayo de sedimentación	53
Tabla II: Valores de pH obtenidos por muestra de agua	55
Tabla III: Ensayo de Sedimentación No. 1 Dosis de Sulfato de Aluminio 30 mg/L	56
Tabla IV: Ensayo de Sedimentación No.2 Dosis de Sulfato de Aluminio 30 mg/L	60
Tabla V: Ensayo de Sedimentación No.3 Dosis de Sulfato de Aluminio 30 mg/L	64
Tabla VI: Ensayo de Sedimentación No.4 Dosis de Sulfato de Aluminio 50 mg/L	68
Tabla VII: Ensayo de Sedimentación No.5 Dosis de Sulfato de Aluminio 50 mg/L	72
Tabla VIII: Ensayo de Sedimentación No.6 Dosis de Sulfato de Aluminio 50 mg/L	76
Tabla IX: Ensayo de Sedimentación No.7 Dosis de Sulfato de Aluminio 70 mg/L	80
Tabla X: Ensayo de Sedimentación No.8 Dosis de Sulfato de Aluminio 70 mg/L	84
Tabla XI: Ensayo de Sedimentación No.9 Dosis de Sulfato de Aluminio 70 mg/L	87
Tabla XII: Tiempos óptimos de sedimentación por cada punto de toma de muestra	104
Tabla XIII: Velocidades de Sedimentación alcanzados por cada dosis de sulfato de aluminio.....	105

ABREVIATURAS

Re :	número de Reynolds.
Al⁺⁺⁺ :	Catión aluminio III
pH :	potencial de hidrógeno.
FeCl₃ :	cloruro férrico, tricloruro de hierro, cloruro de hierro III.
SO₄⁼ :	Ion sulfato
° C :	grados Celsius.
ESPOL :	Escuela Superior Politécnica del Litoral.

SIMBOLOGIA

kg/m³ :	kilogramos sobre metro cúbico.
m/s² :	metros sobre segundos al cuadrado.
mg/l :	miligramos sobre litro.
m³ :	metro cúbico.
cm :	centímetro.
s :	segundos.
m/s :	metro sobre segundos.
m²/s :	metro cuadrado sobre segundos.
C :	concentración de sólidos suspendidos.
C_o :	concentración inicial de sólidos suspendidos.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los reactores experimentales tipo columna han sido ampliamente utilizados en el pasado como método de investigación y como herramientas académicas para comprender y explicar el proceso de sedimentación en el tratamiento del agua (O'Connor, et al., 2002). Camp (1945) determinó las curvas de sedimentación para una suspensión utilizando la Ley de Stokes, basándose en la sedimentación de partículas discretas. Se han desarrollado estudios los cuales han utilizado columnas de sedimentación a escala, columnas de 1 litro, de las cuales se han determinado características tales como la velocidad de sedimentación, curvas de sedimentación, concentraciones iniciales y finales de sólidos suspendidos.

Los resultados de estos estudios, si bien es cierto han tenido mucha importancia en el análisis y diseño de sedimentadores, se podrían ver mejorados con el uso de reactores de mayores dimensiones en los que se puedan tabular con un mayor grado de exactitud los datos generados experimentalmente.

Tchobanoglous (2000) indica que se obtienen resultados satisfactorios al ensayar muestras de agua en columnas de sedimentación de 150 mm de diámetro y 3 m. de alto, o con una altura igual a la del sedimentador que se desea diseñar.

1.2. Justificación de la tesis

El uso de la sedimentación como método primario para el tratamiento del agua en nuestro medio ha influido directamente en el desarrollo de la presente tesis. El diseño de sedimentadores más eficientes se puede realizar a través del uso de las curvas de sedimentación, pues mediante ellas se obtienen los porcentajes de partículas removidas en un intervalo de tiempo. Así mismo se podrá determinar la dosificación necesaria de coagulante, capaz de aumentar el óptimo desempeño de los sedimentadores.

Se pretende, mediante la siguiente investigación, establecer parámetros de diseño para futuras plantas de tratamiento de agua y que contribuyan a la optimización de las plantas ya existentes.

1.3. Problemática

La ciudad de Guayaquil posee una planta de captación de agua cruda, la cual se encuentra ubicada en el kilómetro 26 de la vía a Daule al norte de Guayaquil. "La toma" como es conocida, tiene una capacidad de potabilización de agua de hasta $17 \text{ m}^3/\text{s}$ (1.4 millones de m^3 por día) (Interagua C. Ltda., 2003). Cada metro cúbico de agua que ingresa hacia La toma es tratada mediante la sedimentación, de ahí la problemática de estudio de esta tesis.

Se tomarán muestras de agua proveniente del lago de la Espol, la cual se preparará para simular las condiciones en las cuales se encuentra el agua del río Daule y se analizará con el fin de obtener datos que nos den una clara idea del proceso de sedimentación al que se encuentran sometidas las partículas totales presentes en el agua. Así mismo se determinará la dosificación de coagulante necesaria para alcanzar la remoción deseada.

1.4. Alcance de la Tesis

El proyecto se desarrollará con una investigación del agua proveniente del lago de la Escuela Superior Politécnica como punto cercano a la ciudad de Guayaquil. De los análisis a realizar se busca determinar las curvas de sedimentación de las partículas coloidales presentes en el cuerpo de agua.

Para el presente estudio, se utilizará el coagulante químico sulfato de aluminio y se determinará, mediante las curvas de isoporcentajes de remoción, la velocidad de sedimentación de las partículas removidas, el tiempo de remoción y la cantidad óptima de coagulante.

También se medirá el potencial del hidrógeno de cada muestra, con el fin de observar si las muestras de aguas se encuentran dentro de los rangos óptimos para el uso del coagulante elegido.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos General

Analizar muestras de agua, utilizando un reactor experimental tipo columna, para determinar la velocidad de sedimentación de las partículas totales presentes en cada muestra. Se plantea que las características establecidas

puedan ser utilizadas para el diseño de futuros sedimentadores en plantas de tratamiento de agua.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de sólidos totales en las muestras de agua y elaborar las curvas de isoporcentajes de remoción, para cada dosificación de coagulante utilizado.
- Determinar la variación de remoción alcanzada utilizando diferentes concentraciones de coagulante.
- Puntualizar los problemas que se puedan encontrar en el proceso experimental, para dar un precedente a futuros ensayos de columnas de sedimentación.

CAPÍTULO 2

2. LA SEDIMENTACIÓN

2.1. El proceso de sedimentación como mecanismo de remoción de partículas sedimentables

La sedimentación es un proceso físico por el cual se extraen partículas en suspensión presentes en el agua, mediante la acción gravitacional. El peso específico de estas partículas tiene que ser mayor al peso específico del agua que va ser tratada. Al tener un mayor peso específico las partículas se moverán hacia abajo, o lo que es lo mismo, se sedimentarán. Mientras, por otro lado, las partículas con un peso específico menor que el agua flotarán.

La sedimentación es un método de purificación del agua, en donde, el agua a ser tratada, es mantenida en reactores por un considerable periodo de tiempo. El agua recorre toda la longitud del reactor con una velocidad relativamente pequeña, lo que genera un virtual estado de reposo del agua dentro de los reactores. Esta relación, entre la sección longitudinal del tanque de sedimentación y la velocidad de traslación del agua, es utilizada para el análisis y diseño de los sedimentadores.

Las partículas sedimentables o partículas con peso específico mayor al peso específico del agua, se moverán a lo largo del tanque de sedimentación, cayendo de forma continua, hasta alcanzar el fondo del sedimentador. Cuando el tamaño de las partículas presentes es muy pequeño, estas flotan en el agua. Para poder sedimentar las partículas que se encuentran flotando es necesario aumentar el tamaño o peso específico de las mismas. Esto se realiza mediante la coagulación y la floculación.

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas en suspensión que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la acción de coagulantes químicos y de la aplicación de energía de mezclado.

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación y consiste en la agitación de la masa coagulada que permite el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar su tamaño y peso, para que se sedimenten con facilidad (Gómez Puentes, 2005).

2.2. Tipos de Sedimentación

2.2.1. Sedimentación de Partículas Discretas

La sedimentación de partículas discretas ocurre cuando, durante todo el proceso de sedimentación, estas no cambian de tamaño, forma o peso (Huisman, 1982). Cuando una partícula es liberada en un fluido, esta se moverá verticalmente hacia abajo, siempre que su densidad sea mayor que la del fluido en la que se encuentra sumergida.

Este tipo de sedimentación se presenta en desarenadores, en los sedimentadores y presedimentadores como paso previo a la coagulación en plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la sedimentación (Vargas, 2004).

Como se presenta en la figura 1, en una partícula en suspensión actúan dos fuerzas, la Fuerza de Flotamiento o Fuerza de Empuje (F_F) y la Fuerza Gravitacional (F_g).

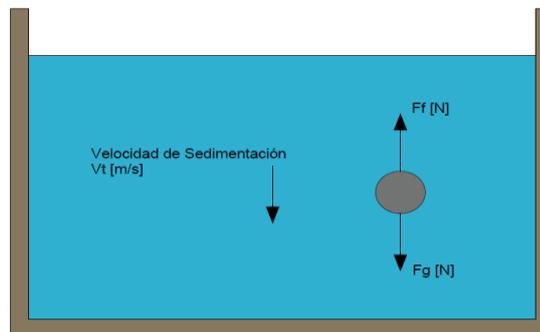


Figura 1: Fuerzas actuantes sobre una Partícula

$$F_F = \rho_w g V_s \quad \text{Ecuación (1)}$$

y

$$F_g = \rho_s g V_s \quad \text{Ecuación (2)}$$

en donde:

$$\rho_w = \text{Densidad del Agua} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho_s = \text{Densidad de la partícula} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$g = \text{Aceleración de la gravedad} \quad [\text{m/s}^2]$$

$$V_s = \text{Volumen de la partícula} \quad [\text{m}^3]$$

La resultante es la fuerza generada por la diferencia de densidades entre la partícula y el agua, y es conocida como Fuerza de Impulsión.

$$\sum F = F_g - F_F$$

Resolviendo la ecuación tenemos:

$$F_i = gV(\rho_s - \rho_w) \quad \text{Ecuación (3)}$$

de la cual:

F_i = Fuerza de Impulsión

A medida que la fuerza de impulsión actúa sobre la partícula, esta se acelerará hasta que la fuerza de arrastre generada en el líquido se iguale a la fuerza de impulso actuante sobre la partícula. Cuando las fuerzas se igualan en magnitud, la partícula empezará a descender con velocidad constante (Ley de Stokes).

Según Newton, la fuerza de arrastre sobre una partícula sumergida en un líquido es:

$$F_d = C_d \frac{\rho_w}{2} v_t^2 A \quad \text{Ecuación (4)}$$

en donde:

C_d :	Coeficiente de Arrastre	adimensional
ρ_w :	Densidad del agua	[kg/m ³]
v_t :	Velocidad Terminal o de Sedimentación	[m/s]
A :	Área proyectada de la partícula en dirección del movimiento	[m ²]

Entonces, volviendo al principio de movimiento uniforme de la partícula, sumatoria de fuerzas igual a cero, tenemos que:

$$(3) = (4)$$

$$F_i = F_d$$

De la anterior igualdad podemos despejar la velocidad de sedimentación:

$$v_t = \sqrt{\frac{2}{C_d} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g \frac{V}{A}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Para el caso particular de partículas esféricas, tenemos que

$A = \frac{\pi}{4} d^2$ y $V = \frac{\pi}{6} d^3$ y reemplazando en la ecuación anterior:

$$v_t = \sqrt{\frac{4}{3C_d} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g d} \quad \text{Ecuación (6)}$$

en donde:

v_t :	Velocidad Terminal o de sedimentación	[m/s]
C_d :	Coefficiente de arrastre	
ρ_s :	Densidad de la Partícula	[kg/m ³]
ρ_w :	Densidad del Agua	[kg/m ³]
g :	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
d :	Diámetro de la partícula	[m]

El coeficiente de arrastre depende del Número de Reynolds, esto quiere decir que depende del tipo de flujo que rodea a la partícula; ya sea este laminar, turbulento o de transición.

$$Re = \frac{v_t d}{\gamma} \quad \text{Ecuación (7)}$$

en la cual:

$$\begin{aligned} v_t: & \text{ Velocidad de sedimentación} && [\text{m/s}] \\ \gamma: & \text{ Viscosidad Cinemática del líquido} && [\text{m}^2/\text{s}] \end{aligned}$$

En los tanques de Sedimentación normalmente ocurre que las partículas se sedimentan en un flujo laminar, lo que significa que el $Re < 1$ y el coeficiente de arrastre está dado por:

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Reemplazando C_d y Re en la ecuación (6), obtenemos la ecuación de Stokes para Flujo Laminar:

$$v_t = \frac{1}{18} \frac{g}{\gamma} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g d^2 \quad \text{Ecuación (9)}$$

A su vez, cuando $Re > 1600$ el flujo que rodea a la partícula es un flujo turbulento y el coeficiente de arrastre es una constante:

$$C_d = 0.40$$

Al reemplazar en la ecuación (6), tenemos que la velocidad de sedimentación para flujo turbulento es:

$$v_t = 1.83 \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g d} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Cuando $1 < Re < 1600$ se conoce que la partícula se encuentra en un flujo de transición y el coeficiente de arrastre no es constante.

Según Fayer, Geyer y Okun (1979), el coeficiente de arrastre para flujo laminar y $Re < 10^4$ puede ser calculado mediante la siguiente ecuación empírica:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad \text{Ecuación (11)}$$

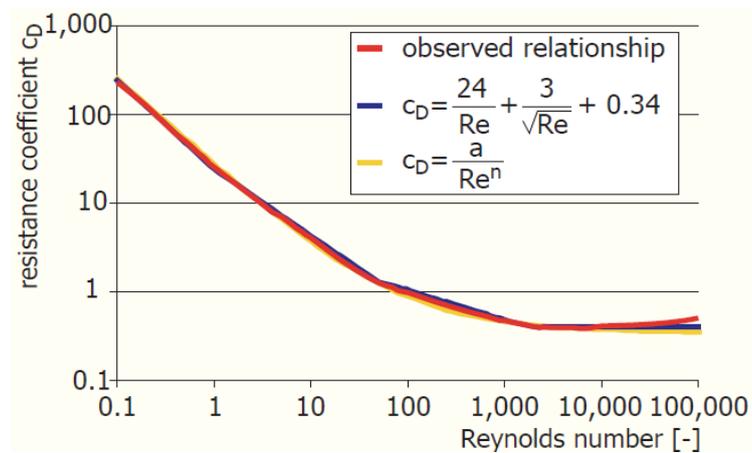


Gráfico 1: Relación entre Número de Reynolds y el Coeficiente de Arrastre

La Gráfica 1 muestra la relación que existe entre el número de Reynolds y el Coeficiente de Arrastre y los diferentes estados de flujos. En el estado de Transición se puede utilizar la ecuación empírica antes mencionada.

2.2.2. Sedimentación de Partículas Floculentas

La sedimentación tipo II ocurre cuando las partículas de mayor tamaño o de mayor densidad se sedimentan a una mayor velocidad que las partículas de menor tamaño, generando que estas colisionen entre sí formando flóculos.

Las partículas al colisionar entre sí van formando agregados, van aumentando de tamaño y, por lo tanto, también van aumentando su velocidad de sedimentación. La velocidad de descenso ya no es constante.

Las Trayectorias ya no son rectilíneas sino que se van curvando. En este caso la Ley de Stokes no puede ser aplicada.

La determinación de una fórmula matemática para calcular la velocidad de sedimentación es muy compleja, no solo por cambio en el tamaño de los flóculos, sino también por el cambio en la forma de los mismos. Tanto la densidad como el volumen de las partículas van cambiando a medida que estas se adhieren unas con otras. La aceleración de la partícula no se anula por ende la velocidad varía a lo largo de la trayectoria.

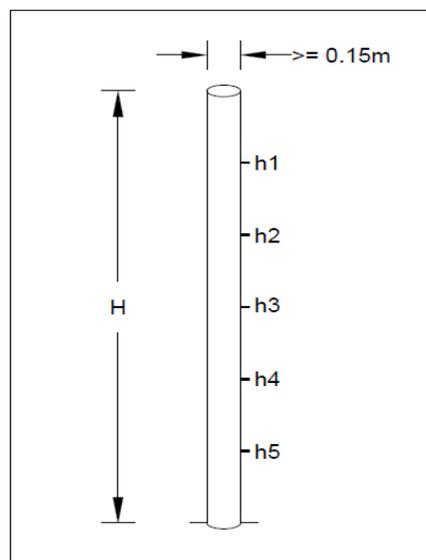


Figura 2: Esquema de una Columna de Sedimentación

Para determinar las características de la sedimentación de partículas floculentas es necesaria la experimentación, se deben realizar ensayos en columnas de sedimentación.

El ensayo consiste en una columna con un diámetro mínimo de 150 a 200 mm., para contrarrestar el efecto de las paredes de la columna, una altura H igual a la del tanque de sedimentación a ser diseñado y puntos de toma de muestras a lo largo de la columna de sedimentación, los cuales deben tener la misma separación h entre sí.

Inicialmente las partículas suspendidas se encuentran bien mezcladas y distribuidas en el líquido, luego se empiezan a sedimentar dentro de la columna. Se toman muestras en cada punto, en intervalos definidos de tiempo, y se determina C/C_0 , en donde C es la concentración de la muestra, mg/l y C_0 es la concentración inicial de la solución, mg/l.

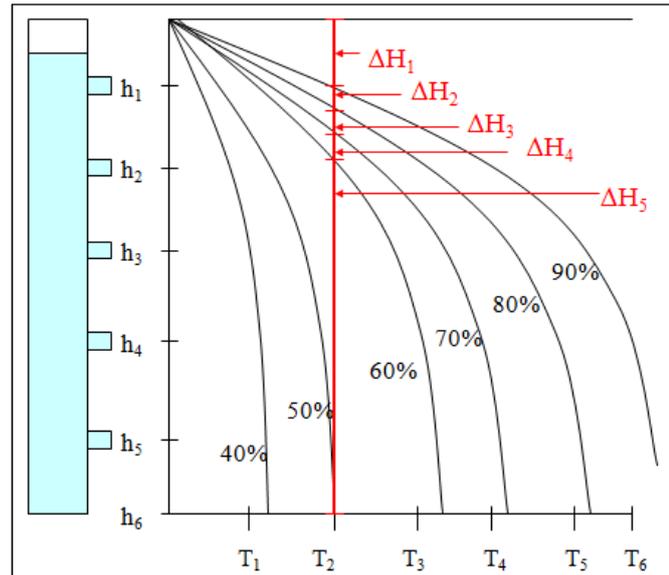


Figura 3: Gráfica de Isoporcentajes de Remoción de una Columna de Sedimentación

Los resultados que se obtienen se expresan en porcentaje de partículas removidas para cada punto de muestreo. Con los valores obtenidos se grafican, como se expresa en la Figura 4, utilizando como eje longitudinal el tiempo de sedimentación y en el eje transversal la profundidad en donde se encuentra ubicado el lugar de toma de muestra. Por interpolación numérica se generan las curvas que contengan todos los valores con un mismo valor de porcentaje de remoción, estas curvas son llamadas curvas de isoporcentajes. Cada curva representa la trayectoria de la fracción de partículas que presentan una misma velocidad de sedimentación y que conduce a la remoción del porcentaje expresado de partículas suspendidas (Valencia Montoya, 1980).

La velocidad de sedimentación o carga superficial de sedimentación se determina mediante:

$$V_t = H/t \quad \text{Ecuación (12)}$$

en donde H es la altura de la columna y t es el tiempo empleado por la fracción de partículas escogida en alcanzar el fondo de la columna.

La fracción de partículas removidas en un tiempo t, utilizando los datos obtenidos en la gráfica, está dada por la fórmula:

$$\%R = \sum_{h=1}^{h=n} \left(\frac{\Delta h_n}{H} \right) * \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right) \quad \text{Ecuación (13)}$$

En donde:

R :	Porcentaje de Partículas Suspendidas Removidas	[%]
n :	Número de curvas de isoporcentajes	
Δh_n :	Distancia entre curvas de isoporcentajes	[m]
H :	Altura total de la Columna	
R_n :	Porcentaje de remoción e la curva n	[%]
R_{n+1} :	Porcentaje de remoción en la curva n+1	[%]

2.2.3. Sedimentación Retardada o Zonal

Cuando la concentración de partículas suspendidas excede un valor de 500 a 700 mg/l., se presenta lo que se conoce como Sedimentación Retardada o Zonal (Valencia Montoya, 1980).

Debido a la gran cantidad de partículas presentes en la suspensión, estas se adhieren unas con otras formando un manto de lodos, el cual se sedimenta como un todo.

La velocidad de sedimentación se ve disminuida, ya que el flujo de agua que se está desplazando hacia arriba atraviesa los pequeños espacios intersticiales entre las partículas. De ahí la denominación de Sedimentación Retardada.

Sobre el manto de lodos se forma una zona clarificada de agua, mientras que las partículas van descendiendo, apareciendo una muy bien delineada zona de interface entre las partículas ya sedimentadas y el manto de lodos, tal como se muestra en la Figura 4.

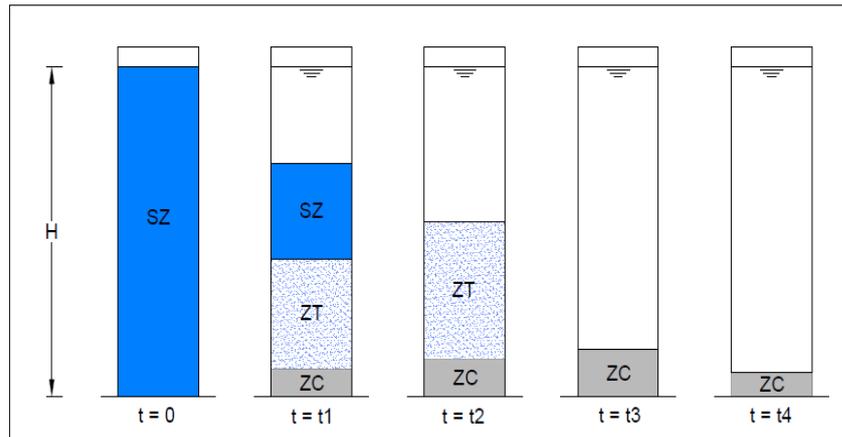


Figura 4: Esquema idealizado de Sedimentación tipo III

Al llenar una columna de sedimentación de diámetro y altura adecuados con una alta concentración de partículas suspendidas, se tiene inicialmente una concentración uniforme en toda la longitud de la columna. En diferentes tiempos se mide la capa superior de lodos y se grafica una curva tal y como se indica en la Figura 5, la cual tiene las siguientes características:

Zona A-B: La separación de esta zona se encuentra muy bien definida y es el lugar en donde las partículas entran en contacto entre sí, seguida por una pequeña zona de decantación por partículas discretas.

