

**MODELO DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MEDIBLES EN LÍNEA  
QUE AFECTAN EL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA  
DE COAGULANTE EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE  
DE BOSCONIA, DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA  
S.A. E.S.P.**

**DECSY LILIANA ACUÑA ZAMBRANO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
BUCARAMANGA  
2008**

**MODELO DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MEDIBLES EN LÍNEA  
QUE AFECTAN EL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA  
DE COAGULANTE EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE  
DE BOSCONIA, DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA  
S.A. E.S.P.**

**DECSY LILIANA ACUÑA ZAMBRANO**

**Director**

**KENTO TARO MAGARA GÓMEZ**

**Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
BUCARAMANGA  
2008**

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por las cosas bellas que diariamente me brinda, a mi familia motor de mi existencia, a mi gran apoyo Daniel, a mi amiga que en la distancia aun sabe acompañarme, a mis queridos amigos los civiles, al director y amigo de esta tesis el Ingeniero Kento Taro Magara, a mis amigas Diana Ibáñez y Luz Adriana, a mis profesores por sus aportes educativos y morales y a mis compañeros del acueducto que con su experiencia y humildad hacen parte de mis mejores recuerdos.

*Liliana Acuña Zambrano*

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. MARCO REFERENCIAL	5
2.1 MARCO TEÓRICO	5
2.1.1 Coagulación Floculación	5
2.1.2 Prueba de trazadores	10
2.1.3 Streaming Current Detector (SCD)	11
2.1.4 Redes neuronales	13
2.2 MARCO GEOGRÁFICO	17
2.3 MARCO LEGAL	18
3. METODOLOGÍA	20
3.1 PROCESOS DE OPERACIÓN Y ESTRUCTURAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA	20
3.1.1 Etapa de Captación	20
3.1.2 Etapa de Pre – tratamiento	20
3.1.3 Etapa de Tratamiento	21

3.2	BASE DE DATOS CONSTRUIDA A PARTIR DE LAS CARACTERISTI- CAS MÁS IMPORTANTES DEL AGUA CON RESPECTO A LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE DETERMINADO POR MEDIO DE LA PRUEBA DE JARRAS	21
3.2.1	Registro de datos iniciales	22
3.2.2	Prueba de jarras	22
3.3	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA CRUDA DESDE CAPTACIÓN HASTA EL INICIO DEL TRATAMIENTO PARA UN CAUDAL DE 850 L/s POR MEDIO DE UNA PRUEBA DE TRAZADORES	24
3.4	CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO Y LÍQUIDO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA	27
3.5	SEGUIMIENTO DEL STREAMING CURRENT DETECTOR (SCD)	29
3.6	APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES A LAS VARIABLES ESTUDIADAS	29
3.6.1	Registro de datos	29
3.6.2	Regresión lineal	29
3.6.3	Aplicación de la red neuronal	30
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
4.1	BASE DE DATOS CONSTRUIDA A PARTIR DE LAS CARACTERISTI- CAS MÁS IMPORTANTES DEL AGUA CON RESPECTO A LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE DETERMINADO POR MEDIO DE LA PRUEBA DE JARRAS	32
4.1.1	Prueba de jarras	32

4.2	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA CRUDA DESDE CAPTACIÓN HASTA EL INICIO DEL TRATAMIENTO PARA UN CAUDAL DE 850 L/s POR MEDIO DE UNA PRUEBA DE TRAZADORES	36
4.3	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO Y LÍQUIDO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA	45
4.4	SEGUIMIENTO DEL STREAMING CURRENT DETECTOR (SCD)	46
4.4.1	Uso y manejo del Streaming Current Detector (SCD)	47
4.5	APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES A LAS VARIABLES ESTUDIADAS	49
4.5.1	Registro de datos	49
4.5.2	Regresión lineal	50
4.5.3	Aplicación de la red neuronal	53
4.5.4	Entrenamiento de la Red Neuronal	56
5	CONCLUSIONES	60
6	RECOMENDACIONES	62
7	BIBLIOGRAFIA	63
8	ANEXOS	65

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Tiempo de retención.	27
Gráfica 2. Turbiedad vs. Dosis óptima.	34
Gráfica 3. Color vs. Dosis óptima.	35
Gráfica 4. Alcalinidad vs. Dosis óptima.	36
Gráfica 5. Captación-Cámara de llegada.	40
Gráfica 6. Cámara de llegada-Pre tratamiento.	44
Gráfica 7. Regresión lineal dosis óptima vs. Turbiedad.	51
Gráfica 8. Dosis de coagulante vs. Color.	51
Gráfica 9. Dosis de coagulante vs. pH.	52
Gráfica 10. Dosis de coagulante vs. Alcalinidad.	52
Gráfica 11. Relación turbiedad, pH, alcalinidad, color, conductividad, Dosis de coagulante vs. número de muestras	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Prueba de jarras.	32
Tabla 2. Prueba de trazadores Captación - Cámara de llegada.	37
Tabla 3. Prueba de trazadores Cámara de llegada - pre tratamiento.	41
Tabla 4. Seguimiento del Streaming Current Detector (SCD).	41
Tabla 5. Análisis de regresión lineal múltiple	50
Tabla 6. Red Neuronales Sulfato Líquido	52



## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Neurona Biológica y Artificial.	14
Figura 2. Neurona Estándar.	15
Figura 3. Esquema sistema de control propuesto.	49
Figura 4. Variables vs Muestras.	54
Figura 5. Relación Turbiedad (NTU) vs. Dosis de coagulante (mg/L)	55
Figura 6. Relación Color (UPC) vs. Dosis de coagulante (mg/L)	55
Figura 7. Red Neuronal.	56

## LISTA DE CUADROS

	<b>pág.</b>
Cuadro 1. Valores máximos de parámetros para la dosis óptima de coagulante para agua potable según Resolución 2115/07.	23
Cuadro 2. Valores máximos de parámetros para hallar dosis óptima de coagulante en agua sedimentada según AMB Planta Bosconia.	24
Cuadro 3. Volumen de las estructuras de captación de la planta de agua potable Bosconia.	25
Cuadro 4. Volumen de las estructuras de pre tratamiento de la planta de agua potable Bosconia.	25
Cuadro 5. Dimensiones de las estructuras de la primera etapa de la prueba de trazadores.	40
Cuadro 6. Dimensiones de las estructuras de la segunda etapa de la prueba de trazadores.	43

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	<b>pág.</b>
Fotografía 1. Planta Bosconia.	18
Fotografía 2. Cámara de llegada.	44
Fotografía 3. Inicio de tratamiento.	44
Fotografía 4. SCD.	47
Fotografía 5. Bomba de frecuencia	47

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Planos Estructurales Planta de Tratamiento de agua potable Bosconia	65
Anexo B. Prueba de Jarras	70
Anexo C. Seguimiento al Streaming Current Detector	113

## RESUMEN

La planta de tratamiento de agua potable Bosconia es la de mayor capacidad, tamaño y eficiencia en Santander; aporta el 26% del agua suministrada al área metropolitana y puede llegar a captar aproximadamente un caudal de 2400 L/s, y tratar turbiedades de hasta 3000 NTU. A su vez, mantiene condiciones inestables de turbiedad y color, ya que la captación del recurso se realiza del Río Suratá, el cual, metros arriba presenta descargas de minería; por esta razón, es necesaria la presencia de operadores las 24 horas. La dosificación de coagulante se controla mediante un equipo llamado "Streaming Current Detector (SCD)" cuya función principal es la de ajustar la dosis de sulfato de aluminio en relación con la densidad de carga del agua, ya que la presencia de partículas que ocasionan turbiedad y color, afectan esta propiedad. Como resultado se obtiene la dosis óptima aplicada al agua a tratar y así, se optimiza el consumo de coagulante. La finalidad de este proyecto fue desarrollar un modelo de correlación entre las variables de agua cruda: pH, Turbiedad, Color, y Alcalinidad, respecto a la Dosis Óptima de coagulante, que sirva como base para el diseño e implementación de un sistema automático de dosificación de coagulante para las condiciones de operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable "Bosconia" del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. El desarrollo del modelo de correlación se basó en el análisis de redes neuronales. Este proyecto hace un gran aporte, ya que la aplicación exitosa de un sistema automático de dosificación de coagulante, minimiza la necesidad de realizar pruebas de jarras continuamente, facilita la labor de los operadores, y optimiza el gasto de coagulante.

**PALABRAS CLAVES:** Turbiedad, Conductividad, Alcalinidad, Color, pH, Redes Neuronales

## ABSTRACT

The water treatment plant in Bosconia is the one with biggest capacity, size and efficiency in Santander; it gives 26% of water supplies to the metropolitan area and is capable of capturing a flow of 2400 L/s approximately, and to treat turbidities of up to 3000 NTU. It also keeps unstable conditions of turbulence, and color, since the reception of the resource is carried out from Suratá River, which meters up has mining discharges; for that reason, it is needed the presence of operators 24 hours a day.

Coagulant dosage is controlled by means of equipment called "Streaming Current Detector (SCD)" whose main function is adjusting the dose of aluminum sulfate according to the charge density of the water, since the presence of particles that cause turbidity and color, affects this property. As a result the exact dose that is going to be applied to the water to be treated is obtained; and thus the consumption of coagulant is optimized.

The purpose of this project was to develop a correlation model between the variables of raw water: pH, Turbidity, Color, and Alkalinity, with the exact dose of coagulant that serves as a base for the design and implementation of an automatic coagulant dosage system for the operation conditions of the treatment Plant of Drinking Water "Bosconia" of the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct. The development of the correlation model was based on neural network analysis.

This project makes a huge contribution, since the successful application of an automatic system of coagulant dosage minimizes the need to carry out test of jars continually, ease the work of the operators, and optimizes the expense of coagulant agent.

**Key Words:** pH, Turbidity, Color, Alkalinity, Conductivity, neural network

## GLOSARIO

**ALCALINIDAD:** es la medida de la capacidad tampón de una disolución acuosa, es decir, la capacidad de ésta para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base.

**COAGULACION:** la coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.

**COLOR:** son causantes de color en cuerpos de aguas naturales, el material vegetal en descomposición, tipo ligninas, taninos, ácidos húmicos, algas etc. y algunos disueltos de hierro y magnesio.

**FLOCULACION:** la floculación es un proceso químico donde se aglutina las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

**pH:** es una medida de la actividad de los iones de hidrogeno,  $H^+$ , presentes en el agua.

**RED NEURONAL:** se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida.

**STREAMING CURRENT DETECTOR (SCD):** es un instrumento de medición de carga iónica y coloidal superficial neta (positiva y negativa) el cual, envía una señal a un monitor indicando la densidad de carga que posee el agua, para neutralizarla a través de la variación en la aplicación de coagulante.