Zona B-C: Tiene una pendiente rectilínea, la cual representa la velocidad de sedimentación constante definida por la floculación y la concentración de partículas. A medida que la concentración inicial de partículas aumenta la

velocidad de sedimentación disminuye, por lo que se denomina "Sedimentación Retardada".

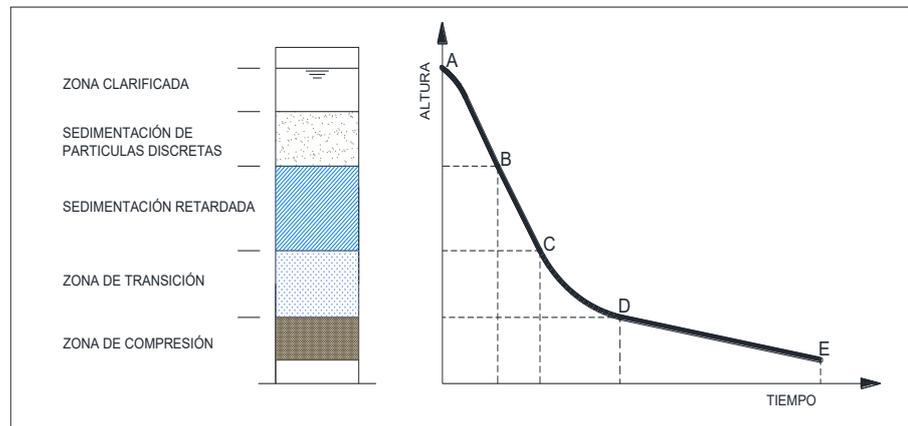


Figura 5: Curva de Sedimentación Zonal o Retardada

Zona C-D: Esta zona es denominada de "Transición", debida a que aquí se produce la disminución de la velocidad de sedimentación, debido al flujo ascendente de agua que debe pasar por los espacios intersticiales entre las partículas.

Zona D-E: En esta zona no ocurre más sedimentación y las partículas solo caen por compresión de unas con otras, generando la eliminación del agua intersticial.

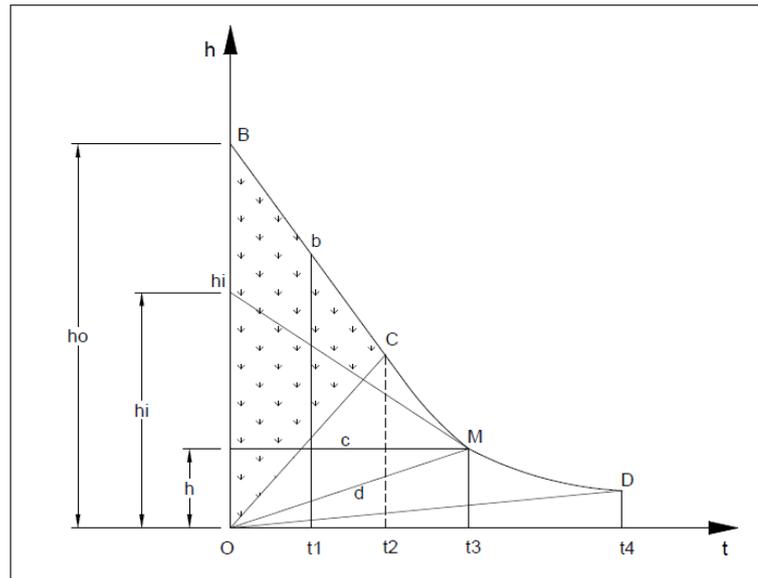


Figura 6 - Análisis de Curva de Sedimentación Tipo III

Si consideramos, por simplicidad, que al sedimentarse una solución con un alta concentración de sólidos suspendidos, no se produce la zona A-B, se obtienen la altura de separación de interfase como se indicada en la Figura 7.

En el triángulo BOC, la concentración y la velocidad de sedimentación se mantienen constantes e iguales a los valores iniciales en el punto B.

En el triángulo COD, las curvas de equiconcentración son rectas que pasan por el origen, lo que significa que, desde los primeros momentos de la sedimentación, las capas más próximas al fondo chocan entre sí y pasan por todas las concentraciones comprendidas entre la concentración inicial y la

correspondiente al punto D, este es el principio de la compresión (Vargas, 2004).

Para calcular la concentración en el punto M en el tramo CD, se traza la tangente a M, la cual corta el eje de las ordenadas en el punto h_i .

La altura h_i permite calcular la concentración C_i , correspondiente al punto M.

$$C_i = C_0 \frac{h_0}{h_i} \quad \text{Ecuación (14)}$$

A la cual le corresponde una velocidad de sedimentación $V_i = dh/dt$, que es la pendiente de la recta Mhi.

La concentración media de las partículas suspendidas a lo largo de la altura h será:

$$C = C_0 \frac{h_0}{h} \quad \text{Ecuación (15)}$$

2.2.4. Sedimentación por Compresión

Una vez que los sólidos suspendidos han alcanzado el fondo del reactor se genera una zona de compresión, como se muestra en la figura 6, la cual presenta una muy alta concentración de partículas sedimentadas, a partir de

6000 mg/L (I. Tejero, 2007). El peso de las capas superiores comprime las capas inferiores de la zona, provocando que el agua entre las partículas salga de la zona de compresión.

2.3. Procesos de Sedimentación Asistido con coagulantes

2.3.1. Coagulación

La coagulación es la desestabilización química de una dispersión coloidal, que permite la remoción de los sólidos suspendidos o disueltos en el agua, por medio de la sedimentación y la filtración (Westerhoff, 1968).

El objetivo de la coagulación, dentro del proceso de sedimentación, es el de cambiar las propiedades de los elementos en una solución, es decir de los coloides y partículas disueltas presentes en el agua, de manera que se decanten con mayor facilidad.

Al agregar coagulantes químicos en una suspensión, este reacciona con las partículas suspendidas o disueltas, neutralizando las cargas de los coloides de manera que puedan aglomerarse. Esta reacción ocurre en fracciones de segundo.

Los coloides aglomerados, a los cuales se los conoce como *Flóculos*, son de mayor tamaño, de mayor peso específico, por lo que sedimentarán con una mayor velocidad.

2.3.2. Coagulantes utilizados en el proceso de sedimentación

Los coagulantes son reactivos químicos los cuales, al ser agregados al agua, desestabilizan las partículas coloidales en una dispersión.

El principal objetivo de los coagulantes es el de neutralizar las fuerzas electroestáticas de los coloides.

Los coagulantes más utilizados son las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados. Las sales más utilizadas en el tratamiento de agua son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso y el sulfato férrico.

2.3.2.1. Sulfato de Aluminio

El sulfato de aluminio es el coagulante comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas. Se puede encontrar en forma sólida y líquida. Su forma sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diversos tamaños y en polvo. La formula comercial es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$.

El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH se encuentra entre los valores de 2 y 3.8, según la relación molar sulfato/óxido de aluminio (Vargas, 2004).

Cuando se agregan soluciones de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en Al^{+++} y SO_4^- . El Al^{+++} puede combinarse con las partículas coloidales cargadas negativamente para neutralizar parte de la carga.

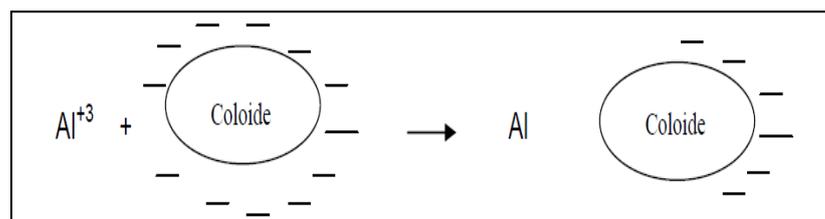
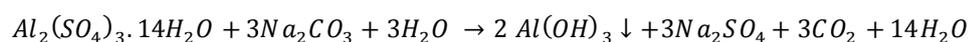


Figura 7: Esquema de Interacción Coloide - Al^{+++}
Fuente: (Castrillón & Giraldo, 2012)

El sulfato de aluminio debe ser distribuido en toda la masa de agua rápidamente, con el fin de que se logre un contacto con todas las partículas coloidales y no se presente la formación de especies no deseadas.

Si la alcalinidad natural del agua no es suficiente para reaccionar con el alumbre, se requiere añadir la alcalinidad necesaria. Esto se realiza agregando cal o carbonato de sodio.



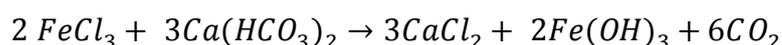
La dosis de sulfato de aluminio que se debe agregar al agua natural, dependiendo del pH de la misma, varía entre el 5 a 50 mg/l. El pH efectivo para la coagulación con alumbre es de 5.5 a 8 (Castrillón & Giraldo, 2012).

2.3.2.2. Cloruro Férrico

Se presenta en forma líquida o sólida, siendo su forma líquida la más utilizada en el tratamiento de agua. Como disolución acuosa contiene un 40-45% de $FeCl_3$ y, esta, es de color pardo, algo viscoso, mientras que en estado sólido aparece en forma cristalina, granular o en polvo.

En el tratamiento del agua, cuando el cloruro férrico se utiliza como coagulante y reacciona con el agua, actúa sobre los bicarbonatos presentes hasta formar hidróxido férrico precipitado a través de sucesivas reacciones de hidrólisis, donde predominan las especies iónicas Fe^{3+} , $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$, $Fe_2(OH)_2^{4+}$, $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_4^-$ y $Fe(OH)_6^{3-}$ (Sánchez Lavado, 2007).

La reacción general es:

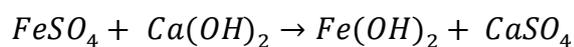


La dosificación necesaria, según la calidad del agua cruda y de la utilidad que se le vaya a dar, es variable de entre 30- 80 mg/L para potabilización del agua: mientras que se encuentra en un rango más elevado para aguas residuales el que va de 100- 1000 mg/l (Sánchez Lavado, 2007).

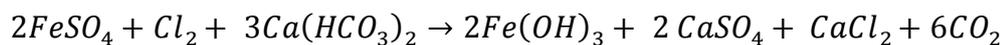
2.3.2.3. Sulfato Ferroso

El sulfato ferroso es un coagulante químico utilizado en el tratamiento de aguas, el cual se presenta en forma de polvo de color verde muy soluble y tiene una masa volumétrica aparente de 900 kg/m³. Su fórmula comercial es $Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$.

Se usa generalmente con la cal o con el cloro para realizar una coagulación efectiva. La reacción generada con la cal es la siguiente:



Mientras que la reacción con el cloro es:

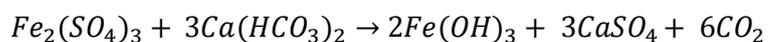


2.3.2.4. Sulfato Férrico

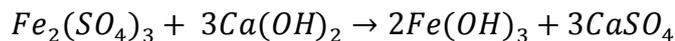
El sulfato férrico es un polvo blanco verdoso, muy soluble en el agua, el cual posee una masa volumétrica aparente de 1000 kg/m³.

Funciona de forma estable en un intervalo de pH de 4 a 11 y puede reaccionar con la alcalinidad del agua o con materiales alcalinos añadidos como la cal. Las reacciones que se generan al agregar este coagulante son las siguientes:

Con la alcalinidad:



Mientras que con la cal tenemos:



2.3.3. Floculación

Es la etapa posterior a la coagulación, en donde se realiza un mezclado lento para permitir que los flóculos formados en la coagulación entren en contactos unos con otros, con el fin de aumentar su tamaño y por consiguiente su peso, logrando que se sedimenten con una mayor facilidad.

Existen dos tipos de floculación, la floculación pericinética y la ortocinética.

2.3.3.1. Floculación Pericinética

Este tipo de floculación se da por el movimiento natural de las moléculas de agua; ocurre en los primeros momentos del proceso, en los primeros 6 a 10 s. (Castrillón & Giraldo, 2012). Es demasiado lenta, solo influye en partículas de menor tamaño que un micrón y ocurre por el movimiento browniano de las moléculas de agua inducida por la energía térmica.

2.3.3.2. Floculación Ortocinética

Se genera por la inducción de energía externa a la masa del agua; produce gradientes de velocidad los cuales generan que las partículas se muevan en diferentes direcciones y velocidades (Gómez Puentes, 2005), provocando que entren en contacto con mayor facilidad.

2.3.3.3. Factores que influyen en la Floculación

La floculación por ser el proceso siguiente a la coagulación, es muy sensible a las características físico-químicas del agua. Entre los factores que influyen en el proceso de floculación tenemos:

- a. Concentración y naturaleza de las partículas
- b. Tiempo de detención
- c. Gradiente de Velocidad

Concentración y naturaleza de las partículas

La concentración de las partículas tiene una gran importancia en el proceso de floculación, ya que como se podría esperar, a una mayor concentración mayor formación de flóculos. Todos los modelos matemáticos que explican este proceso determinar que existe una relación proporcional entre la

velocidad de formación de flóculos y la concentración de partículas en el agua (Vargas, 2004).

La presencia de iones en el agua puede influir en las características físico-químicas del sistema, por ejemplo los iones que se vean directamente influenciados por el pH del agua (como el ion SO_4^-), pueden provocar que cambie el tiempo de floculación.

Tiempo de Detención

El tiempo en que el agua se encuentre en el floculador es de mucha importancia para obtener una mayor eficiencia en el partículas es proporcional al tiempo que estas se encuentran en el reactor. Este tiempo debe encontrarse próximo al tiempo óptimo de detención, el cual se determina por el ensayo de jarras (Castrillón & Giraldo, 2012).

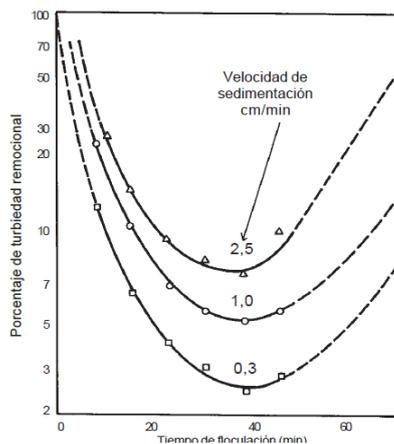


Figura 8: Efecto del periodo de floculación en la sedimentación
Fuente: (Vargas, 2004)

En la Figura 8 podemos observar que, de acuerdo a ensayos realizados, el tiempo óptimo para la floculación es de alrededor de 37 minutos. Cuando el tiempo es inferior o superior al tiempo óptimo se obtienen un porcentaje de remoción menor al deseado.

Gradiente de velocidad

Este factor es muy importante en la formación y mantenimiento de los flóculos ya formados. Un mayor gradiente de velocidad favorece el aumento de tamaño de los flóculos; a medida que estos crecen, las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre ellos también crecen. Por tal razón el gradiente de velocidad posee un límite máximo, para evitar la ruptura de los flóculos.

Se ha establecido que los floculadores deben tener compartimientos con diferentes gradientes de velocidad para aumentar la eficiencia del proceso.

2.4. Importancia del Potencial de Hidrógeno (pH) en el proceso de sedimentación asistido con coagulantes.

El pH es la propiedad más importante a tomarse en cuenta en el proceso de coagulación. Su importancia se resume en la velocidad de formación de flóculos, puesto que afecta a los precipitados formados por el hierro y el aluminio (Castrillón & Giraldo, 2012).

La concentración del ion hidrógeno se mide generalmente con conocidos como pH metros. También se pueden utilizar soluciones y papeles indicadores que cambian de color a diferentes valores de pH (Tchobanoglous & Crites, 2000).

El pH durante la coagulación tiene profundo impacto en la efectividad del proceso de desestabilización. El pH controla la especiación del coagulante, así como su solubilidad y también afecta la especiación del contaminante. Un agua con alcalinidad muy elevada requerirá de excesivas cantidades de coagulante para disminuir el pH a rangos óptimos. Para sales de aluminio el rango óptimo de pH va desde 6 a 7, mientras que para las sales de hierro se

encuentra entre 5.5 a 6.5 (United States Environmental Protection Agency, 2014).

2.4.1. Modificadores de pH.

Para lograr una mayor efectividad en el proceso de coagulación se necesita que los valores de pH se encuentren en rangos óptimos para cada tipo de coagulante. Entre los compuestos químicos utilizados para regular la alcalinidad o el pH del agua se encuentran:

- a. Hidróxido de Calcio.- Es utilizado para elevar la alcalinidad del agua. Se obtiene de apagar la cal viva (óxido de calcio) con agua. Su concentración está entre el 82 y 99%. Es poco soluble en agua y su solubilidad disminuye cuando aumenta la temperatura.

- b. Carbonato de Sodio.- Es un polvo blanco de masa volumétrica aparente que va desde 500 a 700 kg/m³. Su solubilidad es bastante baja, la cual es aproximadamente 100 mg/l a 20° C de temperatura.

- c. Bicarbonato Sódico.- Es, también, un regulador de alcalinidad, con una masa volumétrica variable que va desde 800 a 1200 kg/m³ y con una solubilidad baja de 90 g/l a 20° C.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Determinación del sitio de recolección de muestras.

Para este proyecto de tesis se decidió usar un cuerpo de agua existente. No se procedió a analizar muestras preparadas. Por lo tanto el agua analizada tiene las características propias de un cuerpo de agua natural.

Es por eso que se eligió el lago artificial de la ESPOL ubicado en el Campus Gustavo Galindo junto a la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, el cual a su vez nos facilitó accesibilidad y permisos para realizar la toma de muestras. Este lago cuenta con las características principales de un lago de bosque tropical.

Es un lago artificial – oligotrófico que tiene una extensión de 6.55 has. El lago se encuentra en la cota 77 y su entorno oscila entre la cota 77 y la 105.

Las características del Lago son:

SUELO: - De origen residual y transportado.

- Relieves no mayores a los 105 metros.
- suelo del lago impermeable y limo-arcilloso.
- Sedimento muy fino.

AGUA: - temperatura varía entre los 21° C y los 23° C

- Superficie 43100 m²,
- Perímetro 1575 m
- Volumen 350000 m³ (promedio anual)
- En verano el nivel del agua baja de 1 m a 1.20 m.
- El pH tiene un rasgo sobre los 7.5.

ATMOSFERA: - Las temperaturas más altas, en invierno: 38° C.

- Las temperaturas más bajas, en verano: 18.5° C. (Cadena & Yanez, 2002)

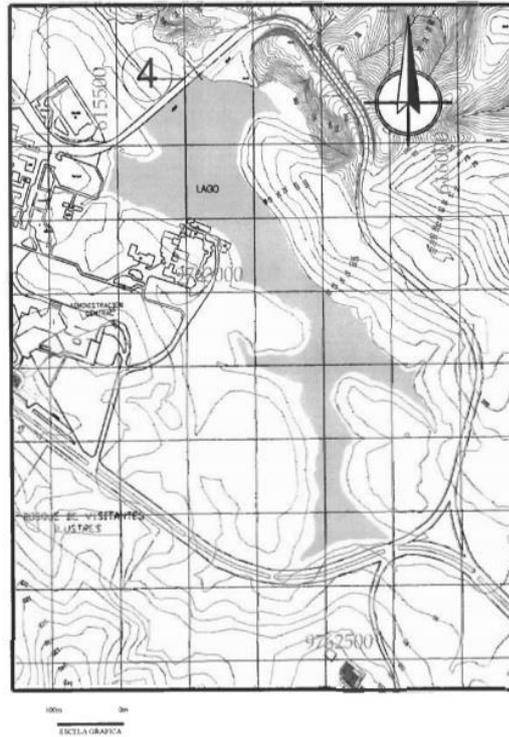


Figura 9: Ubicación del Lago de la Espol.
Fuente: (Cadena & Yanez, 2002)

3.2. Proceso de obtención de muestras

Luego de haber determinado el cuerpo de agua objeto de nuestro estudio, se procede a realizar la obtención de las muestras, para lo cual se requirió de:

- Un tanque de 20 galones de capacidad.
- Un balde
- Botas de caucho.

Se ingresó al lago un metro y medio aproximadamente medido desde la orilla medio inicia el cuerpo de agua y con la ayuda del balde se remueve el agua para poder tomar una muestra más homogénea y representativa de lo que en el lago se encuentra, con la finalidad de obtener resultados los más precisos y reales posibles en nuestro ensayo, esta agua es depositada en el tanque y dicho procedimiento se repite hasta tener al máximo de capacidad el tanque.

La muestra fue transportada con el debido cuidado hacia el lugar donde se realizaran los ensayos, en este caso el laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

3.3. Montaje y puesta en marcha del reactor

El reactor a emplear para este proyecto de tesis tiene 2 metros de altura y una sección transversal Cuadrada de 15cm x 15cm. Está elaborado en fibra de vidrio casi en su totalidad y en dos de sus caras cuenta con una franja de acetato a lo largo de su cuerpo, lo cual permitió observar lo que sucedió en el reactor en cualquier instante del tiempo durante el cual se realizaron los ensayos. Este reactor está provisto de 4 puntos de toma de muestra los cuales consiste en valvulas colocadas a 40 cm de separación la una de la otra.

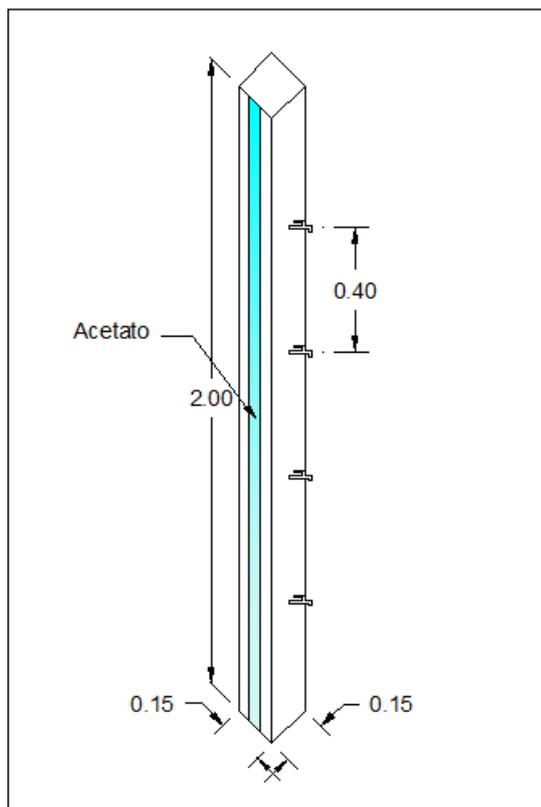


Figura 10: Esquema del Reactor empleado

Durante el ensayo el reactor fue llenado con la muestra de agua a ensayar, lo cual produjo un peso considerable sobre su base, por lo que este fue colocado sobre una superficie plana para evitar daños en el mismo y situaciones inesperadas. Para esto se hace uso de una cerámica de 30x30cm. Además fue necesario asegurar que el reactor se encontraba debidamente aplomado para lo cual se empleó un nivel tubular de mano.

Para nuestro proyecto de tesis es primordial poder visualizar lo que va ocurriendo en el transcurso del ensayo de esa manera poder tener una idea mucho más clara de lo que sucede con las partículas durante el proceso por

lo cual es preciso ubicar a el reactor donde haya una buena fuente de luminosidad.



Foto 1: Flóculos formados durante el ensayo.

El ensayo a realizarse requiere de mucha precisión como consecuencia de esto es indispensable comprobar que el reactor se encuentre libre de desperdicios o alguna materia que pueda afectar el ensayo en el momento de medir las diferentes concentraciones, para esto se lo debe limpiar con agua a presión por lo que se usó un compresor de agua como el que se aprecia en la imagen, a su vez esto sirve para comprobar que no exista filtraciones en el cuerpo del reactor y de la misma manera por ninguna de sus valvulas.



Foto 2: Compresor empleado para la limpieza del reactor

Se procedió a limpiar, pesar y etiquetar cada uno de los 25 recipientes de aluminio en donde se colocaron las muestras que luego serán llevadas al horno para lo cual se empleó una balanza digital marca Ohaus con 3 dígitos de precisión. Cada uno de estos pesos es archivado en una hoja de Excel con su respectiva identificación.



Foto 3: Recipientes utilizados para el proceso de secado de las muestras.



Foto 4: Ingreso de Valores en base de datos

Además de los materiales antes mencionados se necesitaron 4 vasos de precipitación de 200 ml debidamente graduados y una pipeta con su respectiva pera, siempre asegurándose de la limpieza de los materiales para no afectar el ensayo. Estos vasos fueron empleados para la recolección de la muestra de cada una de las 4 llaves, y por el hecho de estar provistos de graduación esto ayudó a tener menos desperdicio de la muestra tomada.



Foto 5: Vasos de precipitación graduados para extracción de muestras.

Para este proyecto de tesis se ha seleccionado el sulfato de aluminio como coagulante para acelerar el proceso de sedimentación. Para los ensayos realizados se empleó diferentes concentraciones de coagulante, las cuales son 30mg/l, 50mg/l y 70mg/l.

Se procedió a pesar la concentración a emplearse según sea el caso.



Foto 6: Balanza Empleada en los ensayos

Luego de haber realizado todo lo mencionado anteriormente, se procedió a llenar el reactor con el agua en estudio. Al mismo tiempo que se ejecuta el llenado del reactor se debe continuar mezclando para evitar que las partículas empiecen el proceso de sedimentación para lo cual usamos un tubo de 1/2 pulgada de pvc de 2.5m de altura.



Foto 7: Tanque con muestras de agua.

3.4. Procesos de muestreo en el reactor

Para empezar con el proceso de muestreo, con el reactor totalmente lleno a su altura de ensayo y aun sin agregar el floculante se realiza la primera toma de muestra la cual denominamos de control, con un vaso de precipitación se toman muestras de las valvulas centrales, 100ml de la segunda valvulas y 100ml de la tercera valvulas, obteniendo así los primeros 200ml de muestra. El agua se trasvasó al recipiente debidamente identificado y se lo lleva a secar al horno a una temperatura de 100° C.

Una vez que ha sido obtenida la muestra de control, de donde se obtuvo la concentración inicial de partículas, se procedió a agregar el sulfato de aluminio y al mismo tiempo se empezó a cronometrar el ensayo.



Foto 8: Sulfato de aluminio.

Inmediatamente de agregado el coagulante se realizó un mezclado rápido de forma manual durante un minuto con la ayuda del tubo de pvc, esto facilita que el sulfato se distribuya por todo el reactor. Pasado dicho tiempo se continuó con un mezclado lento durante diez minutos el cual sirve para ayudar a las partículas a formar flóculos, simulando así el proceso de floculación. Luego de esto se dejó sedimentar el agua durante diez minutos y luego se procedió a tomar las primeras cuatro muestras con floculante de cada una de las válvulas de las que está provista el reactor.



Foto 9: Mezclado Manual, lento 1 minuto, rápido 10 minutos.

La toma de muestras se realizó durante 10 segundos, para así evitar dentro de lo posible turbulencias en el reactor. Se colocaron los vasos de precipitación sobre un mesón, se retiraron los excesos con la pipeta. Se mezcló la muestra en cada vaso de precipitación y se trasvasó a los recipientes para luego llevarlos al horno. Se procedió a lavar los vasos de precipitación para dejarlos preparados para la siguiente toma.



Foto 10: Vasos de precipitación luego de tomar las muestras del reactor

Las muestras fueron secadas en el horno a una temperatura de 100°C teniendo un tiempo de duración de aproximadamente 6 horas este proceso.



Foto 11: Horno empleado para el proceso de secado de las muestras.

Este procedimiento se repitió cada 10 minutos hasta completar la hora de ensayo, obteniendo así 5 muestras por cada altura, dando un total de 20 muestras.

Luego de haber secado las muestras en el horno pudimos observar los sólidos totales presentes en el agua, para obtener el peso de estos llevamos a la balanza el recipiente recién salido del horno con los sólidos e incluimos este dato en la tabla de Excel elaborada en el inicio del ensayo, para una mejor comprensión le llamaremos a este valor “A”. Ya con estos valores en

nuestra base de datos procedimos a restar el peso del recipiente que fue tomado antes de iniciar los ensayos del valor "A" recién obtenido, dando como resultado el peso de los sólidos, este valor se lo divide para 0.2, que es la cantidad de litros que contiene el recipiente de muestra, lo cual da como resultado la concentración de los sólidos totales en mg/l. Este mismo procedimiento se lo realiza con cada una de las muestras tomadas durante los ensayos.

3.5. Control de calidad del proceso

Durante la ejecución de los ensayos se hizo fundamental tener varios cuidados para lograr alcanzar resultados confiables, entre los cuales tenemos el aseo constante de cada uno de los elementos antes de usarlos, esto es debido a que trabajamos con pesos muy bajos y el agregar partículas externas a el ensayo podría marcar una gran diferencia.

Mientras se realizó el pesaje de los recipientes y coagulante a emplearse se usó una balanza muy sensible para poder medir los pesos bajos con los que trabajamos, esta viene provista con una estructura que aísla el objeto a pesarse de agentes externos, como se puede apreciar en la figura, arrojando así resultados veraces y exactos.



Foto 12: Balanza con estructura aislante.

Otro de los cuidados que se deben tener durante el ensayo es el tiempo en que se debe tomar la muestra para lo cual empleamos un cronometro digital, siendo este un factor esencial en el momento de determinar las curvas de sedimentación el cual es el objeto de estudio de este proyecto de tesis. Además hay que considerar la importancia de la velocidad con la que se toma la muestra, a mayor velocidad de llenado se formaban turbulencias lo que pudo ser disminuido visiblemente bajando dicha velocidad, por lo cual empleamos un tiempo de 10 segundos para este proceso.

Antes de trasvasar la muestras a los recipientes que serán llevados a el horno hay que asegurarse que estos cuenten con el volumen determinado para nuestro ensayo, para este proyecto de tesis trabajamos con vasos de precipitación de 200 ml lo cual ayuda la medición, de no ser así en el momento de calcular la concentración de solidos tendríamos datos erróneos,

o para evitar verificar dicho volumen tendríamos que medir el volumen de cada muestra tomada, apuntarlo para luego emplearlo teniendo así un total de 25 volúmenes de muestra siendo este método carente de ingenio y practicidad.

Una de las consideraciones de mayor cuidado que hay que tener presente es el correcto mezclado inicial, el cual consiste en un mezclado rápido y uno lento como ya fue explicado en el subcapítulo 3.4, ya que de esto depende que el ensayo nos provea de resultados veraces.

3.6. Ensayos realizados

Para este proyecto de tesis se ha considerado 3 concentraciones de sulfato de aluminio como ya se lo ha mencionado anteriormente:

- 30mg/l
- 50mg/l
- 70mg/l

Por cada una de las concentraciones de sulfato de aluminio seleccionado se realizan 3 ensayos de sedimentación usando el reactor experimental tipo columna, cada uno de estos ensayos tiene un tiempo de duración de 60

minutos, además por cada concentración se midió el Potencial de Hidrógeno con la ayuda de las tiras de indicador de pH.

Para medir el potencial de hidrógeno de cada uno de los ensayos primero se agregó el sulfato de aluminio, después se introdujo las tiras de indicador de pH en la muestra de agua y se retiró de manera inmediata, pasado 40 segundos se comparó la tirilla con los colores que se encuentran en el envase de las mismas, según el tono que esta adquiriera se puede observar su potencial de hidrógeno.



Foto 13: Tirillas empleadas para medir el PH.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

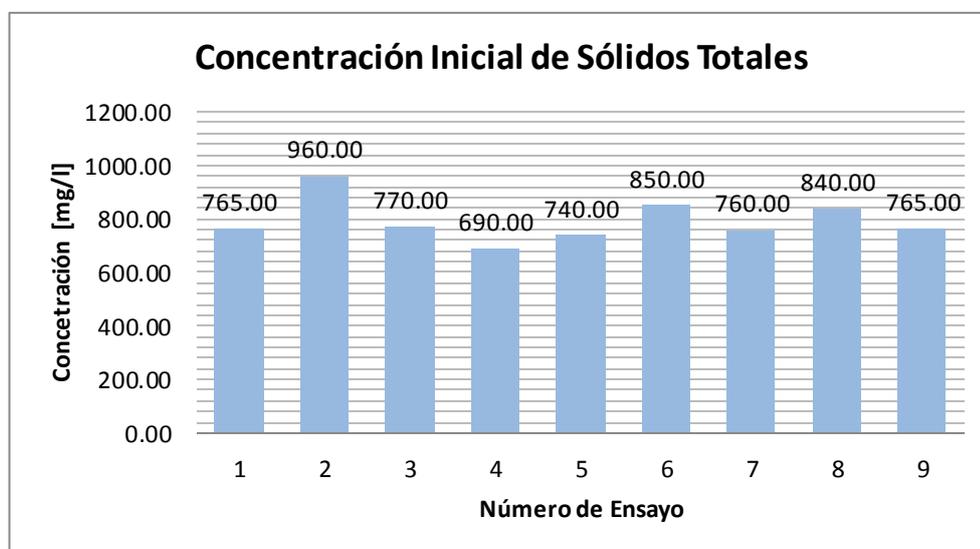
4.1. Concentración Inicial de Sólidos Totales

Luego de las mediciones realizadas a las muestras tomadas del campo, se obtuvo la Concentración de Sólidos Totales presentes en el cuerpo de agua a estudiar. Los resultados de cada medición fueron los siguientes:

Tabla I: Concentraciones Iniciales de S.T. en mg/l, obtenidas por cada ensayo de sedimentación.

Ensayo	C ₀ [mg/l]
1	765.00
2	960.00
3	770.00
4	690.00
5	740.00
6	850.00
7	760.00
8	840.00
9	765.00

De acuerdo a los datos obtenidos podemos elaborar el gráfico de la Gráfica 1, en el cual observamos las concentraciones iniciales que se encontraron en las muestras de agua analizadas.



Gráfica 2: Gráfico de concentraciones por muestra de agua.

De la Gráfica anterior se puede observar que los valores de las concentraciones iniciales se encuentran en un rango entre 740 a 840 mg/l. Se ha procedido a eliminar el valor máximo encontrado que fue de 960 mg/l y el valor mínimo que se encontró en el orden de los 640 mg/l. Esta acción se realiza para eliminar cualquier tipo de error que se haya cometido en el momento del muestreo, asegurándose así que las concentraciones sean representativas a las condiciones en las que se encontrarían al estar concentradas dentro del cuerpo de agua.

La concentración inicial media encontrada fue de 784.3 mg/l de sólidos suspendidos, lo que determina la alta turbidez que se pudo observar en cada muestra de agua.

4.2. Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio

Es conocido que la coagulación depende del pH que presente el agua, por ello para poder determinar una dosis óptima de coagulante se requiere medir este parámetro.

Se realizó la medición del pH a tres muestras de agua tomadas del cuerpo de agua y se obtuvo los siguientes datos:

Tabla II: Valores de pH obtenidos por muestra de agua

Muestra	pH
1	6.8
2	6.7
3	6.8

De acuerdo a los valores de la tabla 2, vemos que el valor medio de pH es de 6.8, el cual se encuentra dentro de los parámetros establecidos para el uso del Sulfato de Aluminio como coagulante.

4.2.1. Ensayos con 30 mg/l de Sulfato de Aluminio.

Una vez realizadas las pruebas con la dosis de coagulante detallada se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla III: Ensayo de Sedimentación No. 1 Dosis de Sulfato de Aluminio 30mg/l.

Recipientes	Altura de Toma de Muestra	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			72.808	72.655	153.000	765.00
29	0.4	10	67.574	67.538	36.000	180.00
30	0.8		68.572	68.525	47.000	235.00
31	1.2		71.067	71.005	62.000	310.00
32	1.6		70.864	70.795	69.000	345.00
33	0.4	20	65.679	65.636	43.000	215.00
34	0.8		66.658	66.621	37.000	185.00
35	1.2		71.438	71.396	42.000	210.00
36	1.6		71.969	71.923	46.000	230.00
37	0.4	30	68.133	68.081	52.000	260.00
38	0.8		69.557	69.518	39.000	195.00
39	1.2		70.830	70.79	40.000	200.00
40	1.6		71.662	71.622	40.000	200.00
41	0.4	40	70.334	70.295	39.000	195.00
42	0.8		70.904	70.856	48.000	240.00
43	1.2		65.613	65.563	50.000	250.00
44	1.6		70.188	70.142	46.000	230.00
45	0.4	50	70.251	70.2	51.000	255.00
46	0.8		71.392	71.345	47.000	235.00
47	1.2		70.497	70.444	53.000	265.00
48	1.6		71.243	71.202	41.000	205.00

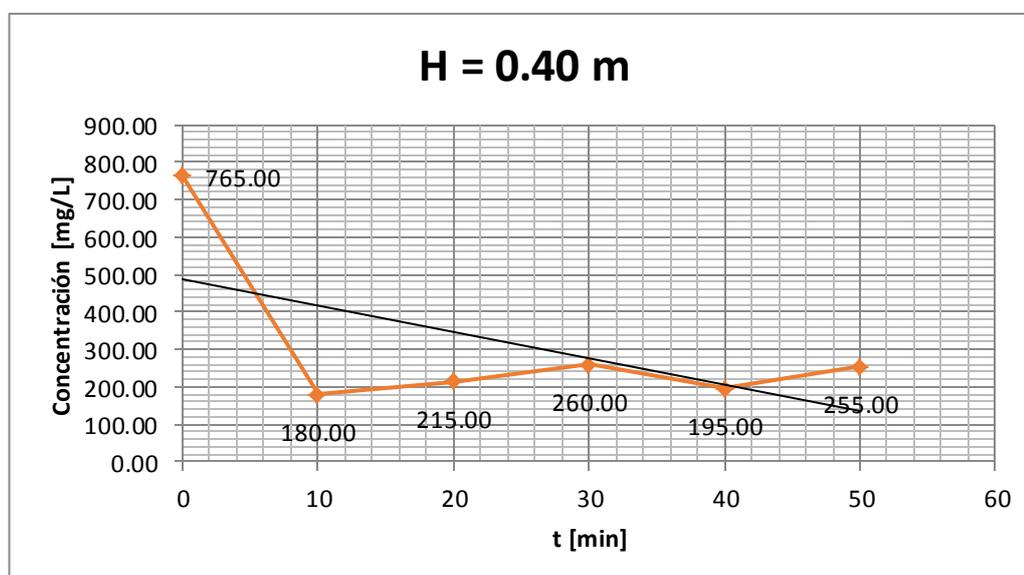
t: Tiempo

R: Recipiente

ST: Sólidos Totales

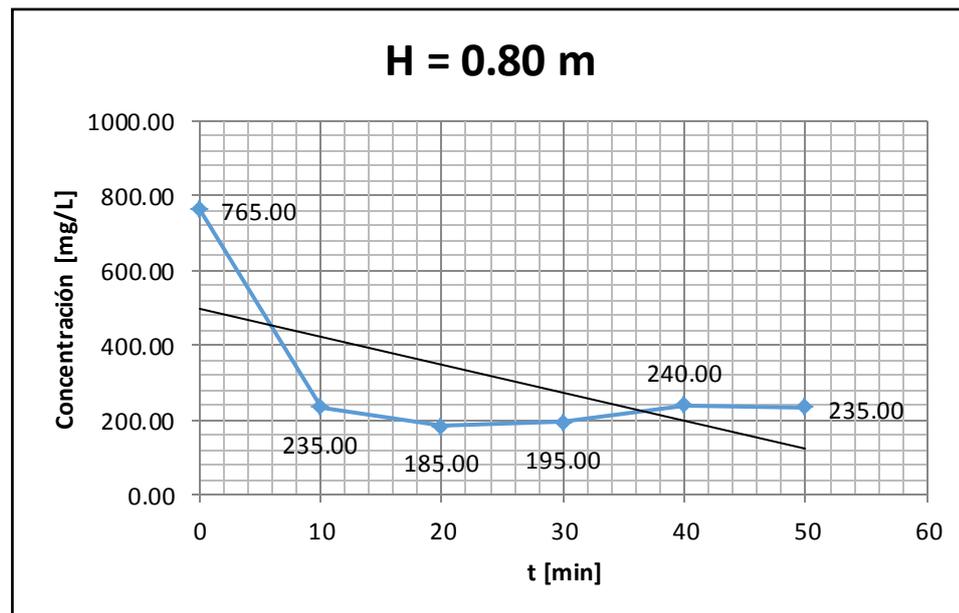
En la tabla III se puede observar los datos obtenidos del ensayo de sedimentación realizado a una muestra de agua, utilizando como coagulante

el Sulfato de Aluminio en una dosis de 30 mg/l. Se observa que la muestra de control presentó una concentración de sólidos de 765 mg/l, y de acuerdo a esta información, se elaboraron las gráficas t vs C (tiempo versus Concentración), en donde se aprecia mejor el comportamiento de sedimentación de los sólidos dentro del reactor.



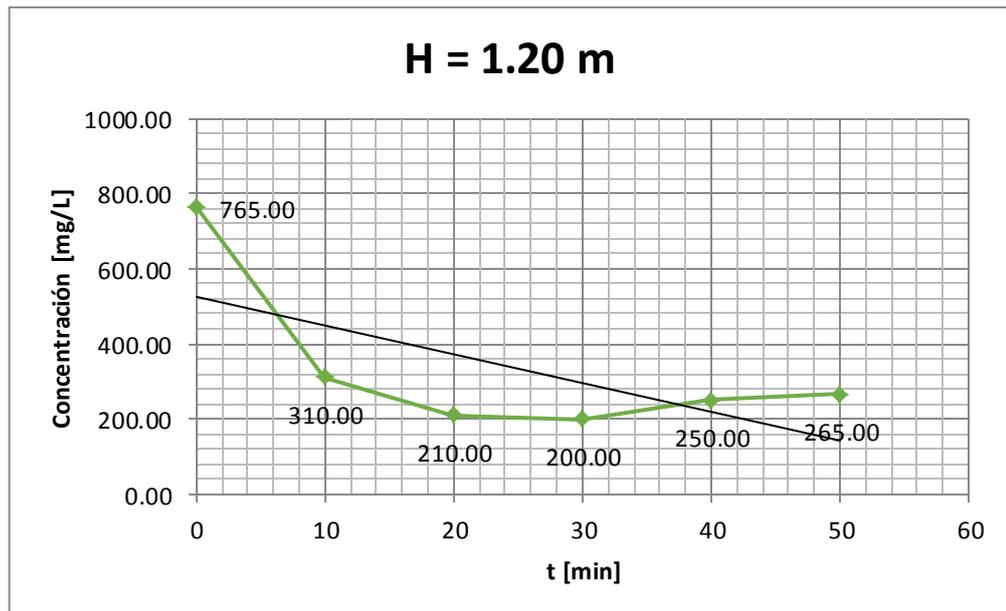
Gráfica 3: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 1).

Se puede apreciar en la Gráfica 3 el comportamiento de las partículas dentro de los primeros 10 minutos, el cual muestra una gran cantidad de asentamiento de los sólidos totales. En el minuto 10 se observa que la concentración de partículas hallada es de 180 mg/l, lo cual representa el 76.0% de remoción alcanzada.



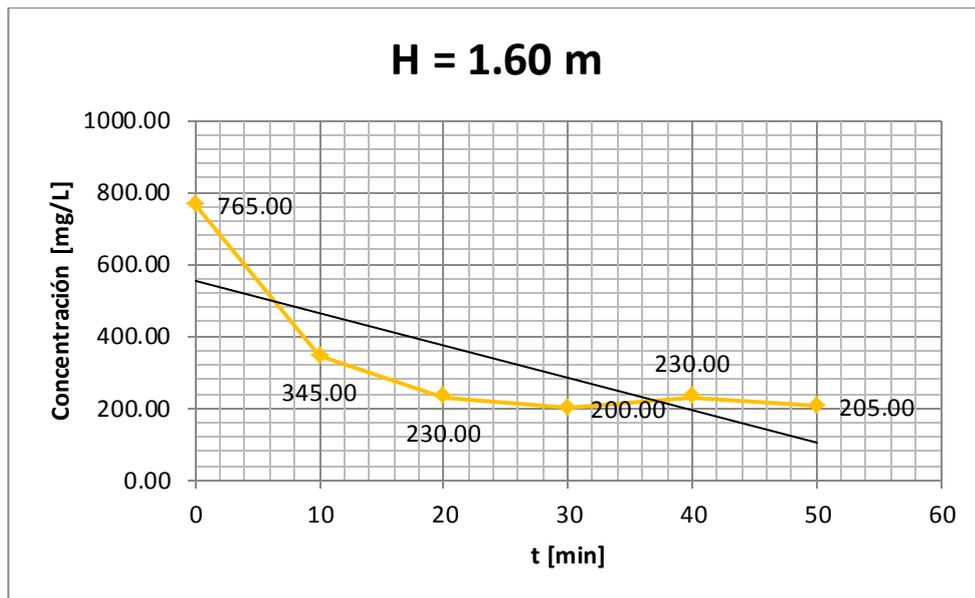
Gráfica 4: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 1).

La Gráfica 4 muestra el comportamiento de las partículas a una profundidad de 0.80 m dentro del reactor. Se observa ahora que el tiempo en el que se encontró una mayor remoción fue a los primeros 20 minutos. Se registró una concentración de 185 mg/l lo que equivale al 75.8% de sólidos suspendidos removidos. A partir de los 30 minutos de ensayo, se puede apreciar que, de acuerdo a las concentraciones encontradas, las partículas tienen un comportamiento diferente dentro del reactor; estas tienden a re-suspenderse.



Gráfica 5: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 1).

A una profundidad de 1.20m se encontró un comportamiento similar a lo que se observó en las anteriores gráficas como lo indica la Gráfica 5. Se encontró que a los 30 minutos de ensayo se obtuvo la mayor remoción. La concentración fue de 200 mg/l lo que representa un 73.9%, ligeramente menor a lo encontrado a menores profundidades.



Gráfica 6: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 1).

En la Gráfica 6 se aprecia que la menor concentración medida se halló a los 30 minutos de ensayo, para una profundidad de 1.60 m. El registro indicó 200 mg/l, lo que resulta en un 73.9% de remoción, valor igual al encontrado a 1.20 m de profundidad.