TURBIEDAD: la turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos.

PLC: es un dispositivo electrónico muy utilizado en la automatización industrial para el control de plantas de procesos, máquinas, procesos industriales entre otros, el PLC toma datos en tiempo real, analiza dichos datos y toma decisiones según la programación que contenga, también poseen una interfase con la cual se pueden comunicar en una red de área local con un computador u otro PLC.



## INTRODUCCIÓN

La potabilización del agua actualmente es objeto de importantes estudios sobre calidad, eficiencia y bajos costos operacionales, donde el objetivo principal es encontrar soluciones a diferentes problemáticas tales como la contaminación de fuentes hídricas causada por vertimientos, la escasez del recurso, el abastecimiento a la población entre otras. Dentro de las etapas del tratamiento, son comunes la coagulación y la floculación, que dependen no solo de las estructuras de la planta sino también de diferentes variables del agua a tratar que incluyen turbiedad, alcalinidad, pH, y color, así como la dosis de agente coagulante. Esta dosis es determinada por medio de una prueba de jarras y dimensionada para las condiciones de operación de la planta; cuando se opera con exceso de coagulante aumentan los costos del tratamiento, a su vez, cuando hay déficit conlleva a un incumplimiento de los objetivos de la calidad del agua y seguramente a daños en la salud.

Con el propósito de optimizar el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante se ha llegado a desarrollar varias tecnologías, entre otras un dispositivo llamado Streaming Current Detector (SCD), el cual, determina la dosis de coagulante con respecto a la densidad de carga eléctrica residual. Las partículas que causan turbiedad en el agua tienen carga negativa y el coagulante, carga positiva; la cantidad de coagulante añadida dicta la magnitud y signo de la carga eléctrica neta.

La planta de tratamiento Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con un dispositivo SCD que hasta el momento no ha dado los resultados esperados. Por medio de este proyecto, se busca construir un modelo que correlacione las variables medibles en línea como lo es turbiedad, pH y conductividad que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de

coagulante, y a partir de este estudio desarrollar un sistema automático de control que haga mas eficiente la operación de la planta en estudio.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Correlacionar las propiedades del agua que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante en una planta de tratamiento de agua potable por medio de un modelo matemático o empírico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Familiarizarse con los diferentes procesos de operación de la planta de tratamiento de agua potable.
- Construir una base de datos de las propiedades turbiedad, pH, color y alcalinidad, con respecto a las dosis de coagulante determinadas por medio de pruebas de jarras utilizadas en la planta, como complemento a los datos históricos disponibles.
- Determinar el tiempo de retención del agua cruda desde captación hasta el inicio de tratamiento para un caudal de 850 L/s por medio de una prueba de trazadores.
- Calcular la concentración de sulfato de aluminio sólido y líquido aplicado en la planta de tratamiento de agua potable.
- Analizar la utilidad del Streaming Current Detector como complemento al sistema automático de aplicación de dosis óptima de coagulante.

- Correlacionar las variables en estudio aplicando el concepto de redes neuronales artificiales.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 MARCO TEORICO

#### 2.1.1 Coagulación – Floculación

Se llama coagulación – floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floc. Dicho proceso se usa para:

- a. Remoción de la turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- b. Remoción del color verdadero y aparente.
- c. Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d. Destrucción de algas y plancton en general.
- e. Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados suspendidos o compuestos orgánicos entre otros.<sup>1</sup>

Existen dos aspectos fundamentales en la coagulación – floculación:

- a. La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas.

---

<sup>1</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y practica de la purificación del agua, 3. Ed. Tomo 1. Cap. 1 30p.

- b. El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

La coagulación es probablemente la fase más importante del tratamiento del agua. Una coagulación inadecuada no puede ser corregida en una etapa posterior de tratamiento puesto que perjudica la eficiencia de todos los procesos siguientes. La optimización de este proceso depende de una serie de variables que deben ser consideradas tales como: características físicas y químicas del agua, dosis de coagulante, concentración del coagulante, punto de aplicación del coagulante, intensidad y tiempo de mezcla, y tipo de dispositivo de mezcla.

Entre las características físicas y químicas del agua que más influencia tienen en el proceso son la concentración de coloides (evaluada indirectamente mediante la determinación de turbiedad y color), el pH y la alcalinidad.<sup>2</sup>

Turbiedad: la turbiedad es la propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida de diseminar en todas las direcciones la luz que pasa por ella. Solo cuando la luz pasa por un líquido ideal homogéneo, no se produce diseminación ninguna del rayo luminoso y por tanto la turbiedad es cero. La turbiedad está principalmente formada por arcillas en dispersión; en general a la tierra fina a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua.

Naturaleza del color: según Christman y Ghassemi (1961) la aparición de color en el agua puede deberse a:

- La extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas.

---

<sup>2</sup> JORGE ARTURO PEREZ PRADA, Manual de potabilización del agua, 3. Ed. Cap. 4, 62p.