Se realizó un segundo ensayo con la misma dosis de coagulante para una muestra de agua en la que se encontró una concentración de sólidos totales de 960 mg/l, y se obtuvieron datos que fueron registrados en la tabla IV.

Tabla IV: Ensayo de Sedimentación No. 2. Dosis de sulfato de aluminio 30mg/L.

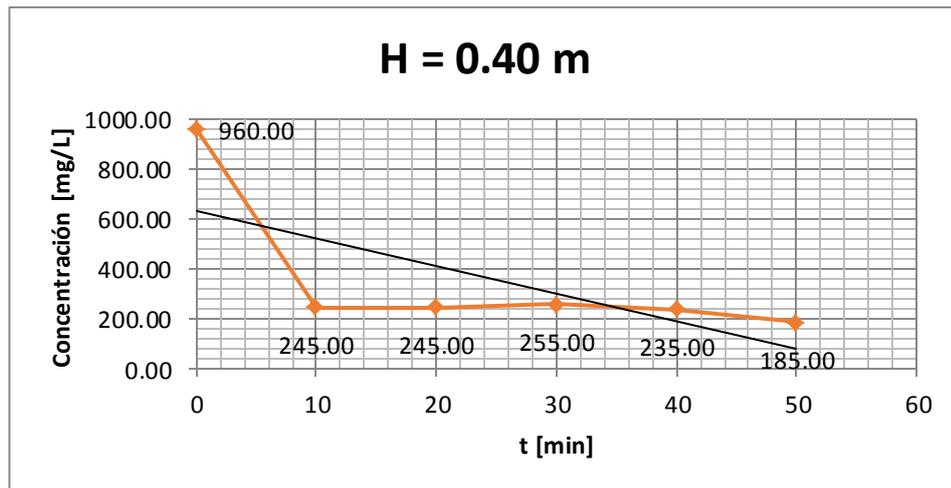
Recipientes	Altura de Toma de Muestra	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			83.353	83.161	192.000	960.00
1	0.4	10	83.393	83.344	49.000	245.00
2	0.8		86.225	86.176	49.000	245.00
3	1.2		82.522	82.463	59.000	295.00
4	1.6		82.56	82.503	57.000	285.00
5	0.4	20	82.167	82.118	49.000	245.00
6	0.8		86.827	86.785	42.000	210.00
7	1.2		86.942	86.895	47.000	235.00
8	1.6		86.389	86.336	53.000	265.00
9	0.4	30	88.982	88.931	51.000	255.00
10	0.8		82.195	82.144	51.000	255.00
11	1.2		85.09	85.037	53.000	265.00
12	1.6		79.503	79.451	52.000	260.00
13	0.4	40	90.716	90.669	47.000	235.00
14	0.8		89.061	89.015	46.000	230.00
15	1.2		96.953	96.905	48.000	240.00
16	1.6		83.668	83.622	46.000	230.00
17	0.4	50	93.465	93.428	37.000	185.00
18	0.8		87.651	87.602	49.000	245.00
19	1.2		98.315	98.264	51.000	255.00
20	1.6		94.634	94.585	49.000	245.00

t: Tiempo

R: Recipiente

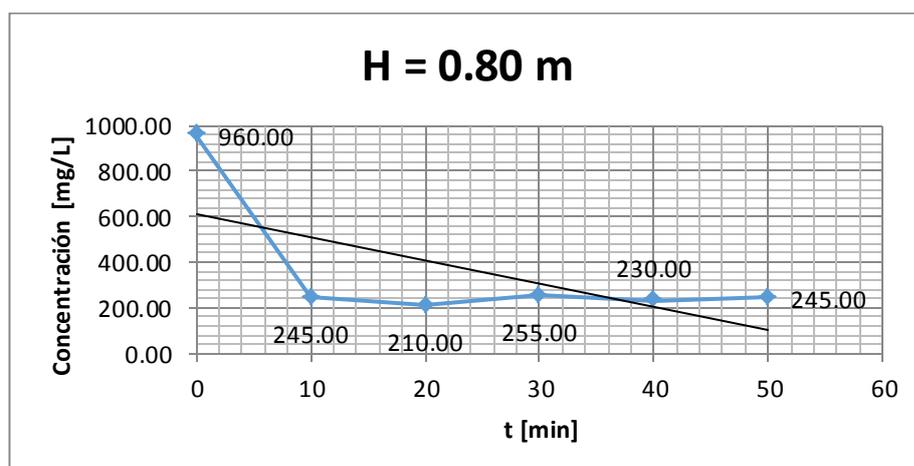
ST: Sólidos Totales

Con esta información se elaboraron las gráficas t vs C, en donde se puede observar el comportamiento que tuvieron las partículas en el ensayo No. 2 y con una dosis de sulfato de 30 mg/l.



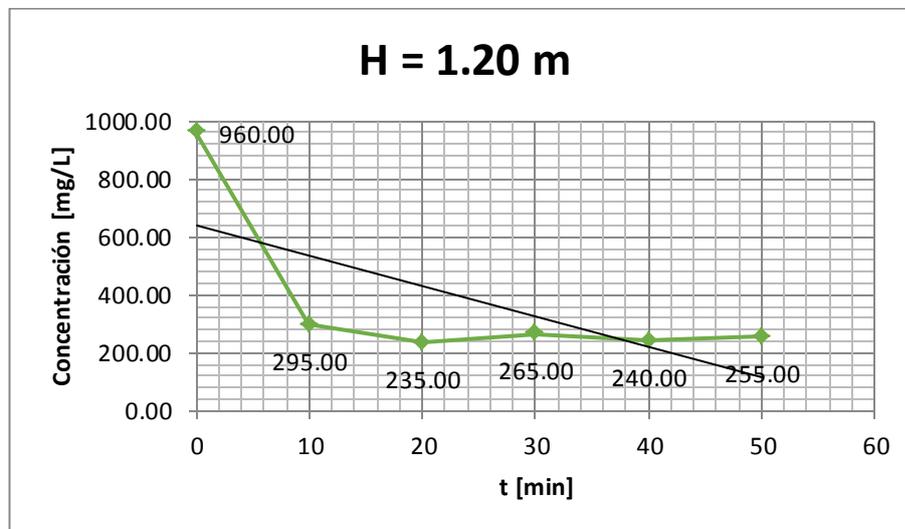
Gráfica 7: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 2).

Manteniendo el comportamiento del ensayo No. 1 se observa que, para el ensayo No. 2 a una profundidad de 0.40 m como muestra la Gráfica 7, el valor mínimo de concentración se encontró a los 20 minutos y fue de 245 mg/l, esto previo al fenómeno de la re-suspensión de partículas. El porcentaje de remoción fue de 74.5%.



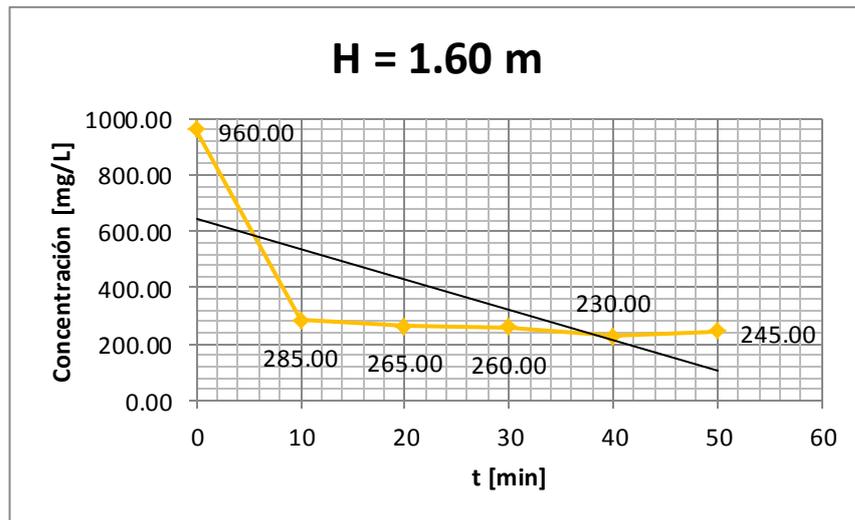
Gráfica 8: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 2).

A los 0.80 m de profundidad se puede ver que el valor de concentración mínimo se encontró a los 20 minutos y fue de 210 mg/l lo que representa al 78.1% de remoción.



Gráfica 9: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 2).

La Gráfica 9 nos muestra que el menor valor de concentración de sólidos fue de 235 mg/l a un tiempo t de 20 minutos. Esto representó un 75.5% de remoción para la profundidad de 1.20 m dentro del reactor.



Gráfica 10: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 2).

Para los 1.60 m de profundidad se notó que la remoción fue ligeramente más lenta y que se encontró el valor menor de concentración a los 40 minutos, antes de la re-suspensión de las partículas. El valor hallado fue de 230 mg/l que es el 76.0% de remoción.

Según el análisis de los ensayos 1 y 2 podemos ver que se hallaron porcentajes de remoción máximos y tiempos de sedimentación coherentes.

El tiempo medido a 1.60 m en el ensayo número dos resultó superior a los anteriores y ese se debió a la mayor concentración de sedimentos presentes en esta muestra de agua.

Del ensayo No. 3 y con una dosis de 30mg/l de sulfato de aluminio se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla V.

Tabla V: Ensayo de Sedimentación No. 3. Dosis de sulfato de aluminio 30mg/l.

Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentración [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			72.809	72.655	154.000	770.00
29	0.4	10	67.57	67.538	32.000	160.00
30	0.8		68.572	68.525	47.000	235.00
31	1.2		71.059	71.005	54.000	270.00
32	1.6		70.851	70.795	56.000	280.00
33	0.4	20	65.675	65.636	39.000	195.00
34	0.8		66.663	66.621	42.000	210.00
35	1.2		71.441	71.396	45.000	225.00
36	1.6		71.97	71.923	47.000	235.00
37	0.4	30	68.134	68.081	53.000	265.00
38	0.8		69.56	69.518	42.000	210.00
39	1.2		70.84	70.79	50.000	250.00
40	1.6		71.672	71.622	50.000	250.00
41	0.4	40	70.338	70.295	43.000	215.00
42	0.8		70.897	70.856	41.000	205.00
43	1.2		65.607	65.563	44.000	220.00
44	1.6		70.192	70.142	50.000	250.00
45	0.4	50	70.245	70.2	45.000	225.00
46	0.8		71.389	71.345	44.000	220.00
47	1.2		70.487	70.444	43.000	215.00
48	1.6		71.241	71.202	39.000	195.00

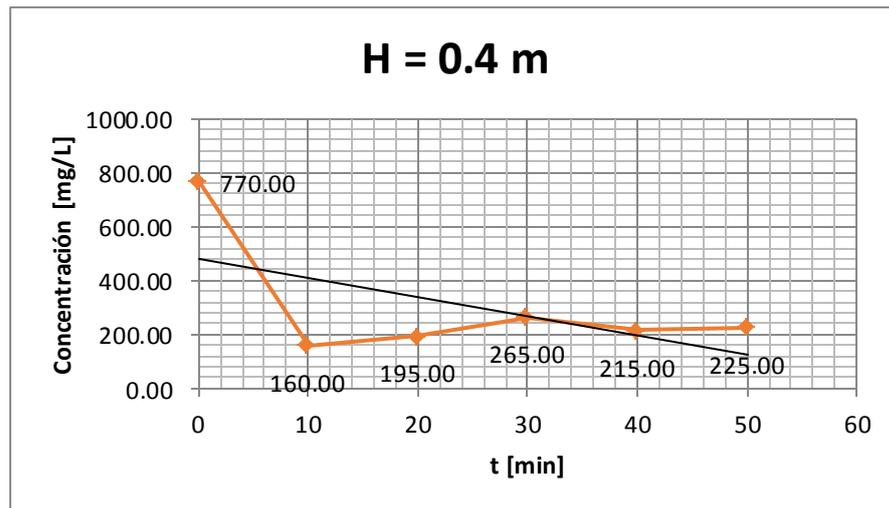
t: Tiempo

R: Recipiente

ST: Sólidos Totales

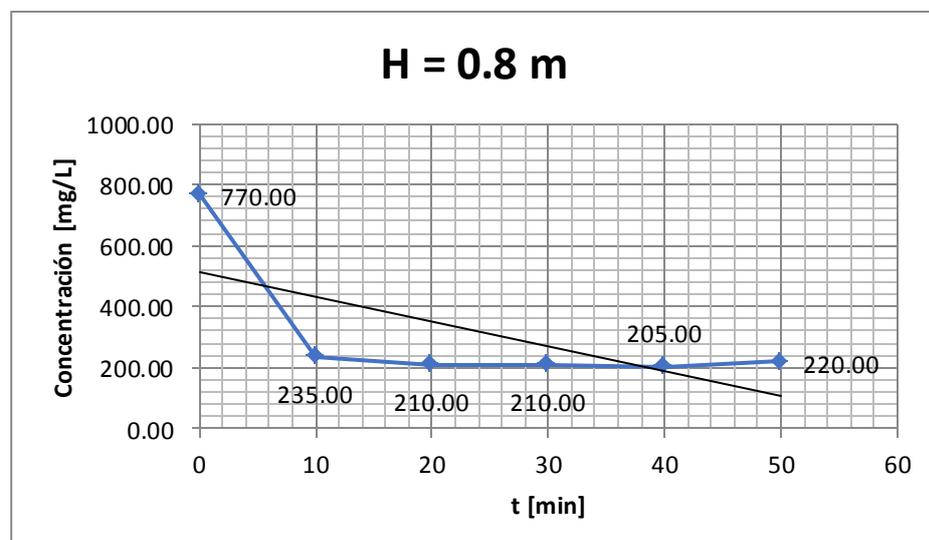
En el ensayo No 3 se encontró una concentración inicial de partículas de 770 mg/l, la cual se aproxima a la concentración encontrada en el ensayo No. 1.

De los datos obtenidos del ensayo No. 3 se obtuvieron las gráficas t vs C, a continuación se detalla cada una de ellas.



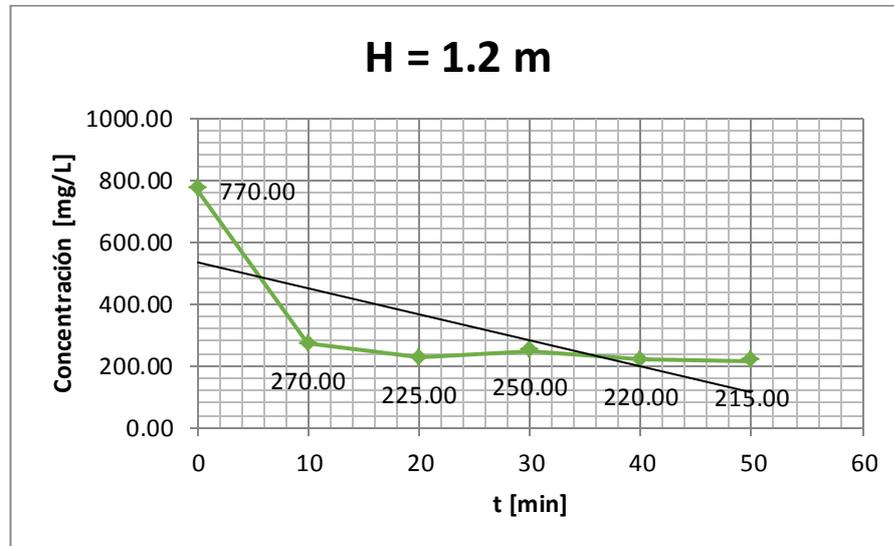
Gráfica 11: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 3).

En la gráfica de la Gráfica 11 se observa que a los 10 minutos de ensayo se tuvo una concentración de 160 mg/l, lo que representa una remoción de 79.2% de acuerdo a la concentración inicial C_0 , 770 mg/l.



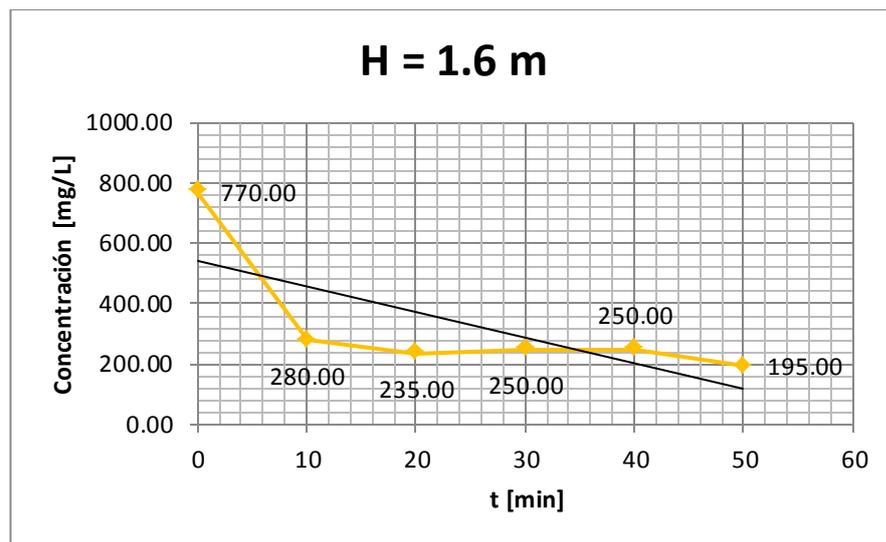
Gráfica 12: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 3).

Para la profundidad de 0.80 m. se obtuvo una mayor remoción a los 20 min del ensayo con una concentración de 210 mg/l, que representa al 72,7% de remoción.



Gráfica 13: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 3).

La remoción alcanzada a los de 20 minutos a 1.20 m de profundidad en el ensayo No. 3 fue del 70.8%, lo que se representó con una concentración de 225 mg/L de sólidos totales. Posterior a esto se registra re-suspensión de las partículas, lo que genera que cambien las concentraciones medidas posteriormente.



Gráfica 14: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 3).

Cómo se puede observar en la Gráfica 14, la concentración medida a los 20 minutos es de 235 mg/l, lo que representa una remoción del 69.5 %.

4.2.2. Ensayos con 50 mg/l de Sulfato de Aluminio.

Para determinar la acción del Sulfato de Aluminio en los ensayos de sedimentación, se aumentó la dosis del coagulante para observar la incidencia del mismo en las características de sedimentación de las partículas coloidales.

Del primer ensayo realizado con la dosis de 50mg/l se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla VI.

Tabla VI: Ensayo de Sedimentación No. 4. Dosis de sulfato de aluminio 50mg/L.

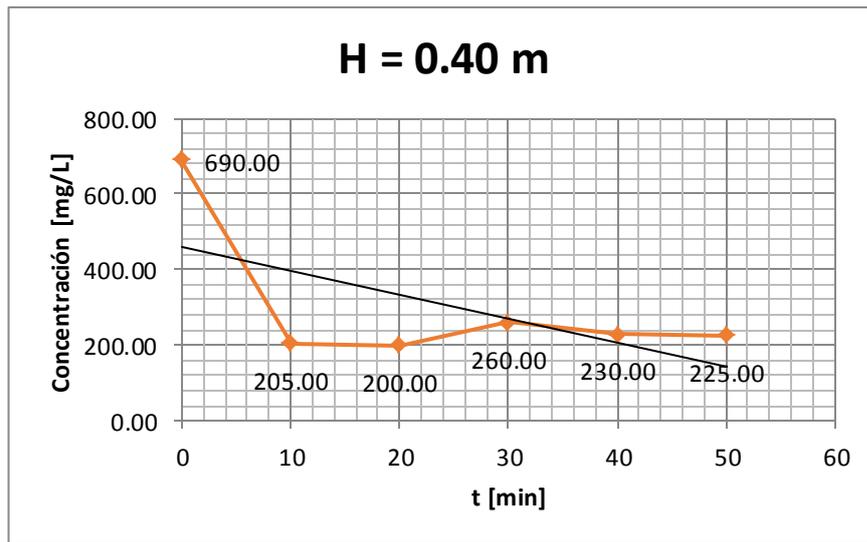
Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			72.794	72.656	138.000	690.00
29	0.4	10	67.579	67.538	41.000	205.00
30	0.8		68.578	68.525	53.000	265.00
31	1.2		71.076	71.005	71.000	355.00
32	1.6		70.877	70.795	82.000	410.00
33	0.4	20	65.676	65.636	40.000	200.00
34	0.8		66.666	66.621	45.000	225.00
35	1.2		71.454	71.396	58.000	290.00
36	1.6		71.986	71.923	63.000	315.00
37	0.4	30	68.133	68.081	52.000	260.00
38	0.8		69.558	69.518	40.000	200.00
39	1.2		70.848	70.79	58.000	290.00
40	1.6		71.687	71.622	65.000	325.00
41	0.4	40	70.341	70.295	46.000	230.00
42	0.8		70.897	70.856	41.000	205.00
43	1.2		65.613	65.563	50.000	250.00
44	1.6		70.208	70.142	66.000	330.00
45	0.4	50	70.245	70.2	45.000	225.00
46	0.8		71.386	71.345	41.000	205.00
47	1.2		70.503	70.444	59.000	295.00
48	1.6		71.257	71.202	55.000	275.00

t: Tiempo

R: Recipiente

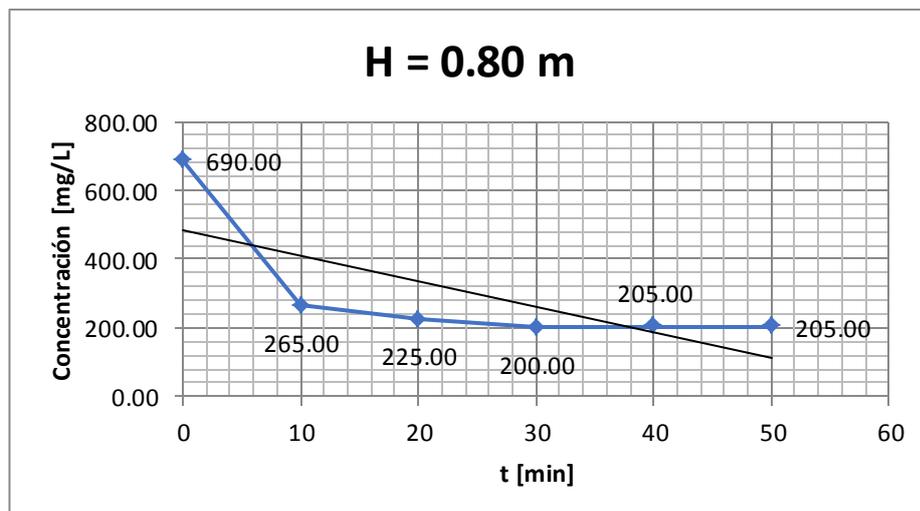
ST: Sólidos Totales

Para la muestra del ensayo No. 4 y con una dosis de Sulfato de 50 mg/l, se encontró una concentración inicial de 690 mg/l de sólidos totales. De acuerdo a la información de la tabla 6 se generaron las graficas t vs C que se describen.



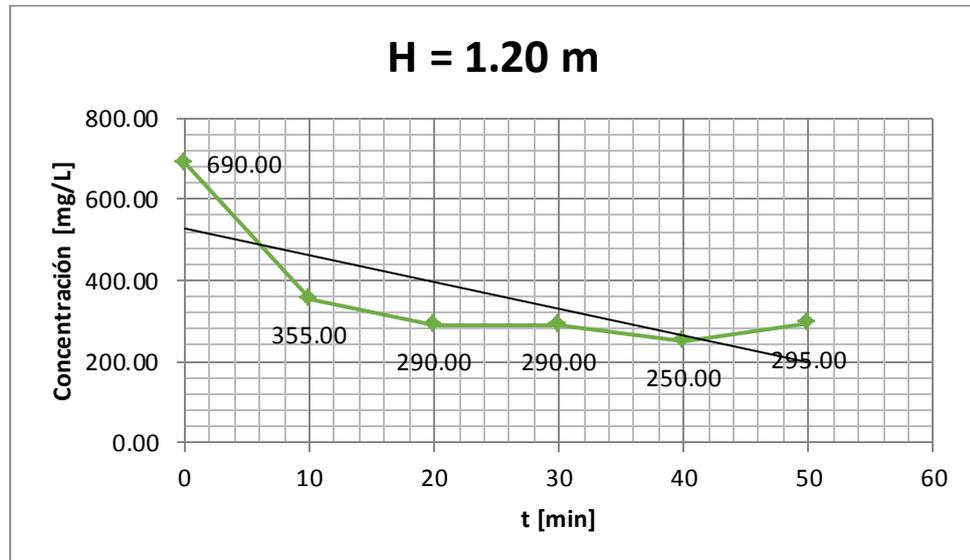
Gráfica 15: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 4).

Para el primer punto de toma de muestra en el reactor, se encontró que la concentración mínima fue medida a los 20 minutos de ensayo. El valor dado fue de 200 mg/l tal como lo indica el gráfico de la Gráfica 14. El porcentaje de remoción fue de 71.0%.



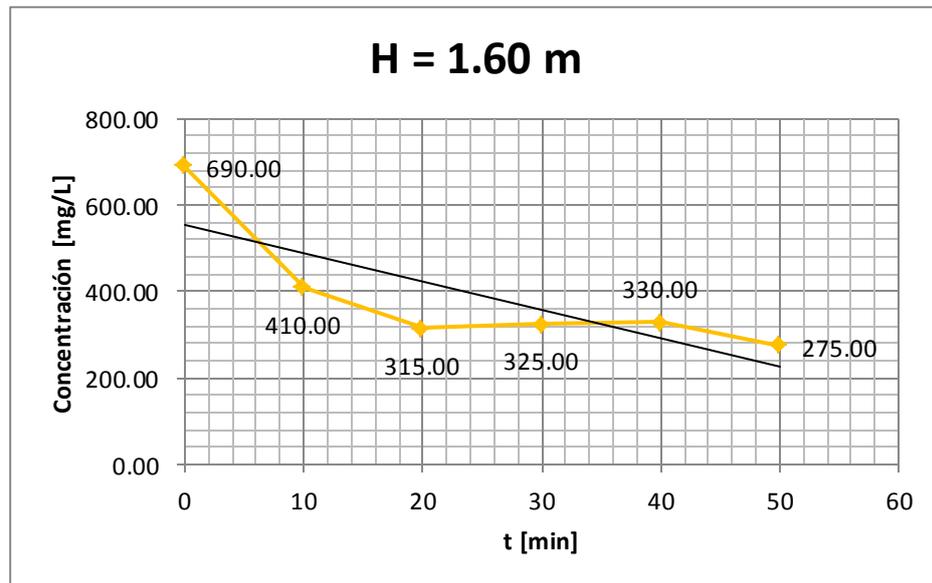
Gráfica 16: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 4).

Por otra parte, el valor mínimo de concentración que se registró a una profundidad de 0.80 m fue de 200mg/l, a un tiempo de 30 minutos. La remoción alcanzó el 71.0%.



Gráfica 17: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 4).

La muestra tomada a 1.20 m dentro del reactor tuvo una concentración de 250 mg/l a los 40 minutos de ensayo, alcanzando una remoción de sólo 63.8%.



Gráfica 18: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 4).

La Gráfica 18 muestra la gráfica t vs C para una profundidad de 1.60 m dentro del reactor de sedimentación. A los 10 primeros minutos de ensayo se puede ver que no una gran disminución en la medida de la concentración. Esto se debe a que la carga de sólidos presentes sobre este punto se sedimentó de tal manera que al tomar la muestra se tomaron las partículas que provenían de puntos superiores.

A los 20 minutos se midió la concentración de 315 mg/l lo que arrojó un porcentaje de remoción de 54.3%.

Luego del ensayo No. 5, el cual correspondía al segundo ensayo de sedimentación con la dosis de coagulante de 50 mg/L, se generó la tabla VII con los datos obtenidos.

Tabla VII: Ensayo de Sedimentación No. 5. Dosis de sulfato de aluminio 50mg/L.

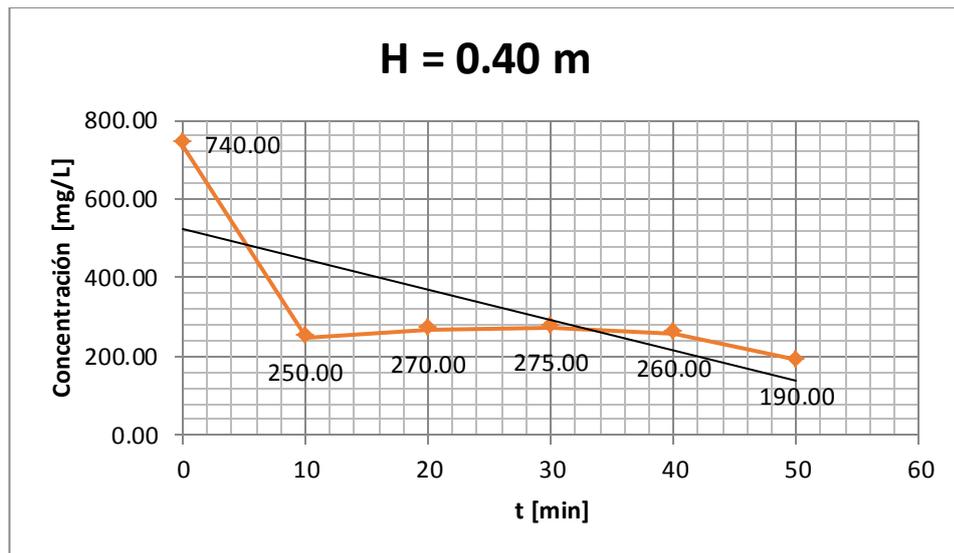
Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			83.309	83.161	148.000	740.00
1	0.4	10	83.394	83.344	50.000	250.00
2	0.8		86.235	86.176	59.000	295.00
3	1.2		82.528	82.463	65.000	325.00
4	1.6		82.561	82.503	58.000	290.00
5	0.4	20	82.172	82.118	54.000	270.00
6	0.8		86.832	86.785	47.000	235.00
7	1.2		86.947	86.895	52.000	260.00
8	1.6		86.395	86.336	59.000	295.00
9	0.4	30	88.986	88.931	55.000	275.00
10	0.8		82.199	82.144	55.000	275.00
11	1.2		85.094	85.037	57.000	285.00
12	1.6		79.504	79.451	53.000	265.00
13	0.4	40	90.721	90.669	52.000	260.00
14	0.8		89.061	89.015	46.000	230.00
15	1.2		96.954	96.905	49.000	245.00
16	1.6		83.673	83.622	51.000	255.00
17	0.4	50	93.466	93.428	38.000	190.00
18	0.8		87.642	87.602	40.000	200.00
19	1.2		98.311	98.264	47.000	235.00
20	1.6		94.636	94.585	51.000	255.00

t: Tiempo

R: Recipiente

ST: Sólidos Totales

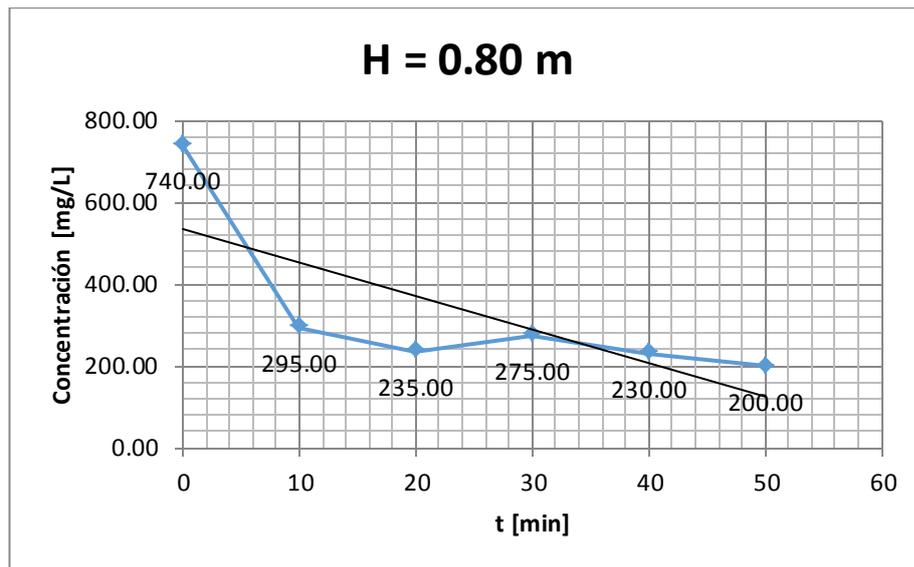
La concentración inicial para el ensayo No. 5 fue de 740 mg/l a partir de los cuales se midió el porcentaje de remoción generados a diferente tiempo t.



Gráfica 19: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 5).

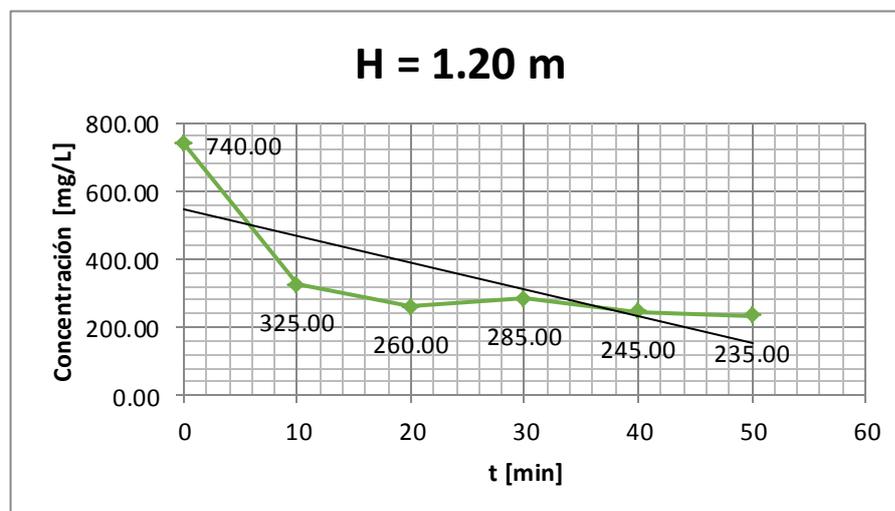
La primera gráfica que se elaboró, de acuerdo a los datos obtenidos, fue la del punto 0.40 m. En la gráfica 19, se encontró que la mayor remoción se dio a los 10 minutos, dando una concentración de 250 mg/l de sólidos suspendidos, lo que representó el 66.2% de remoción.

Para la gráfica del punto 0.80 m se halló una concentración de 235 mg/l en un tiempo de 20 minutos. El porcentaje removido fue de 68.2%.



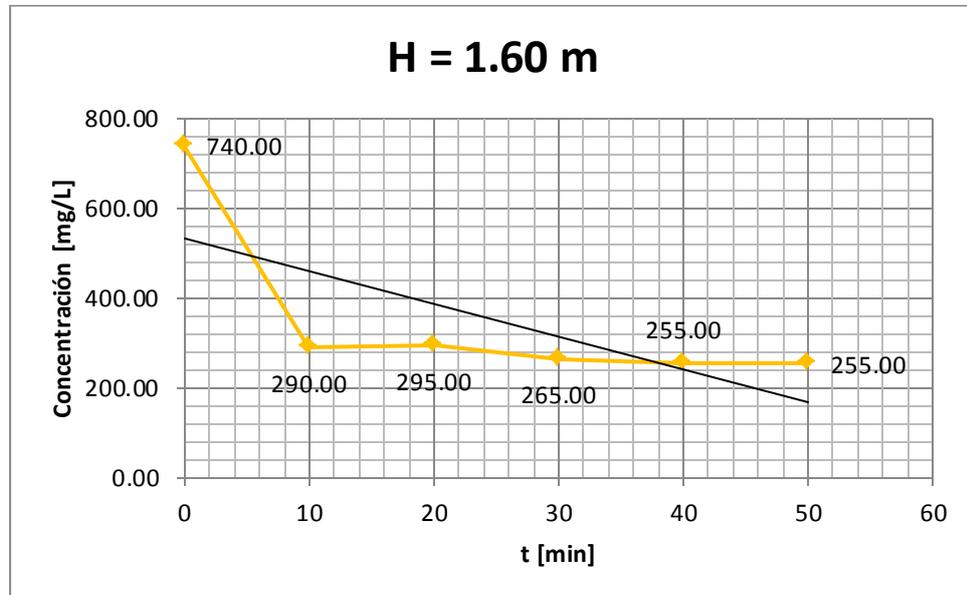
Gráfica 20: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 5).

En la Gráfica 21 para el punto 1.20 m la remoción fue del 64.9% a los 20 minutos de ensayo. La concentración de la muestra fue de 260 mg/l.



Gráfica 21: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 5).

A una profundidad de 1.60 m se tuvo una remoción de 65.5% en un tiempo de 40 minutos y con una concentración de 255 mg/l de sólidos presentes en la muestra, tal como se grafica en la Gráfica 22.



Gráfica 22: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 5).

El tercer ensayo de sedimentación asistido con la dosis de 50 mg/l de sulfato de aluminio tuvo una concentración inicial de 850 mg/l, los resultados del ensayo se describen en la tabla VIII.

TablaVIII: Ensayo de Sedimentación No. 6. Dosis de sulfato de aluminio 50mg/L.

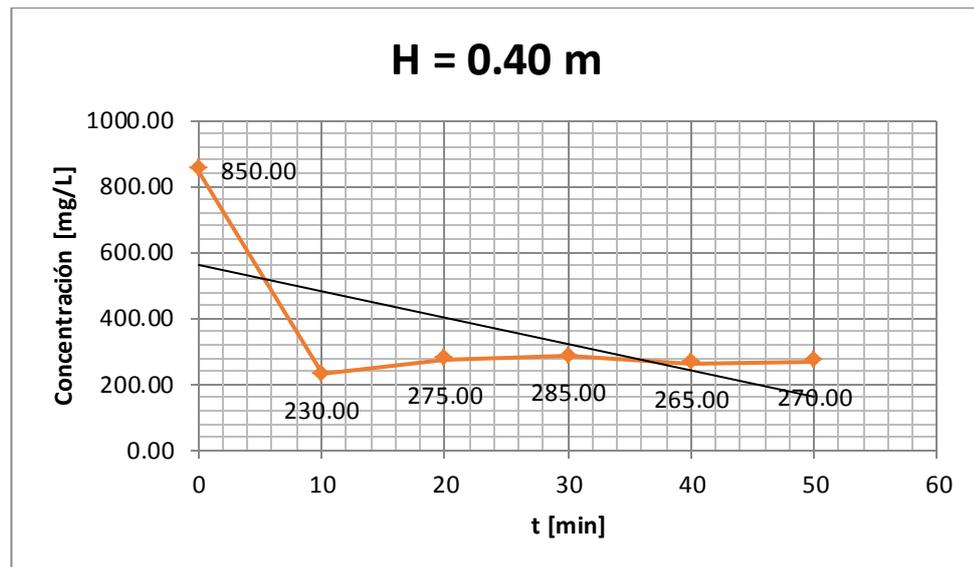
Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			72.826	72.656	170.000	850.00
29	0.4	10	67.584	67.538	46.000	230.00
30	0.8		68.578	68.525	53.000	265.00
31	1.2		71.076	71.005	71.000	355.00
32	1.6		70.885	70.795	90.000	450.00
33	0.4	20	65.691	65.636	55.000	275.00
34	0.8		66.667	66.621	46.000	230.00
35	1.2		71.454	71.396	58.000	290.00
36	1.6		71.987	71.923	64.000	320.00
37	0.4	30	68.138	68.081	57.000	285.00
38	0.8		69.563	69.518	45.000	225.00
39	1.2		70.854	70.79	64.000	320.00
40	1.6		71.682	71.622	60.000	300.00
41	0.4	40	70.348	70.295	53.000	265.00
42	0.8		70.901	70.856	45.000	225.00
43	1.2		65.614	65.563	51.000	255.00
44	1.6		70.203	70.142	61.000	305.00
45	0.4	50	70.254	70.2	54.000	270.00
46	0.8		71.394	71.345	49.000	245.00
47	1.2		70.511	70.444	67.000	335.00
48	1.6		71.265	71.202	63.000	315.00

t: Tiempo

R: Recipiente

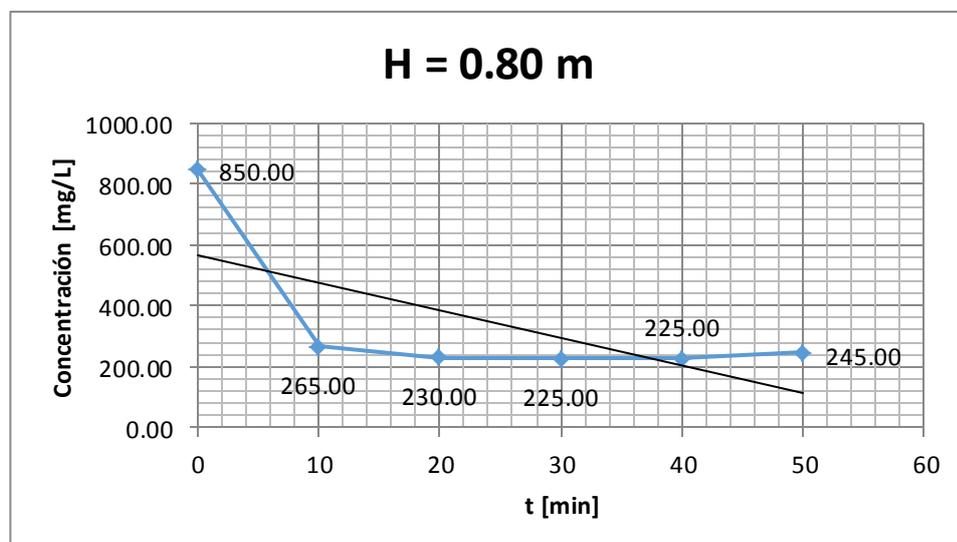
ST: Sólidos Totales

El porcentaje de remoción a una profundidad de 0.40 m fue de 72.9% a los 10 minutos de ensayo, con una medida de concentración de 230 mg/l de sólidos.

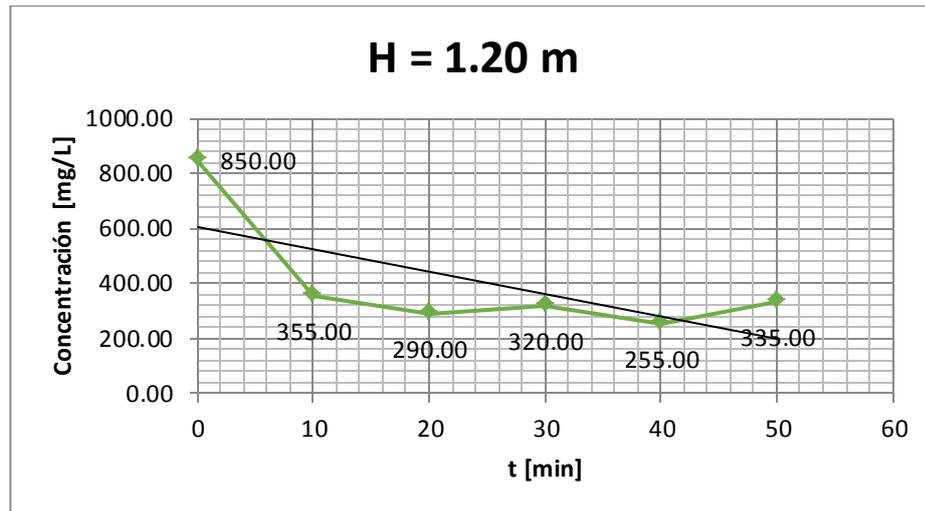


Gráfica 23: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 6).

A 0.80 m y como se indica en la Gráfica 24, se obtuvo una concentración de 225 mg/l en un tiempo de 30 minutos. El porcentaje alcanzado antes de que ocurra la re-suspensión fue de 73.5%.

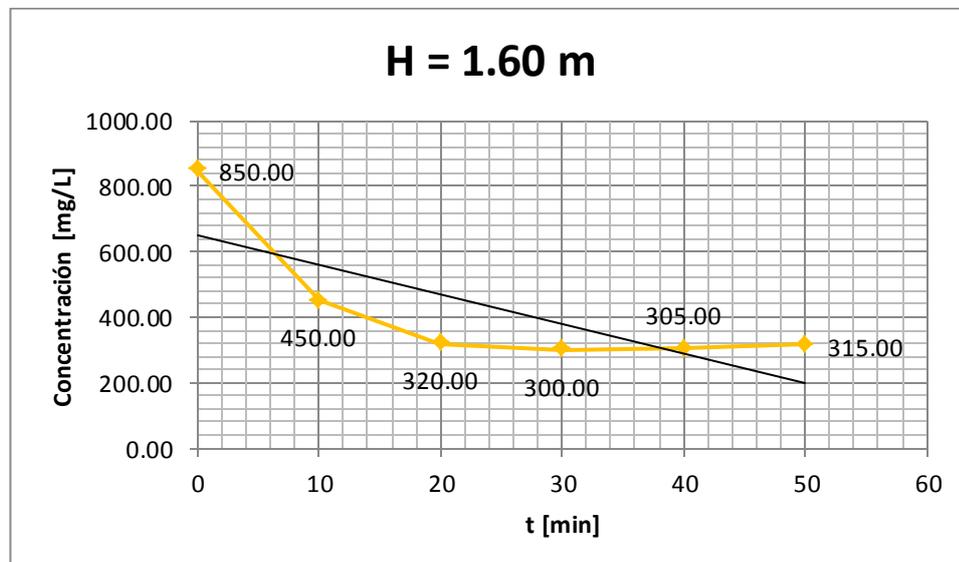


Gráfica 24: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 6).



Gráfica 25: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 6).