- La solución de productos de descomposición de las maderas.
- La solución de materia orgánica del suelo.
- Una combinación de estos procesos.<sup>3</sup>

pH: Es una medida de la actividad de los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en el agua. En la mayoría de aguas potables, la actividad del ion hidrógeno es casi igual a su concentración.<sup>4</sup>

Relación entre color y pH: el color presenta un “efecto indicador”, esto es que su intensidad cambia con el pH. En general, al subir el pH se incrementa el color, pero el mayor incremento se obtiene con aguas que tiene originalmente un color bajo.<sup>5</sup> El pH óptimo para la coagulación de aguas con color es mas bajo (4 - 6) que para aguas con turbiedad (6.5 - 8.5).<sup>6</sup>

Alcalinidad: es una medida de la capacidad de un agua para neutralizar ácidos y bases.<sup>7</sup>

Coagulación con sales de aluminio: las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado, entre estas se conocen el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de Polialuminio. El sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  es el coagulante que por su bajo costo y su manejo relativamente sencillo se usa con mayor frecuencia en las plantas de tratamiento de agua potable. Es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que con el almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros.<sup>8</sup>

<sup>3</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y practica de la purificación del agua, 3. Ed. Tomo 1. Cap. 2, Mc Graw Hill. Bogotá. 2000, 21-25p.

<sup>4</sup> AMERICAN WATER WORKS ASOCIATION, Calidad y tratamiento del agua, Manual de suministros de agua comunitaria. Cap. 17, 1083p.

<sup>5</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, op. cit., p.28.

<sup>6</sup> JORGE ARTURO PEREZ PRADA, Manual de potabilización del agua, 3. Ed. Cap. 4, 62p.

<sup>7</sup> AMERICAN WATER WORKS ASOCIATION, op. cit., p.1085.

<sup>8</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y practica de la purificación del agua, 3. Ed. Tomo 1. Cap. 2, Graw Hill. Bogotá. 2000, 51p.

Aglutinación de partículas: Los objetivos básicos en la floculación son:

- a. Reunir los microfloculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- b. Compactar el floc (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación - filtración).<sup>9</sup>

Determinación de la dosis optima de coagulante: el objetivo de este ensayo es poder determinar la dosis de coagulantes que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y hace que se forme un floc pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro. El floc que se busca, es aquel que da mayor rendimiento en el conjunto de procesos de clarificación.

Existe un equipo a escala piloto que actúa bajo las mismas condiciones en la cuales se produce la floculación en la planta de tratamiento:

- *Equipo de prueba de jarras:* Este ensayo es uno de los más importantes en el control del proceso de coagulación química del agua. Se realiza, entre otros, con los siguientes propósitos:
  - Selección del tipo de coagulante más efectivo.
  - Determinación del pH óptimo de coagulación.
  - Evaluación de la dosis óptima de coagulante.
  - Determinación de la dosis de ayudante de coagulación.
  - Determinación del orden más efectivo de adición de los diferentes productos químicos.

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 126.



- Determinación de los niveles óptimos de mezcla, gradiente de velocidad y tiempos de mezcla.
- Evaluación de la necesidad de proveer floculación y sedimentación previa a la filtración o factibilidad de filtración directa.

Los resultados de este ensayo tienen gran aplicabilidad en el diseño y operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda<sup>10</sup>. El equipo de jarras consta de 6 paletas acopladas mecánicamente para operar a la misma velocidad, generalmente entre 10 y 100 rpm.; los tiempos utilizados en coagulación, floculación y sedimentación son respectivamente de 1 minuto y 15 minutos. Como jarras de coagulación se han usado vasos de precipitados, generalmente de 1 a 2 litros, así como jarras rectangulares de 2 litros en acrílico transparente.<sup>11</sup>

Otros equipos que intervienen en la determinación de la dosis óptima son:

- Turbidímetro: la medición de turbiedad del agua después de floculada y sedimentada durante un cierto tiempo (turbiedad residual) suele considerarse como el parámetro más importante para caracterizar el proceso, para medir la turbiedad se han establecido las unidades nefelométricas de turbiedad (UNT), por medio de un turbidímetro de transmisión o con uno de disseminación.
- Medidor de pH: la medición de pH antes y después de la floculación tiene una importancia básica. Por tanto, debe disponerse siempre de un sistema de medida de pH con electrodos.

---

<sup>10</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y práctica de la purificación del agua. 3Ed. Tomo I. Mc Graw Hill. Bogotá. 2000. 35p.

<sup>11</sup> T.H.Y. Fundamentos de control de la calidad del agua., ed. Noriega, 139p.

- Comparador de color: con frecuencia existe más interés en tratar de remover el color que la turbiedad. En estos casos la medición del color residual del agua después de floculada y sedimentada puede servir para caracterizar el ensayo. El color puede medirse con equipos especiales (espectrofotómetro) y se expresa en unidades de color.<sup>12</sup>

El reactivo utilizado para esta práctica es solución de Sulfato de Aluminio.

### **2.1.2 Prueba de trazadores<sup>13</sup>**

Las pruebas de trazadores son de gran utilidad para conocer el comportamiento hidráulico de los mezcladores, floculadores y sedimentadores.

Sustancias trazadoras:

- a. Colorantes como fluoresceína o rodamina.
- b. Iones como cloruros, fluoruros, o nitratos.
- c. Elementos radioactivos como isótopos.

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar (ya sean fluoruros o cloruros), se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas. Es conveniente escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione en gran cantidad con los compuestos que existen en el agua, y por tanto la concentración total que se determine a la salida, sea sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada.

---

<sup>12</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 Ed. Tomo 1. Mc Graw Hill. Bogotá. 2000. 165-166p.

<sup>13</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA, Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 Ed. Tomo I. Cap. 7, Mc Graw Hill. Bogotá. 2000. 354-359p.

La adición de trazadores puede hacerse de dos maneras distintas: en forma instantánea y en forma continua. Para el primer caso, se aplica una concentración inicial ( $C_0$ ) a la entrada del floculador o sedimentador en un tiempo muy corto, inferior a  $1/30$  del tiempo teórico de detención ( $t_0$ ) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua que se piensa analizar. Y para el segundo caso, se aplica la concentración ( $C_0$ ) continuamente, por un tiempo no menor de tres veces el periodo de detención nominal, y luego se interrumpe bruscamente la dosificación. La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando se paraliza la misma). Además, se obtiene una concentración de equilibrio. La dosis instantánea se usa preferentemente cuando se utilizan cloruros y la dosis continua cuando se utilizan fluoruros.

### **2.1.3 Streaming Current Detector (SCD)<sup>14</sup>**

El controlador de dosis es un instrumento de medición de carga. La carga que éste mide es la carga iónica y coloidal superficial neta (positiva y negativa) de la muestra analizada. Esta carga está relacionada con el potencial zeta, sin embargo no tienen el mismo valor. La muestra de agua tratada hacia la celda de muestreo donde es llevada a la sonda durante la subida del pistón y es expulsada de ella durante la bajada del pistón. Las partículas contenidas en el agua son inmovilizadas temporalmente en la superficie de la sonda y el pistón. A medida que el agua es movida hacia atrás y adelante por el pistón, las cargas que rodean estas partículas (+ y -) son llevadas hacia los electrodos. Este movimiento de cargas genera una corriente alterna llamada carga del agua. El valor de la carga se hace mas negativo con un incremento en la turbidez o una disminución en la dosis de coagulante; y el valor de carga se hace mas positivo con una disminución

---

<sup>14</sup> Manual de operaciones streaming Current Monitor, Chemtrac System Inc. 2004

en turbidez o un aumento en la dosis de coagulante. Las variaciones en la carga del agua también pueden ser generadas por otras razones, que se explican a continuación:

El valor de la carga del agua (SCV), se hace mas positivo cuando existe:

- Decrecimiento en pH
- Decrecimiento en flujo de agua cruda
- Decrecimiento en color
- Decrecimiento en turbidez del agua cruda
- Decrecimiento en cal
- Decrecimiento en causticidad
- Decrecimiento en polímeros aniónicos
- Aumento en sulfato de aluminio, sulfato férrico/oso, PAC
- Aumento en polímeros catiónicos

El valor de la carga del agua (SCV), se hace más negativo cuando existe:

- Aumento en pH
- Aumento en flujo de agua cruda
- Aumento en color
- Aumento en turbidez del agua cruda
- Aumento en cal
- Aumento en causticidad
- Aumento en polímeros aniónicos
- Decrecimiento en sulfato de aluminio o PAC
- Decrecimiento en polímeros catiónicos
- Decrecimiento en cloro

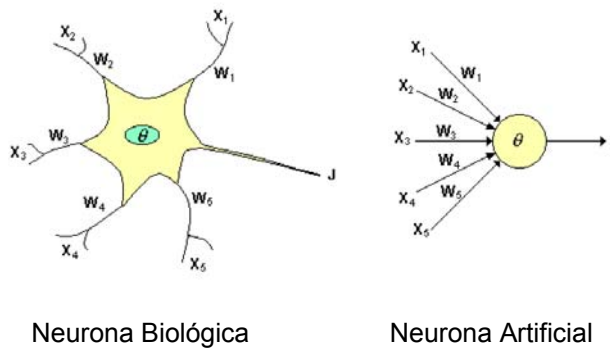
#### **2.1.4 Redes neuronales**

Las redes neuronales son un sistema basado en el comportamiento biológico de las neuronas del ser humano, siendo ésta la unidad funcional del sistema nervioso, formada por el cuerpo celular que contiene núcleo y la mayor parte del citoplasma; unas prolongaciones cortas, normalmente muy ramificadas, que salen del cuerpo celular y que reciben el nombre de dendritas; y una prolongación mas larga denominada axón. El axón suele tener terminaciones llamadas “botones terminales”, que se encuentran en proximidad con las dendritas o en el cuerpo de otra neurona. La relación existente entre el axón de una neurona y las dendritas de otra se llama sinapsis, a través de la sinapsis, una neurona envía impulsos de una mensaje desde su axón hasta las dendritas o un cuerpo de otra, trasmitiéndole así la información nerviosa.

Los botones sinápticos están ubicados, en cada extremo de las ramificaciones del axón. En el interior de cada botón sináptico existen pequeños depósitos llenos de una sustancia química llamada neurotransmisores que ayudan a traspasar la información de una célula a otra.

Existen dos tipos de sinapsis: las sinapsis excitadoras cuyos neurotransmisores provocan disminución del potencial en la membrana de la célula postsináptica facilitando la generación de pulsos a mayor velocidad. La sinapsis inhibidoras cuyos neurotransmisores estabilizan el potencial de la membrana, dificultando la emisión de pulsos. Esto mismo, se trata de asimilar en una neurona artificial, conocida también como nodo, neuronodo, celda unidad o elemento de procesamiento (PE).