En la Gráfica 25 se observa que en el punto de 1.20 m de profundidad existe una concentración de partículas de 290 mg/l, medido a los 20 minutos. La remoción fue del 65.9%.



Gráfica 26: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 6).

La remoción en el punto de 1.60 m fue del 64.7% en un tiempo de 30 minutos. Registrándose una concentración de sólidos de 300 mg/l.

4.2.3. Ensayos con 70 mg/l de Sulfato de Aluminio.

Se ensayaron tres muestras de agua a las cuales se les agregó una dosis de 70 mg/l de sulfato de aluminio. Se aumentó la cantidad de coagulante con el fin de encontrar una dosis óptima de sulfato, que permita tener una mayor remoción en un menor tiempo y a su vez que sea económico.

Del primer ensayo con la dosis de 70 mg/l de sulfato se encontraron las concentraciones detalladas en la tabla IX.

La concentración inicial de sólidos totales fue de 760 mg/l, la cual se encuentra dentro del rango de concentraciones encontradas en los ensayos previos.

Tabla IX: Ensayo de Sedimentación No. 7. Dosis de sulfato de aluminio 70mg/l.

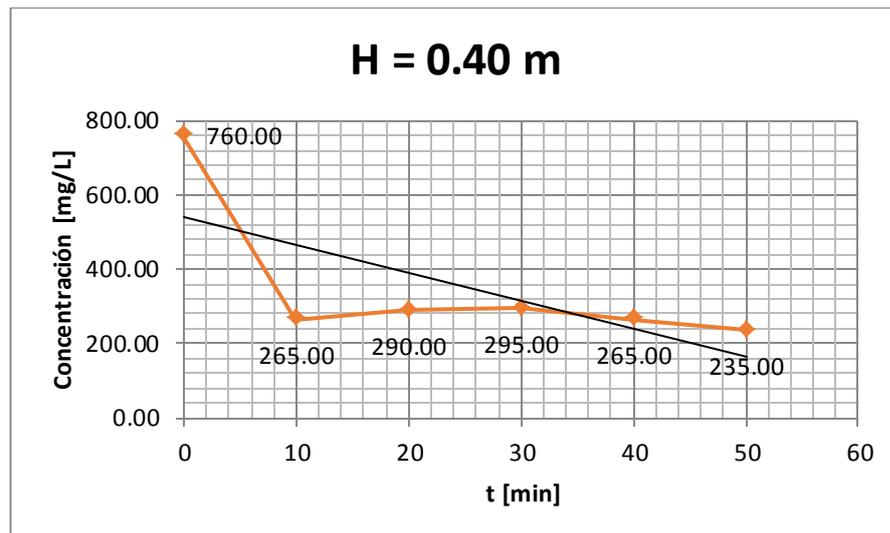
Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentracion [mg/l]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			83.313	83.161	152.000	760.00
1	0.4	10	83.397	83.344	53.000	265.00
2	0.8		86.234	86.176	58.000	290.00
3	1.2		82.522	82.463	59.000	295.00
4	1.6		82.579	82.503	76.000	380.00
5	0.4	20	82.176	82.118	58.000	290.00
6	0.8		86.833	86.785	48.000	240.00
7	1.2		86.949	86.895	54.000	270.00
8	1.6		86.397	86.336	61.000	305.00
9	0.4	30	88.99	88.931	59.000	295.00
10	0.8		82.2	82.144	56.000	280.00
11	1.2		85.097	85.037	60.000	300.00
12	1.6		79.51	79.451	59.000	295.00
13	0.4	40	90.722	90.669	53.000	265.00
14	0.8		89.067	89.015	52.000	260.00
15	1.2		96.955	96.905	50.000	250.00
16	1.6		83.677	83.622	55.000	275.00
17	0.4	50	93.475	93.428	47.000	235.00
18	0.8		87.652	87.602	50.000	250.00
19	1.2		98.316	98.264	52.000	260.00
20	1.6		94.639	94.585	54.000	270.00

t: Tiempo

R: Recipiente

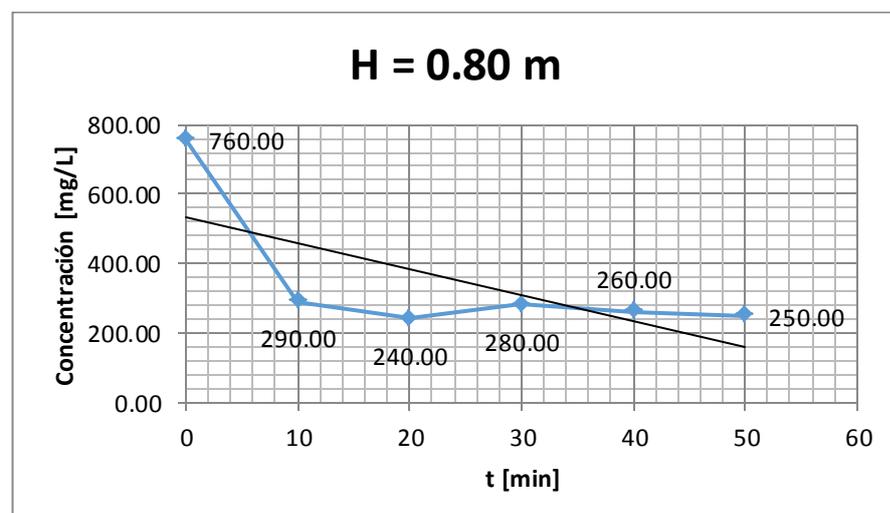
ST: Sólidos Totales

Para la Gráfica 27, en donde se grafica las concentraciones encontradas a una profundidad de 0.40 m dentro del reactor, se puede observar que a los 10 minutos de ensayo existe una concentración de partículas de 265 mg/l, lo que representa el 65.1% de remoción.



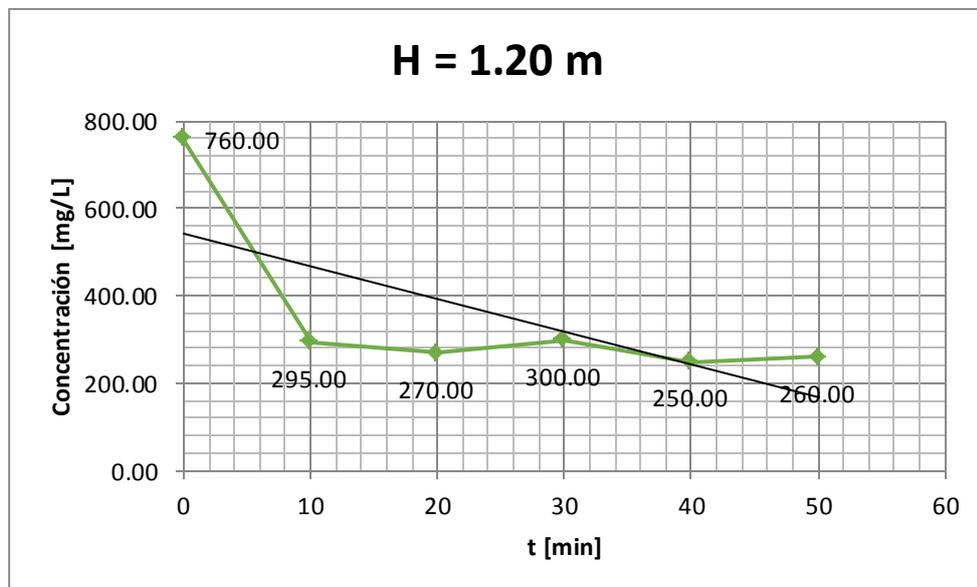
Gráfica 27: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 7).

A los 0.80 m de profundidad se observa que se alcanzó una remoción de 68.4% a los 20 minutos de ensayo. La concentración medida fue de 240 mg/l como los muestra la Gráfica 28.



Gráfica 28: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 7).

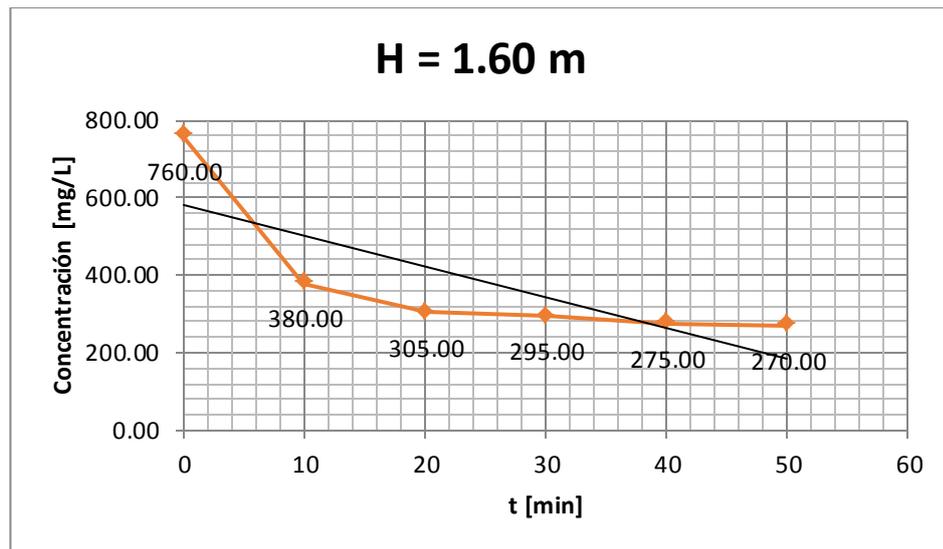
La muestra tomada a 1.20 m dentro del reactor tuvo una concentración de 270 mg/l a los 20 minutos de ensayo, alcanzando una remoción de 64.5%.



Gráfica 29: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 7).

Por otra parte, el valor de concentración que se registro a un profundidad de 1.60 m fue de 270mg/l, a un tiempo de 50 minutos. La remoción alcanzó el 64.5%.

En este ensayo se pudo apreciar que los porcentajes de remoción tuvieron valores inferiores a los encontrados con las dosis de sulfato de 30 y 50 mg/l.



Gráfica 30: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 7).

En el ensayo de sedimentación No. 8, el cual fue el segundo con una dosis de 70 mg/l de coagulante, se tuvieron los datos registrados en la tabla X. La concentración inicial de sólidos suspendidos encontrada en este ensayo fue de 840 mg/l.

Tabla X: Ensayo de Sedimentación No. 8. Dosis de sulfato de aluminio 70mg/l.

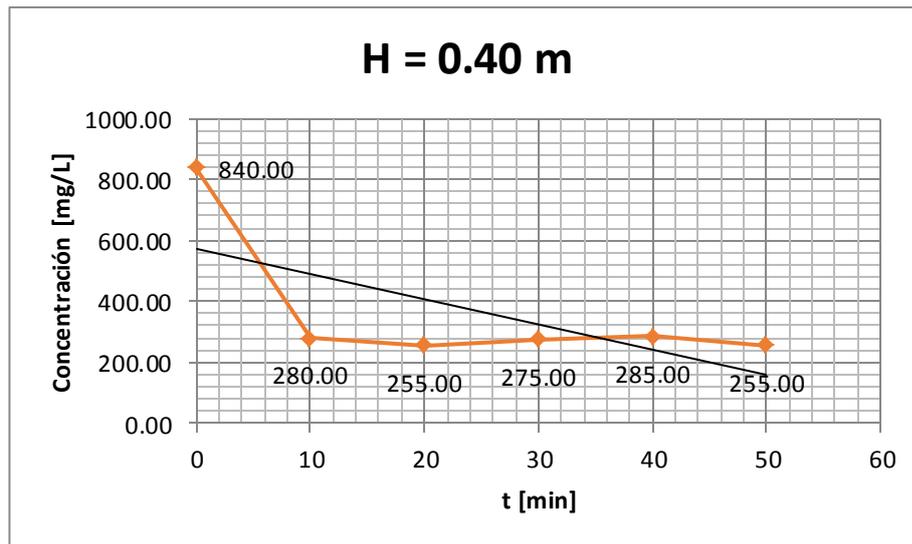
Recipientes	Altura de Toma de Muestra [m]	t [min]	Pesos			Concentración [mg/L]
			R+ST [gr]	R [gr]	ST [mg]	
Control			70.027	69.859	168.000	840.00
1	0.4	20	70.638	70.582	56.000	280.00
2	0.8		64.213	64.158	55.000	275.00
3	1.2		71.349	71.29	59.000	295.00
4	1.6		66.612	66.534	78.000	390.00
5	0.4	30	68.162	68.111	51.000	255.00
6	0.8		68.637	68.58	57.000	285.00
7	1.2		67.19	67.131	59.000	295.00
8	1.6		70.028	69.979	49.000	245.00
9	0.4	40	68.276	68.221	55.000	275.00
10	0.8		70.7	70.648	52.000	260.00
11	1.2		66.056	65.995	61.000	305.00
12	1.6		68.087	68.03	57.000	285.00
13	0.4	50	69.126	69.069	57.000	285.00
14	0.8		67.54	67.492	48.000	240.00
15	1.2		66.833	66.771	62.000	310.00
16	1.6		66.136	66.072	64.000	320.00
17	0.4	60	71.04	70.989	51.000	255.00
18	0.8		71.171	71.132	39.000	195.00
19	1.2		69.727	69.669	58.000	290.00
20	1.6		69.318	69.26	58.000	290.00

t: Tiempo

R: Recipiente

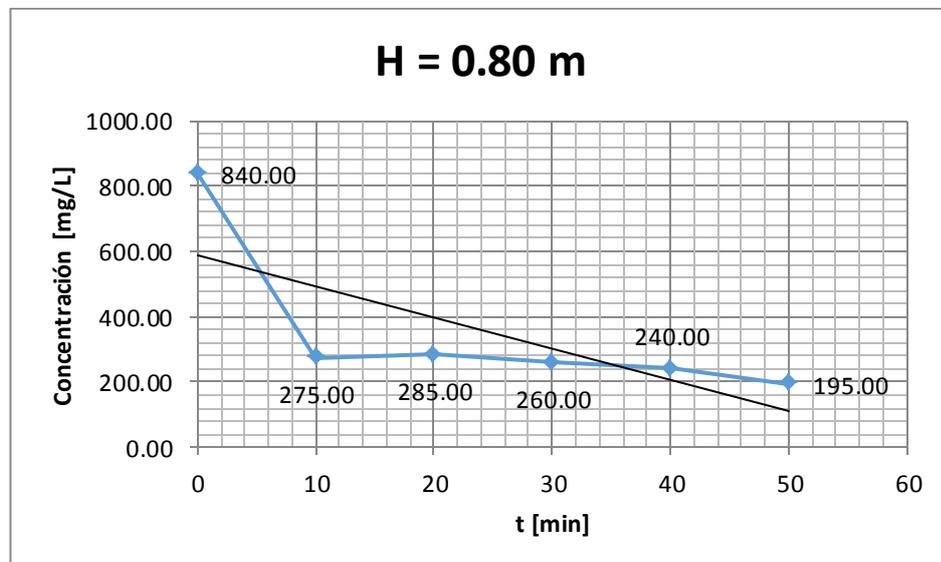
ST: Sólidos Totales

Para el primer punto de toma de muestra en el reactor, se encontró que la concentración mínima fue medida a los 20 minutos de ensayo. El valor dado fue de 255 mg/l tal como lo indica la Gráfica 31. El porcentaje de remoción fue de 69.6%.

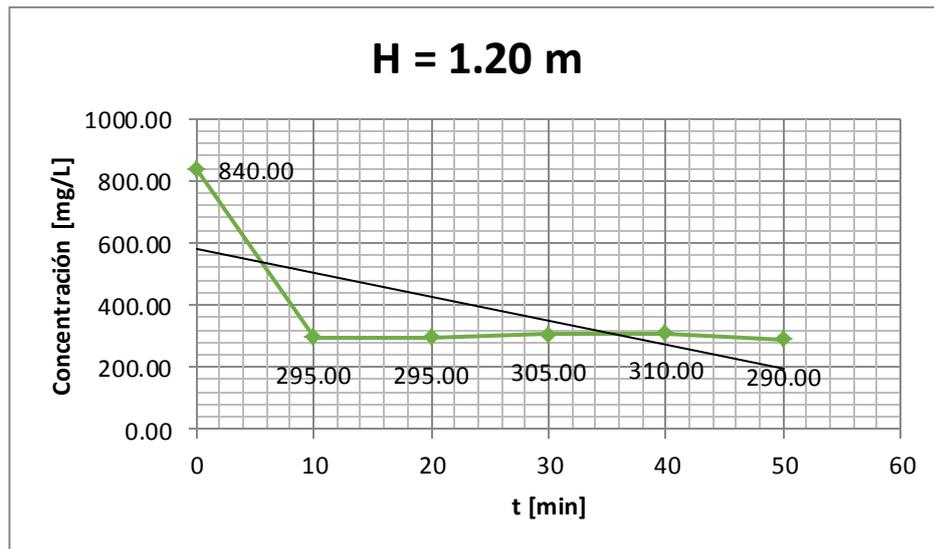


Gráfica 31: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 8).

A 0.80 m de profundidad se tuvo que el valor de concentración fue de 275 mg/l a un tiempo de 10 minutos, lo que es el 67.3% de remoción.

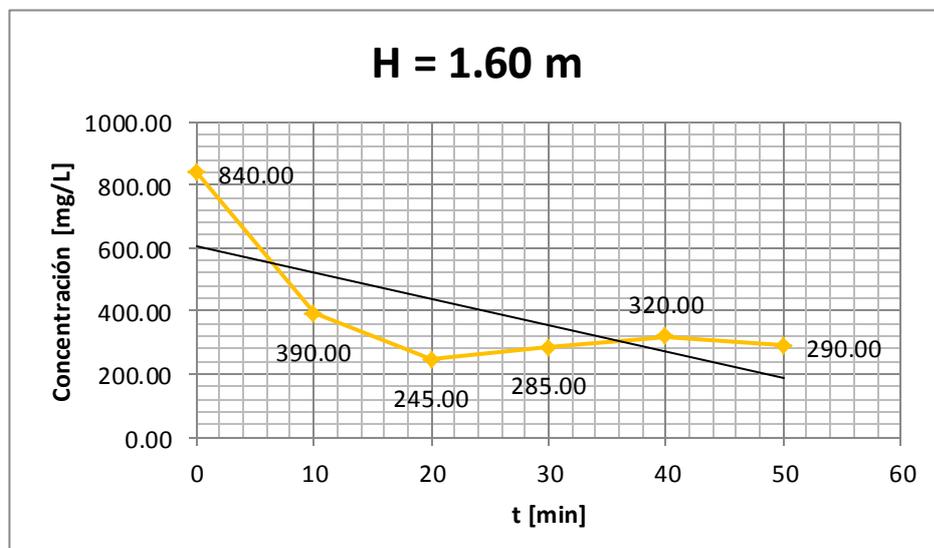


Gráfica 32: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 8).



Gráfica 33: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 8).

De la Gráfica 33, se puede observar que a 1.20 m de profundidad dentro del reactor la concentración de partículas a los 10 minutos de ensayo fue de 295 mg/l. El porcentaje removido en este punto fue del 64.9%.



Gráfica 34: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 8).

A los 20 minutos de ensayo se encontró que el valor de la concentración de sólidos es de 245 mg/l a 1.60 m de profundidad en el reactor y la remoción es del 70.8%.

Tabla XI: Ensayo de Sedimentación No. 9. Dosis de sulfato de aluminio 70mg/l.

Recipientes	Altura de Toma de Muestra	t [min]	Pesos			Concentración [mg/L]
			R+SS [gr]	R [gr]	SS [mg]	
Control			72.808	72.655	153.000	765.00
29	0.4	10	67.583	67.538	45.000	225.00
30	0.8		68.574	68.525	49.000	245.00
31	1.2		71.082	71.005	77.000	385.00
32	1.6		70.866	70.795	71.000	355.00
33	0.4	20	65.693	65.636	57.000	285.00
34	0.8		66.677	66.621	56.000	280.00
35	1.2		71.462	71.396	66.000	330.00
36	1.6		71.987	71.923	64.000	320.00
37	0.4	30	68.145	68.081	64.000	320.00
38	0.8		69.566	69.518	48.000	240.00
39	1.2		70.851	70.79	61.000	305.00
40	1.6		71.681	71.622	59.000	295.00
41	0.4	40	70.351	70.295	56.000	280.00
42	0.8		70.907	70.856	51.000	255.00
43	1.2		65.608	65.563	45.000	225.00
44	1.6		70.204	70.142	62.000	310.00
45	0.4	50	70.258	70.2	58.000	290.00
46	0.8		71.401	71.345	56.000	280.00
47	1.2		70.501	70.444	57.000	285.00
48	1.6		71.257	71.202	55.000	275.00

t: Tiempo

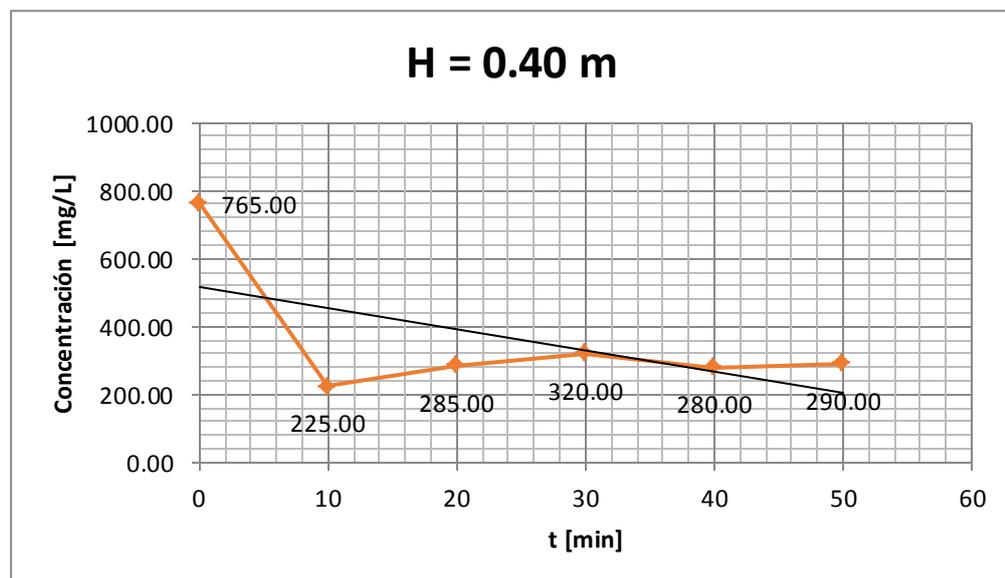
R: Recipiente

ST: Sólidos Totales

En la tabla XI se anotan todos los datos hallados en el ensayo de sedimentación No. 9, el cual corresponde al tercer ensayo con una dosis de

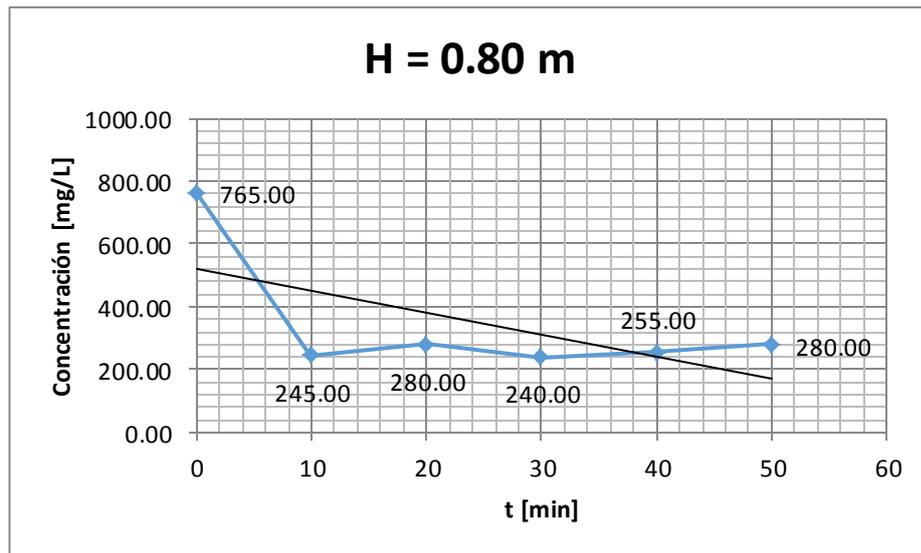
coagulante de 70 mg/l. La concentración inicial de sólidos totales en la muestra fue de 765 mg/l.

Con los datos encontrados se generaron las curvas t vs C para la muestra a diferentes profundidades dentro del reactor. Así para una profundidad de 0.40 m se tiene que la concentración de partículas medida fue de 225 mg/l (Gráfica 35) a un tiempo de 10 minutos, lo que representa al 70.6% de remoción.



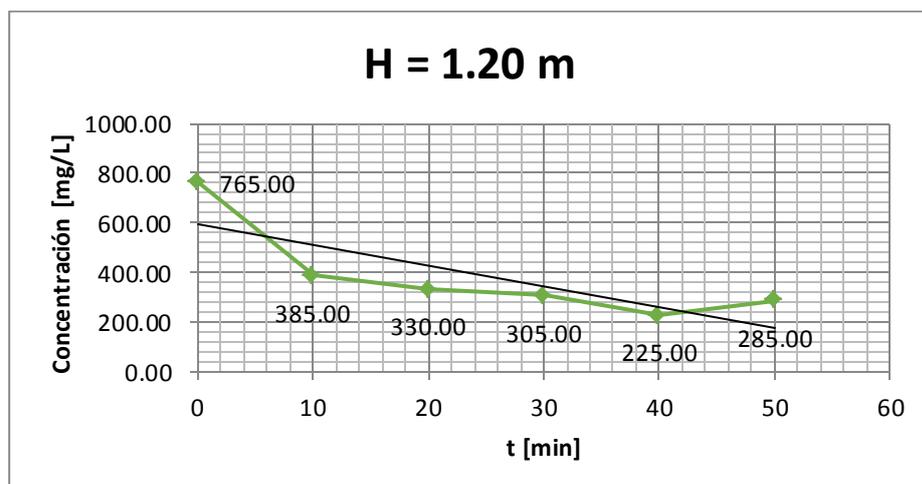
Gráfica 35: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.40 m (Ensayo No. 9).

Para los 0.80 m de profundidad se tuvo que a los 10 minutos de ensayo se registró una concentración de 245 mg/l, lo cual representa el 68% de porcentaje de remoción.

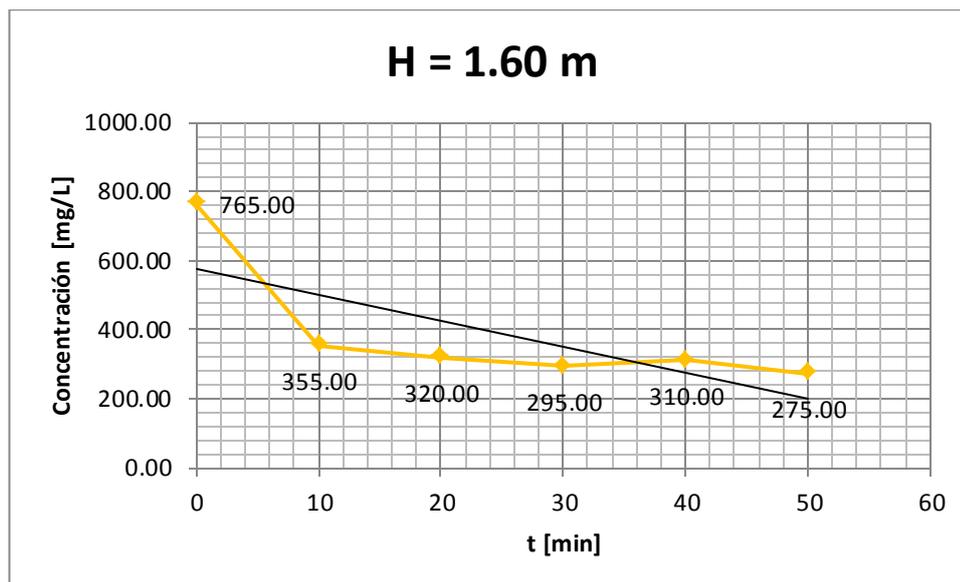


Gráfica 36: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 0.80 m (Ensayo No. 9).

De la Gráfica 37, se puede observar que a 1.20 m de profundidad dentro del reactor la concentración de partículas a los 40 minutos de ensayo fue de 225 mg/l. El porcentaje removido en este punto fue del 70.6%.



Gráfica 37: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.20 m (Ensayo No. 9).



Gráfica 38: Gráfica t vs C para una profundidad en el reactor de 1.60 m (Ensayo No. 9).

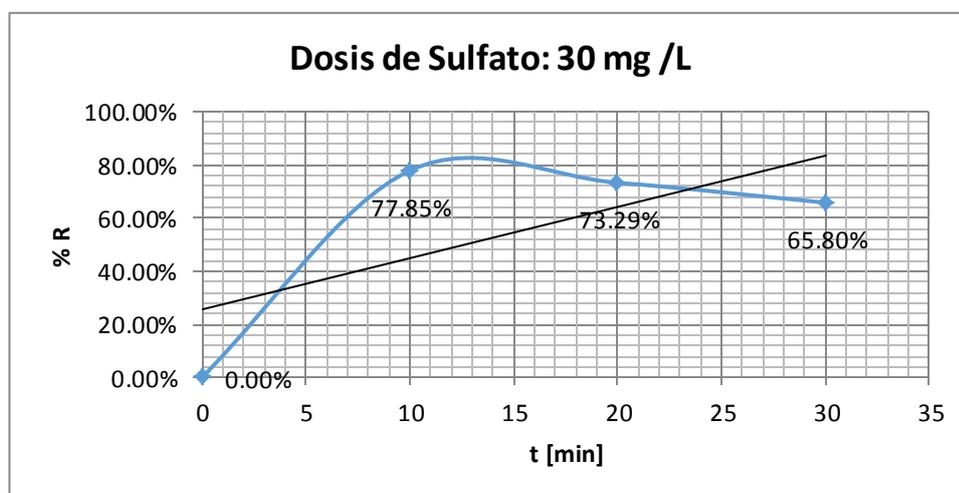
El valor de concentración que se registró a una profundidad de 1.60 m fue de 295mg/l, a un tiempo de 30 minutos. La remoción alcanzó el 61.4%.

4.3. Porcentaje de Remoción de Sólidos Totales.

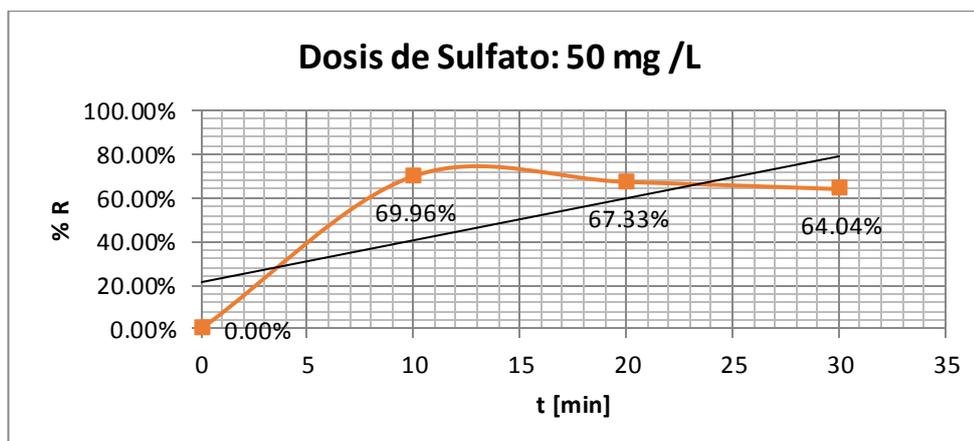
Una vez analizados los ensayos de sedimentación con diferentes dosis de sulfato de aluminio, se pudieron elaborar curvas t vs % de remoción. Mediante este análisis se pudo observar con que dosis de sulfato se tuvo una mayor eficiencia en la decantación de las partículas.

4.3.1. Remoción a 0.40 m de profundidad.

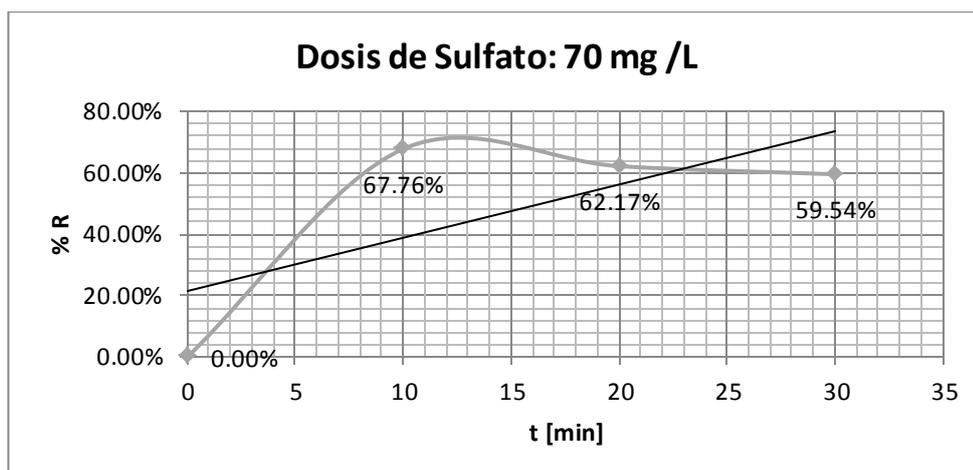
Con una dosis de sulfato de aluminio de 30 mg/l podemos observar, de acuerdo a la Gráfica 38, que el proceso tuvo una remoción máxima de 77.85% a los diez minutos.



Gráfica 39: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L

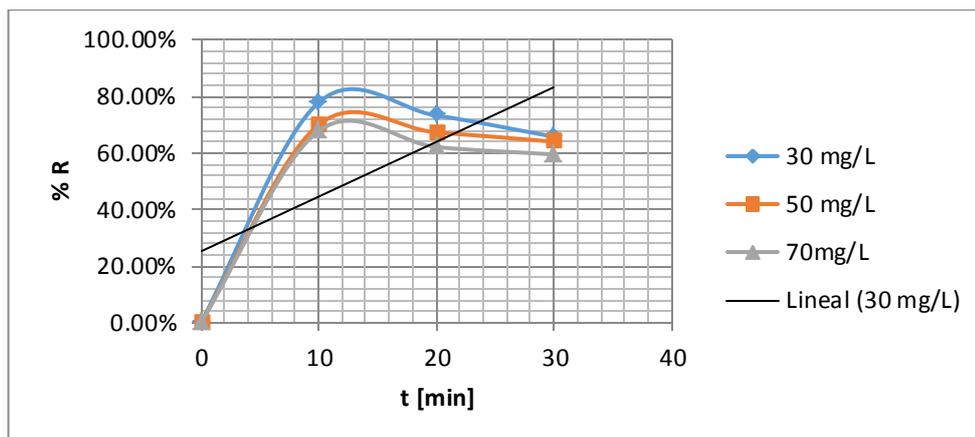


Gráfica 40: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L



Gráfica 41: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y una dosis de sulfato de 70 mg/l

El porcentaje máximo de remoción de sólidos suspendidos utilizando una dosis de sulfato de aluminio de 50 mg/L fue de 69.96% como se muestra la figura 40, mientras que para una dosis de 70 mg/l la remoción alcanzó el 67.76%. Cabe notar que ambos porcentajes se obtuvieron a los 10 minutos de ensayo, tal como el porcentaje máximo alcanzado con la dosis de 30 mg/l..

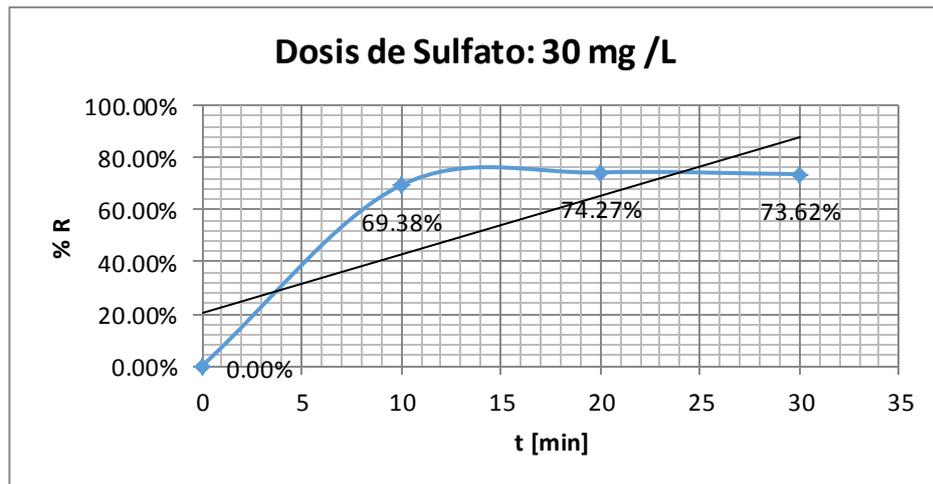


Gráfica 42: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.40 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio.

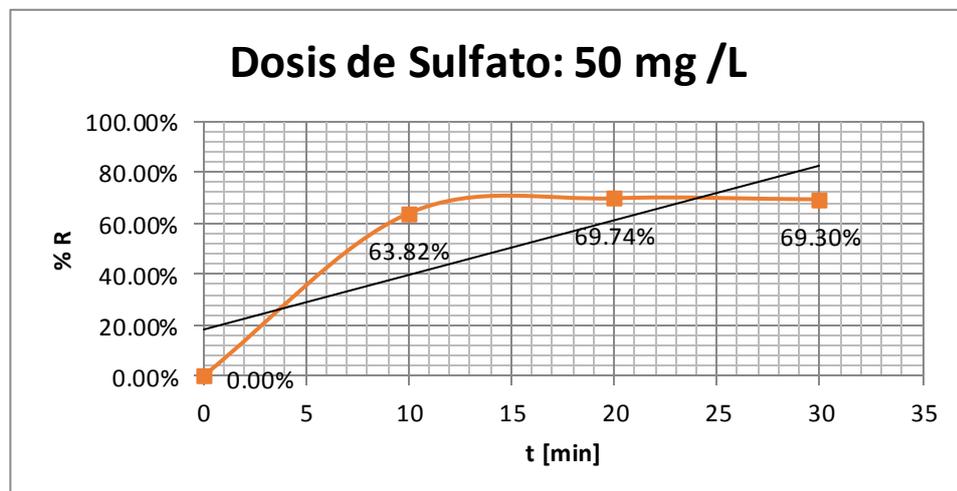
En la Gráfica 42 se presenta la gráfica tiempo vs porcentaje de remoción para las tres dosis de sulfato de aluminio. En esta se refleja que la dosis 30 mg/l es la que alcanza el mayor porcentaje de remoción.

4.3.2. Remoción a 0.80 m de profundidad.

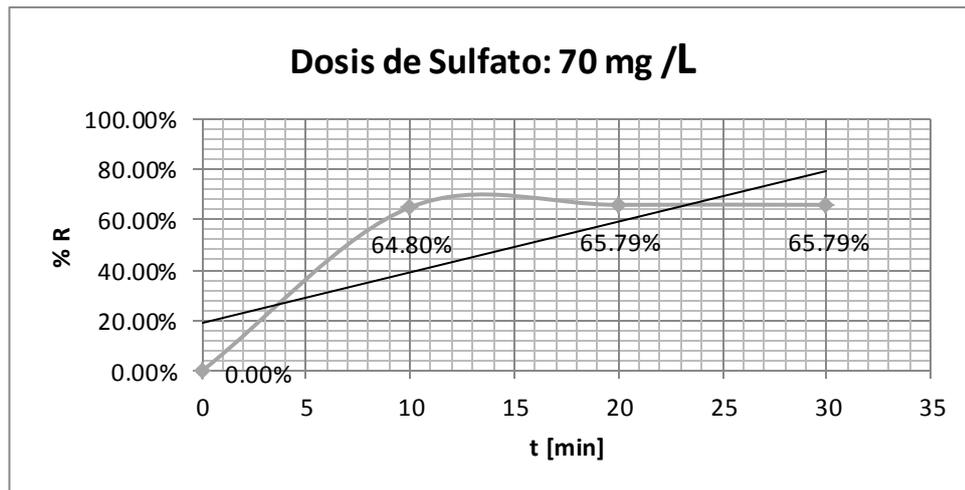
Como se aprecia en la Gráfica 43, con una dosis de sulfato de 30 mg/l se obtiene una remoción de 74.27% a los 20 minutos de ensayo. Con la dosis de 50 mg/l y en el mismo tiempo se alcanza una remoción de 69.74% (Gráfica 44) y con la dosis de 70 mg/l la remoción de partículas coloidales es de 65.79% (Gráfica 44).



Gráfica 43: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L

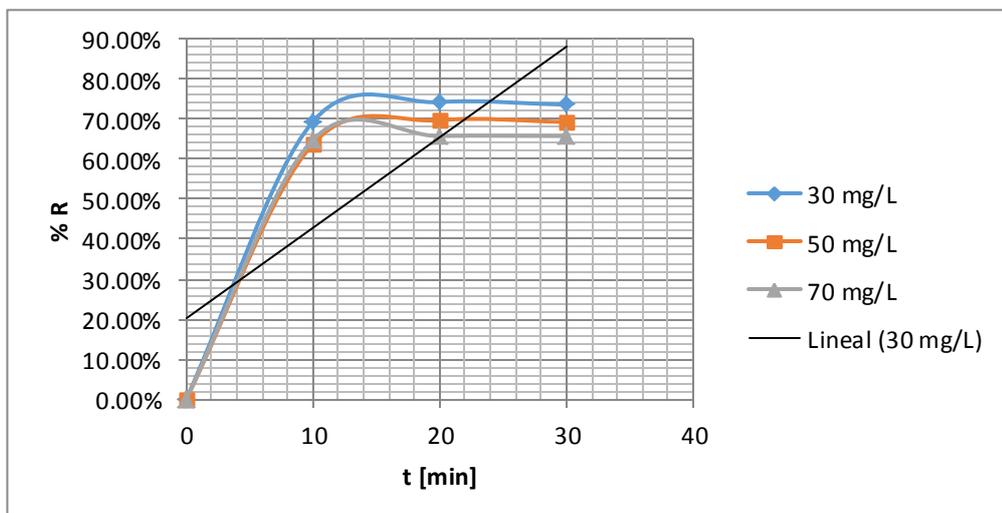


Gráfica 44: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L



Gráfica 45: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y una dosis de sulfato de 70 mg/l

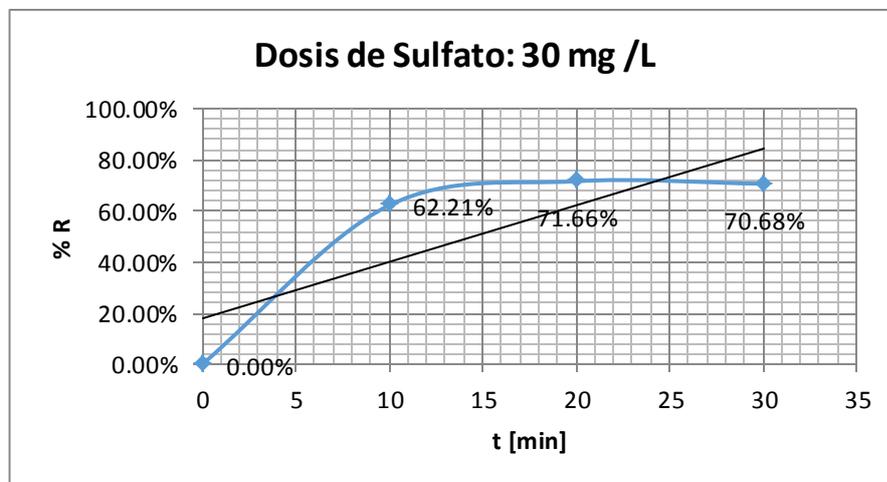
Haciendo un análisis comparativo de las tres dosis de coagulante utilizadas, se puede observar que se repite el comportamiento con la dosis de 30 mg/l, siendo la que alcanza una mayor remoción a un tiempo de 20 minutos de ensayo.



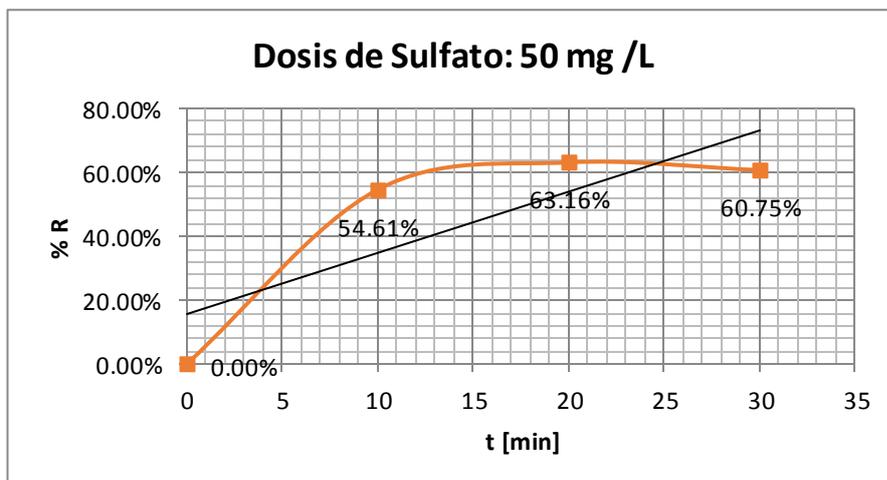
Gráfica 46: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 0.80 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio.