## Figura 1. Neurona Biológica y Neurona Artificial



Fuente: Guía Laboratorio Ing. Juan Carlos Villamizar

Las entradas  $X_i$  representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas. Los pesos  $W_i$  son la intensidad de la sinapsis que conecta dos neuronas; tanto  $X_i$  como  $W_i$  son valores reales.  $\Theta$ : es la función umbral que la neurona debe superar para activarse; este proceso ocurre biológicamente en el cuerpo de la célula

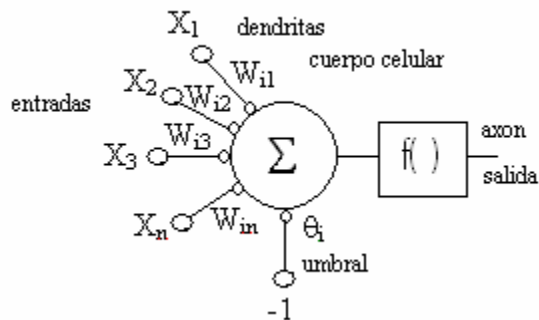
- Procedimiento de la neurona artificial

Las señales de entrada a una neurona artificial  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , son variables continuas, cada señal de entrada pasa a través de una ganancia o peso, llamado peso sináptico o fortaleza de la conexión. Los pesos pueden ser positivos (excitatorios) o negativos (inhibitorios), el nodo sumatorio acumula todas las señales de entradas multiplicadas por los pesos ponderadas y las pasa a la salida a través de una función umbral o función de transferencia.

En el desarrollo e implementación con redes neuronales se usan modelos más sencillos, uno de ellos es la neurona estándar o perceptrón que fue desarrollado por Warren McCulloch y Walter Pitts en 1943. Este modelo tiene:

- Conjunto de entradas  $x_i(t)$  y pesos sinápticos  $w_{ij}$ .
- Una regla de propagación,  $h_i(t) = \delta(w_{ij}, x_j)$ ;  $h_i(t) = \sum W_{ij} x_j$  que es la más común.
- Una función de activación  $y_i(t) = f_i(h_i(t))$ , que representa simultáneamente la salida de la neurona y su estado de activación.<sup>15</sup>

**Figura 2. Neurona Estándar**



Fuente: Guía Laboratorio Ing. Juan Carlos Villamizar

Las redes neuronales se han utilizado en plantas de tratamiento de agua potable con el fin de crear un software que controle la dosis de coagulante y además aplique la cantidad exacta sin desperdiciar teniendo en cuenta las variables en línea como pH, turbiedad, conductividad.

Según Nicolás Valentín y Thierry Denoëux<sup>16</sup> en su artículo publicado en octubre de 2000, titulado como A neural network-based software sensor for coagulation control in a water treatment plant que traduce: un sensor de software para el

<sup>15</sup> GUIA DE LABORATORIO, Ing. Juan Carlos Villamizar, profesor Facultad Ingeniería Electrónica UPB, Bucaramanga

<sup>16</sup> Nicolas Valentin y Thierry Denoëux, A neural network-based software sensor for coagulation control in a water treatment plant, oct, 2000.

control de la coagulación en una planta de tratamiento de agua potable, donde se concluye que al aplicar una red neural en la planta de tratamiento de agua potable los beneficios esperados en el agua tratada son varios pues se obtiene un agua de alta calidad y un servicio con mayor seguridad, ya que el sistema responde de manera eficaz y fiable durante largos periodos de tiempo, además de ello se logra un importante ahorro en el uso de coagulante; el rendimiento de la red depende de la calidad de los datos disponibles para la formación del sistema, por consiguiente, es necesario la continua actualización de los datos, teniendo en cuenta que estos datos obtenidos fueron los resultados de pruebas de jarras; sin embargo es indispensable seguir trabajando para desarrollar un modelo que tenga en cuenta la dinámica del proceso y que permita predecir los parámetros del agua tratada (principalmente la turbiedad) en la salida del proceso de clarificación.

Por otro lado de acuerdo al artículo Modelización (de la dosis de coagulante para una planta de tratamiento de agua potable (N. Valentin, T. Denoeux, F. Fotohi), donde proponen utilizar en primer lugar un *Single-parameter data validation* (único parámetro de validación de datos) ya que el sistema tiene que funcionar con pocos datos fiables de entrada, los datos de validación son un proceso fundamental, el objetivo es asociar a los datos brutos un nivel de fiabilidad. La confianza se mide por un verdadero número perteneciente a  $[0,1]$ , donde cero indica los datos no validos y uno indica los datos perfectamente validos. En ésta etapa, el procedimiento de validación es muy simple y se basa en la comparación de cada señal y de sus derivados a un rango de valores normalmente obtenidos en la ausencia de mediciones erróneas. Datos en bruto cuyo nivel de confianza es inferior a un determinado umbral son declarados como no válidos. Otro sistema propuesto es Multi-Parametro de validación de datos y la reconstrucción de estos donde utilizan un mapa de auto organización (SOM) para datos de entrada, donde se construye una matriz bidimensional de nodos que permite ver la evolución del agua cruda en dos dimensiones, en el cual la validación de los datos se realiza midiendo la distancia entre los vectores de entrada y su más cercano vector de



referencia. Para la reconstrucción de datos se determina por el valor correspondiente al prototipo ganador.

Para la elaboración de modelos de dosis de coagulante se entrenó un Perceptrón multicapa (MLP), utilizando el Optimal Brain Damage (OBD) y el algoritmo de poda, donde el objeto de esta red es evaluar la importancia relativa de los pesos y el menos importante se suprimirá; para predecir la tasa de dosis óptima de coagulante el software no sólo debe proporcionar estimaciones puntuales, sino también los intervalos de confianza. El intervalo de confianza superior e inferior proporciona límites a la predicción.

## **2.2 MARCO GEOGRAFICO**

La planta de tratamiento de agua potable Bosconia, comprende un conjunto de instalaciones empleadas para la captación y tratamiento de aguas del Río Suratá, que corre por el lado Norte de la base de la meseta en la cual se asienta la ciudad de Bucaramanga, y su elevación por bombeo hasta los tanques Batallón y Morro Rico situados sobre la meseta. Este Sistema funciona conjuntamente con los Sistemas Tona y Río Frío para cubrir el abastecimiento de agua del área metropolitana. Individualmente puede suministrar un caudal de 2000 litros por segundo.

La captación del agua del Río Surata comienza en la cota 694 m.s.n.m. Su tratamiento en la Planta Bosconia y su elevación por bombeo tiene una capacidad instalada hasta 2400 litros, con una cabeza de 400 metros aproximadamente, hasta los tanques de Batallón y de Morro Rico.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> MANUAL PARTE 1 Y 2, planta de tratamiento de agua potable Bosconia, pág. 12.

## Fotografía 1. Planta de Bosconia



Fuente: Google earth.

### 2.3 MARCO LEGAL

El gobierno colombiano ha reaccionado ante el creciente deterioro del medio ambiente, desarrollando una normatividad que contribuye en mejorar la calidad del recurso y optimizar los tratamientos de potabilización del agua.

El Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ha dado cumplimiento a la resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

El jefe de operaciones de planta de tratamiento de agua potable de Bosconia decidió acatar los parámetros propuestos por la resolución efectuando el

cumplimiento de los rangos planteados sobre las características físicas y químicas del agua para consumo.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 PROCESOS DE OPERACIÓN Y ESTRUCTURAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA.**

Se realizó una visita preliminar a la planta de tratamiento de agua potable con el fin de conocer los procesos operacionales de la planta en sus diferentes etapas:

##### **3.1.1 Etapa de captación**

La captación tiene como función principal derivar del Río Suratá un caudal hasta de 2400 litros por segundo, mediante una estructura de captación lateral regulada por tres compuertas radiales, que permite cumplir el propósito tanto en épocas de invierno como en períodos de estiaje.

Cuenta con la estructura de captación y control de paso del caudal del río, 3 compuertas radiales para el control del nivel del agua en el río, 3 rejillas metálicas, una cámara de desviación encargada de conducir el agua hasta la línea de aducción, una cámara de aducción, una caseta de controles, una cámara de flotadores y una cámara de desagüe.

##### **3.1.2 Etapa de pre-tratamiento**

Consta de una cámara de quietamiento con 3 pantallas transversales consecutivas, un vertedero de excesos, una compuerta de desagüe, un canal de aproximación, una canaleta pasrshall, un canal de entrega a la cámara distribuidora de caudales a los 2 desarenadores, los cuales tienen como función principal remover, por gravedad, materiales grandes o pesados (piedras, arena,

etc.) a fin de evitar su paso a la planta de tratamiento, un sistema de recolección de aguas desarenadas, un sistema de desagüe y auto lavado, 2 tanques Pre-sedimentadores, que remueven las partículas más finas y livianas, suficientemente pesadas para ser eliminadas por sedimentación simple (bajo condiciones hidráulicas más favorables), un sistema de recolección de agua pre-sedimentada, un sistema de desagüe y extracción de lodos.

### **3.1.3 Etapa de Tratamiento**

Compuesta por la cámara de quietamiento, canal de aforo y mezcla, canaleta parshall, dispositivo de medición de caudal, canal de aproximación y distribución de caudales a los floculadores que tienen por finalidad propiciar la formación de flocs o grumos de tamaño y peso suficientes para ser removidos por decantación, 2 tanques de floculación divididos en 4 cámaras, canales de conducción de agua floculada a los sedimentadores, 2 tanques sedimentadores, que buscan separar del agua los flocs o grumos formados en el proceso de coagulación – floculación, por decantación en el fondo de los tanques, un canal de agua sedimentada, canales de recolección de lodos, 2 baterías de 6 filtros rápidos que remueven del agua las partículas, impurezas y microorganismos que no han quedado removidos en los procesos anteriores de tratamiento y un canal de agua filtrada. (Ver Anexo A).

### **3.2 BASE DE DATOS CONSTRUIDA A PARTIR DE LAS CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DEL AGUA CON RESPECTO A LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE POR MEDIO DE LA PRUEBA DE JARRAS**

### **3.2.1 Registro de datos iniciales**

Se registraron datos de condiciones iniciales de agua de río y de agua cruda, donde se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: turbiedad, pH, alcalinidad y color.

### **3.2.2 Pruebas de Jarras**

Se realizaron diferentes pruebas de jarras teniendo en cuenta rangos de turbiedad con el fin de encontrar la dosis óptima de coagulante tanto de sulfato de aluminio líquido como para sulfato de aluminio sólido.

La prueba de jarras se realizó con un equipo de jarras que se encuentra en el laboratorio de la planta de tratamiento de agua de Bosconia, de marca PHIPPS & BIRD™.