4.3.3. Remoción a 1.20m de profundidad.

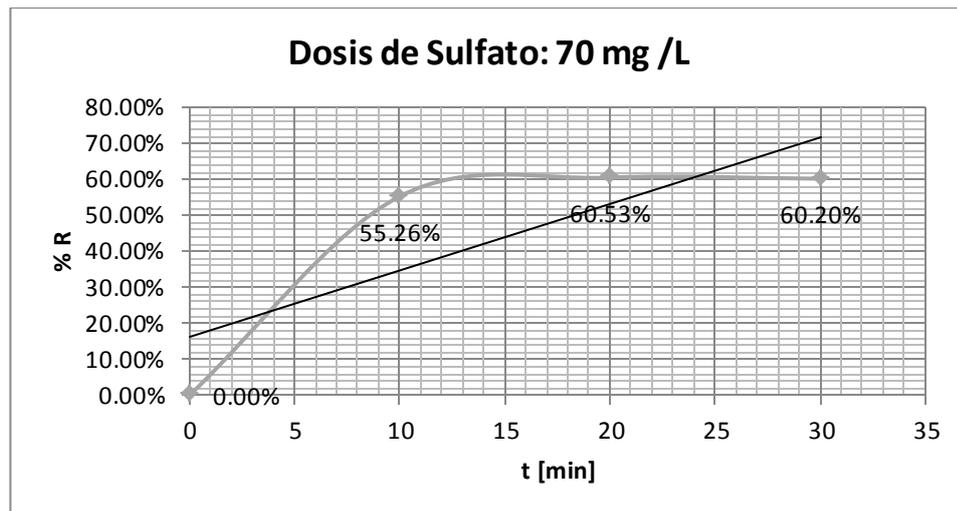
La dosis de sulfato de aluminio de 30 mg/l, de acuerdo a la Gráfica 47, generó una remoción máxima de 71.66% a los 20 minutos de ensayo.



Gráfica 47: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L

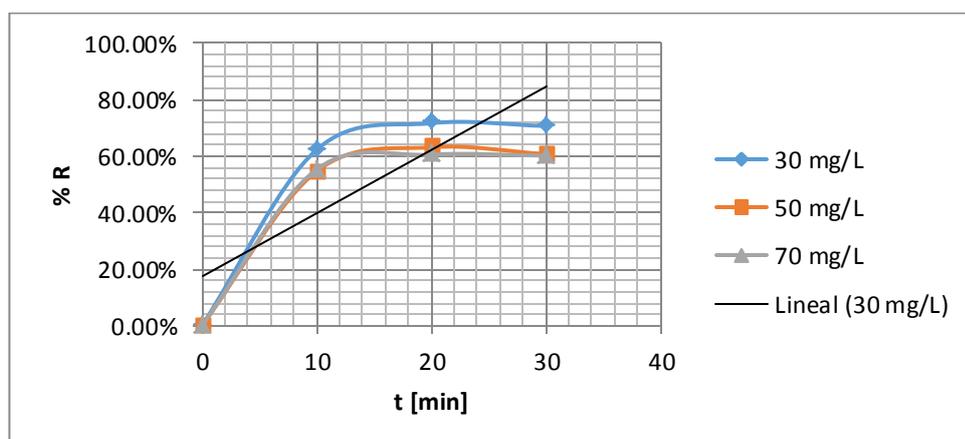


Gráfica 48: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 50 mg/l



Gráfica 49: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y una dosis de sulfato de 70 mg/l

El porcentaje máximo de remoción de sólidos totales utilizando una dosis de sulfato de aluminio de 50 mg/l fue de 63.16% como se muestra la Gráfica 48, mientras que para una dosis de 70 mg/l la remoción alcanzó el 60.53%. Ambos porcentajes se alcanzaron a los 20 minutos de ensayo.



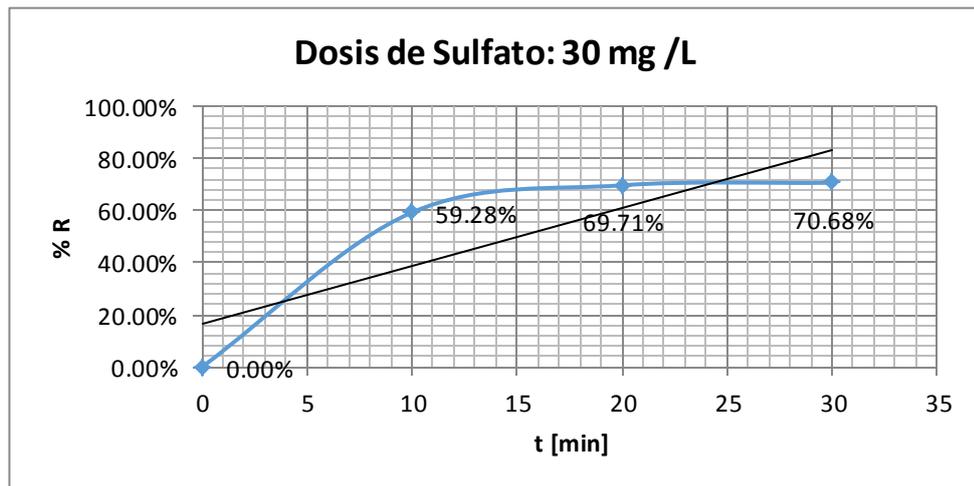
Gráfica 50: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.20 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio.

Al analizar las tres curvas de la Gráfica 50, podemos apreciar que a los 30 minutos se consigue un mayor porcentaje de remoción con las tres dosis de sulfato de aluminio. La curva de 30 mg/l alcanza una ordenada mayor, repitiendo el comportamiento encontrado en los dos niveles superiores del reactor.

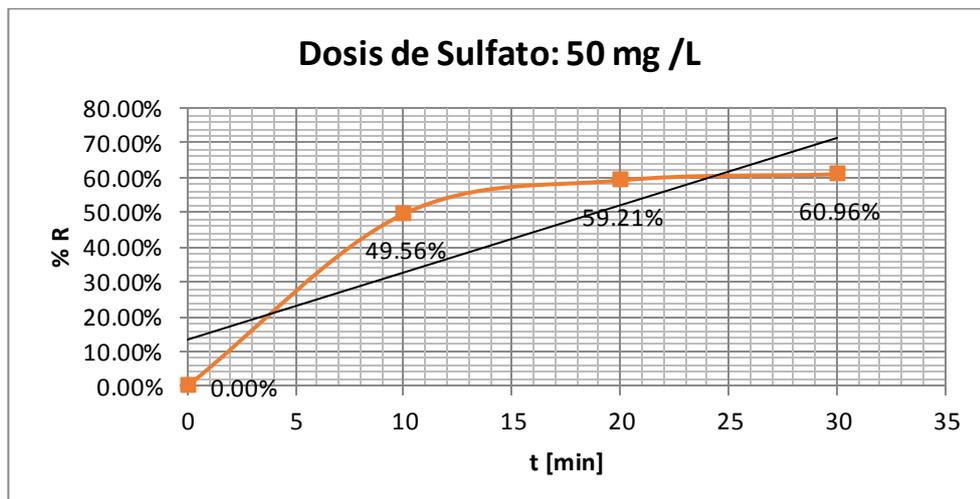
A los 10 minutos de ensayo y con las dosis de 50 y 70 mg/l se puede observar que existe una menor remoción, la cual se puede atribuir a la menor velocidad asentamiento de las partículas coloidales de la parte superior de la columna y que aumentaron la concentración de sólidos en este nivel al momento de la toma de muestra.

4.3.4. Remoción a 1.60 m de profundidad.

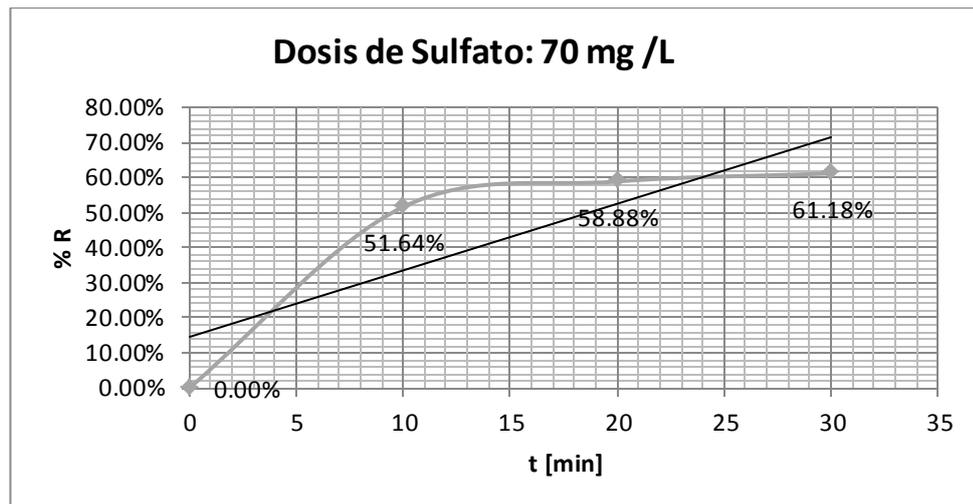
Como se observa en la Gráfica 51, con una dosis de sulfato de 30 mg/l se obtiene una remoción de 69.71% a los 30 minutos de ensayo. Con la dosis de 50 mg/l y en el mismo tiempo se alcanza una remoción de 59.21% (Gráfica 52) y con la dosis de 70 mg/l la remoción de partículas coloidales es de 58.88% (Gráfica 53).



Gráfica 51: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 30 mg/L

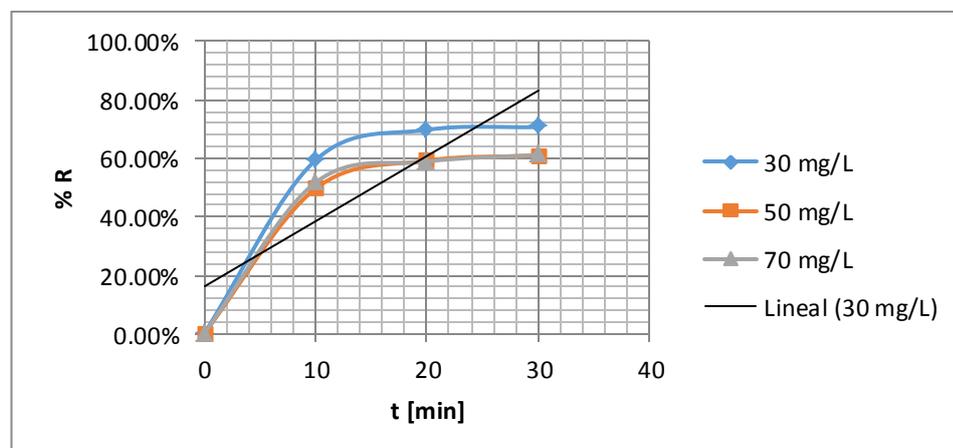


Gráfica 52: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 50 mg/L



Gráfica 53: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y una dosis de sulfato de 70 mg/L

La comparación de las tres curvas de sedimentación de las diferentes dosis de sulfato de aluminio (Gráfica 54), nos muestra que con 30 mg/l de coagulante se obtiene una mayor remoción de partículas en un menor tiempo.



Gráfica 54: Gráfica t vs % de Remoción, para una profundidad de 1.60 m y para las tres dosis de sulfato de aluminio.

Se obtuvo, de acuerdo a los análisis efectuados, que el máximo porcentaje de remoción de sólidos totales alcanzado fue de 77.85 %, con una dosis de sulfato de aluminio de 30 mg/l.

4.3.5. Curvas de Isoporcentajes de Remoción

Una vez realizado el análisis de los porcentajes de remoción alcanzados por cada dosificación de sulfato de aluminio empleada, se procedió a elaborar las curvas de isoporcentajes de sedimentación.

Para una dosis de 30 mg/L de Sulfato de Aluminio tenemos:

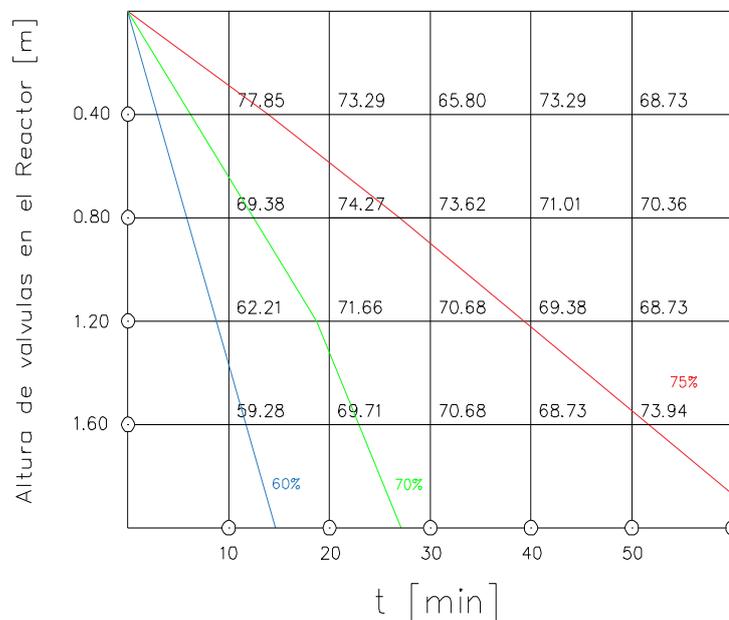


Grafico 55: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 30 mg/L de Sulfato de Aluminio

Para una dosis de 50 mg/L de Sulfato de Aluminio tenemos:

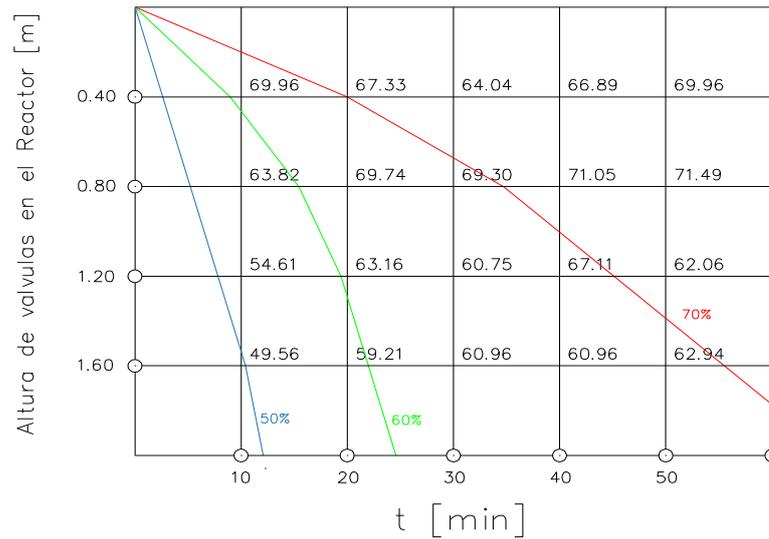


Grafico 56: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 50 mg/L de Sulfato de Aluminio

Para una dosis de 70 mg/L de Sulfato de Aluminio tenemos:

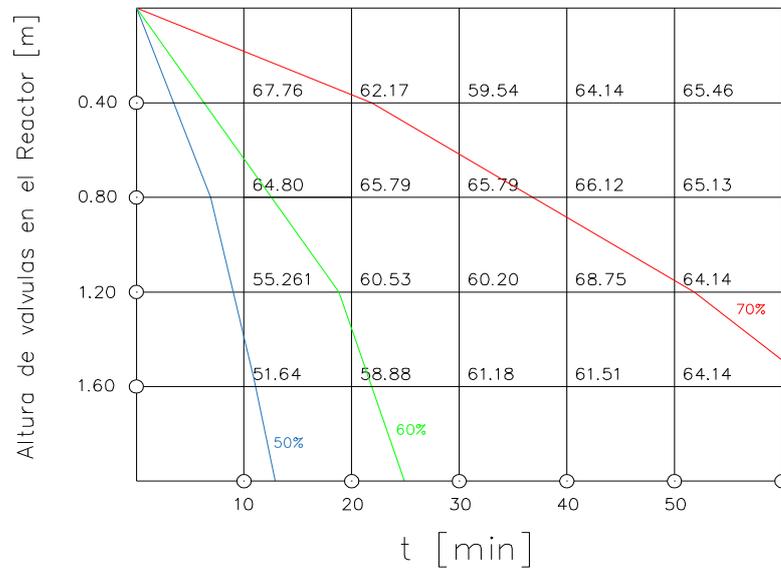


Grafico 57: Gráfica de Isoporcentajes de Sedimentación para una dosificación de 70 mg/L de Sulfato de Aluminio

4.4. Tiempo óptimo de Sedimentación

Después de analizar los ensayos de sedimentación realizados, se registraron los tiempos a los que se encontraron los mayores porcentajes de remoción en cada una de los puntos de toma de muestra del reactor y se anotaron en la tabla XII.

Tabla XII: Tiempos óptimos de sedimentación por cada punto de toma de muestra.
Tiempo en Minutos

Dosis de Sulfato [mg/L]	H [m]			
	0.40	0.80	1.20	1.60
30	10	20	20	30
50	10	20	20	30
70	10	20	20	30

El tiempo promedio en que se alcanzó un mayor porcentaje de remoción de partículas totales encontrado fue de 20 minutos.

4.4.1. Resuspensión de Sólidos.

Luego del tiempo óptimo de sedimentación se observaron mediciones mayores de concentraciones de sólidos dentro del reactor. Lo que se debió a la dinámica del proceso, en el cual se generaban flujos de agua que llevaban

los sedimentos hacia arriba del reactor, provocando que al tomar las muestras esto se vea reflejado en los resultados.

En los primeros 30 minutos del proceso se sedimentaban los flóculos y las partículas de mayor tamaño, por lo que los coloides de menor tamaño y peso fueron re-suspendidos por los flujos dinámicos dentro del reactor.

4.4.2. Velocidad de Sedimentación

A partir de las graficas de Isoporcentajes que se han elaborado, podemos determinar las velocidad de sedimentación de las fracciones de partículas que se decantan en el reactor. Es así como se obtuvo la siguiente tabla de velocidades de sedimentación para las dosificaciones de Sulfato de Aluminio utilizadas:

Tabla XIII: Velocidades de Sedimentación alcanzados por cada dosis de sulfato de aluminio

Dosis de Sulfato [mg/L]	ΔH [m]	Δt [min]	V_t [m/min]
30	0.2072	6.97	0.02973
50	0.2728	10	0.02728
70	0.1826	6.84	0.02670

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- 1) La dosis óptima de sulfato de aluminio para los ensayos de sedimentación que se realizaron fue de 30 mg/l. Se encontró que una mayor cantidad de coagulante no generaría una mayor remoción de sólidos totales en nuestro caso de estudio.
- 2) La variación del porcentaje de remoción encontrada fue de 7% aproximadamente en todos los puntos de toma de muestra del reactor, teniendo como máximo una remoción del 77.85% a 0.40 m de profundidad dentro del reactor.

- 3) La concentración inicial promedio de partículas totales encontradas en las muestras de agua fue de 784.3 mg/l.
- 4) El tiempo óptimo de sedimentación, en el que se encontraron los mayores porcentajes de remoción, es de 20 minutos. Este fue el valor medio obtenido previo a la resuspensión de partículas que se generaba en tiempos posteriores en el ensayo.
- 5) Se determinó también que la sección transversal del reactor genera variaciones en los resultados de los ensayos de sedimentación. Al momento de tomar las muestras se generan flujos ascendentes, debido a la dinámica del proceso: apertura y cerrado de las válvulas, lo que produce que las partículas más pequeñas se resuspendan; alterando así las mediciones de las posteriores muestras.

5.2. Recomendaciones

- 1) Analizar, en estudios posteriores, el mecanismo de resuspensión de las partículas coloidales, con el fin de obtener una sección ideal para los reactores y de esta manera eliminar los errores al momento de determinar las concentraciones en cada ensayo.

- 2) Previo a toma de las muestras se recomienda agitar el agua del lugar, con la finalidad de conseguir una cantidad representativa de sólidos suspendidos, la cual pueda ser medida con los equipos que se encuentran dentro del laboratorio.
- 3) Se recomienda que la columna de sedimentación (reactor) sea, en su totalidad, de material acrílico transparente, el cual permita observar con mayor claridad el proceso de sedimentación.
- 4) También se recomienda, que la columna de sedimentación tenga una sección transversal circular, que permita, en la medida de lo posible, que el proceso de mezclado del coagulante sea uniforme en toda la sección del reactor y de esta manera no existan puntos muertos dentro del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andía, Y. (2000). *Tratamiento de Agua Coagulación Floculación*. Lima: SEDAPAL.
2. Cadena, M., & Yanez, A. (2002). Evaluación del Potencial Turístico Recreativo del Lago de la Espol. *Tesis de Grado*. Guayaquil, Ecuador: ESPOL.
3. Castrillón, D., & Giraldo, M. (2012). Determinación de las Dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado Tipo B en función la Turbiedad y el color para la Potabilización del agua en la Planta de Tratamiento de Villa Santana. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
4. Gómez Puentes, N. A. (2005). Remoción de Materia Orgánica por Coagulación - Floculación. *Tesis de Ingeniería*. Manizales, Colombia.
5. Huisman, L. (1982). *Sedimentation and Flotation*. Delft University of Technology.
6. I. Tejero, J. S. (Marzo de 2007). *Universidade da Coruña*. Obtenido de Página Web Unidversidade da Coruña : [ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Primer_Curso/Sistemas_de_Saneamiento/textos%20basicos/master___complemento___PROCESOS_DE_DECANTACION___SEDIMENTACION_\(viene_de_SABA\).pdf](ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Primer_Curso/Sistemas_de_Saneamiento/textos%20basicos/master___complemento___PROCESOS_DE_DECANTACION___SEDIMENTACION_(viene_de_SABA).pdf)
7. Interagua C. Ltda. (9 de junio de 2003). *Interagua*. Obtenido de <http://www.interagua.com.ec/extranet/modules.php?name=News&file=article&sid=97>
8. Martínez, F. (2007). Tratamiento de Aguas Residuales Industriales Mediante Electrocoagulación y Coagulación Convencional. Ciudad Real, España: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.
9. O'Connor, T. P., Fisher, D., Field, R., Cigana, J., Gagné, B., & Couture, M. (2002). *Testing Solids Settling Apparatuses for Design and Operation of Wet-Weather Flow Solids-Liquid Separation Processes*. Ohio: United States Environmental Protection Agency.
10. Sánchez Lavado, F. (Septiembre de 2007). Tratamientos combinados Físico-Químicos y de Oxidación para la depuración de Aguas

Residuales de la Industria Corchera. *Tesis Doctoral*. Badajoz, España: Universidad de Extremadura.

11. Tchobanoglous, G., & Crites, R. (2000). *Sistema de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. Bogotá: McGraw-Hill.
12. United States Environmental Protection Agency. (7 de julio de 2014). *Drinking Water Treatability Database*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency:
<http://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do?treatmentProcessId=1934681921>
13. Valencia Montoya, G. (1980). *CEPIS*. Obtenido de Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental :
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/010439/010439-05.pdf>
14. Vargas, I. L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría* (Vol. II). Lima: CEPIS/OPS.
15. Westerhoff, G. P. (1968). *Coagulation in Waste Water Treatment. Tesis de Maestría*. Newark, New Jersey, United States: New Jersey Institute of Technology.