Se emplearon vasos plásticos de precipitado de 1000 ml, la mezcla rápida en la prueba de jarras se simuló con una velocidad de 100 rpm durante 1 minuto, la mezcla lenta con una velocidad de 40 rpm durante 15 minutos, teniendo en cuenta los parámetros propuestos en diferentes libros sobre la utilización y simulación óptima del equipo de a equipo de jarras, el tiempo de coagulación fue de 10 minutos.

Se realizó una prueba de jarras inicial con sulfato de aluminio sólido, donde los únicos parámetros tomados fueron el pH y la turbiedad, para conocer la cantidad de dosis aplicada a la planta fue necesario saber la cantidad de partes dada por la bomba dosificadora y así realizar el ensayo con mayor similitud al proceso real.

Luego de ello se realizaron dos pruebas de jarras más, nuevamente con sulfato de aluminio sólido pero con menor rango de dosis entre una jarra y otra, y con sulfato de aluminio líquido siendo el doble de la dosis aplicada del sólido, los parámetros medidos al agua sedimentada luego de la prueba de jarras fueron: pH, turbiedad, color aluminio residual.

Para conocer cual era la dosis óptima fue necesario tener en cuenta los rangos internos de la planta para agua sedimentada (Cuadro 2) y compararlos a la vez con la resolución 2115/07 (Cuadro 1) la cual contiene los valores máximos permisibles para agua potable.

**Cuadro 1. Valores máximos de parámetros para la dosis optima de coagulante para agua potable según Resolución 2115/07**

<b>Valores máximos de parámetros para hallar dosis optima de coagulante para agua potable según Resolución 2115/07</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Valores máximos</b>
Color	<15 UPC
Turbiedad	<2 NTU
pH	6.5 – 9.0
Alcalinidad	200 mg/lt
Conductividad	1000 micro siemens/cm.

Fuente: Resolución 2115/07

**Cuadro 2. Valores máximos de parámetros para hallar dosis optima de coagulante en agua sedimentada según AMB Planta Bosconia**

<b>Valores máximos de parámetros para hallar dosis optima de coagulante en agua sedimentada según AMB Planta Bosconia</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Valores máximos</b>
Color	<15 UPC
Turbiedad	<7 NTU
pH	6.5 – 9.0
Alcalinidad	200 mg/lt
Conductividad	1000 micro siemens/cm.

Fuente: AMB

En la resolución se encuentra que el color medido debe ser el color verdadero, pero durante el proyecto la técnica que se utilizó fue la medición de color aparente, por este motivo el parámetro se modificó de color verdadero a color aparente, manteniendo el mismo valor para las dos técnicas.

**3.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA CRUDA DESDE CAPTACIÓN HASTA EL INICIO DEL TRATAMIENTO PARA UN CAUDAL DE 850 (L/s) POR MEDIO DE UNA PRUEBA DE TRAZADORES.**

La adición de trazador se realizó en forma instantánea, es decir en la entrada de cada unidad fue vertido el trazador, para este tipo de adición es recomendable utilizar como trazador cloruros, en este caso, cloruro de sodio (sal).



Por medio del conductímetro de marca METTLER TOLEDO, se registró cada minuto la conductividad medida en  $\mu\text{s}/\text{cm}$  con el fin de obtener los valores para realizar la gráfica y así conocer el tiempo de retención.

La prueba de trazadores se realizó desde captación hasta el pre tratamiento, en dos etapas. A continuación, se indican las estructuras y sus respectivos volúmenes tanto para captación (Cuadro 3) como para pre - tratamiento (Cuadro 4).

**Cuadro 3. Volumen de las estructuras de captación de la planta de agua potable Bosconia**

<b>Captación</b>	
<u>Estructura</u>	<u>Volumen (m<sup>3</sup>)</u>
Cámara de aducción	28
Cámara de flotadores	33.6
Tubería Captación – pre tratamiento	402.13

Fuente: Manual 1 Planta de tratamiento de agua potable Bosconia

**Cuadro 4. Volumen de las estructuras de pre tratamiento de la planta de agua potable Bosconia**

<b>Pre tratamiento</b>	
<u>Estructura</u>	<u>Volumen (m<sup>3</sup>)</u>
Cámara de quietamiento	82.36
Canal de aproximación	14.52
Canal de entrada	10.56
Cámara distribuidora	28.71
Desarenadores	399.84

Tanques presedimentadores	3087.0
Tubería (pretratamiento - tratamiento)	268.25

Fuente: Manual 1 Planta de tratamiento de agua potable Bosconia

El punto de adición del trazador en la captación del agua de río fue la cámara de aducción, la cual tiene como dimensiones: 2 metros de ancho por dos metros de largo y 7 metros de profundidad. El flujo de agua hacia la Planta se controla mediante la compuerta (1) de diámetro 48 “colocada a la entrada de la misma. El punto de muestreo fue en la cámara de llegada, ubicada en portería y con dimensiones de: 3.20 metros de largo, 1.50 metros de ancho y 7.0 metros de profundidad.

Para hallar el tiempo de retención de pre tratamiento fue necesario adicionar el trazador en la cámara de llegada, y realizar la toma de muestras en la entrada a tratamiento o cámara de flotadores.

La cantidad de trazador se estableció teniendo en cuenta la siguiente formula:

$$P = \frac{(V \times C \times K)}{I \times 1000}$$

Donde:

P: peso del trazador (kg)

V: volumen útil de la estructura (m<sup>3</sup>)

C: concentración del elemento

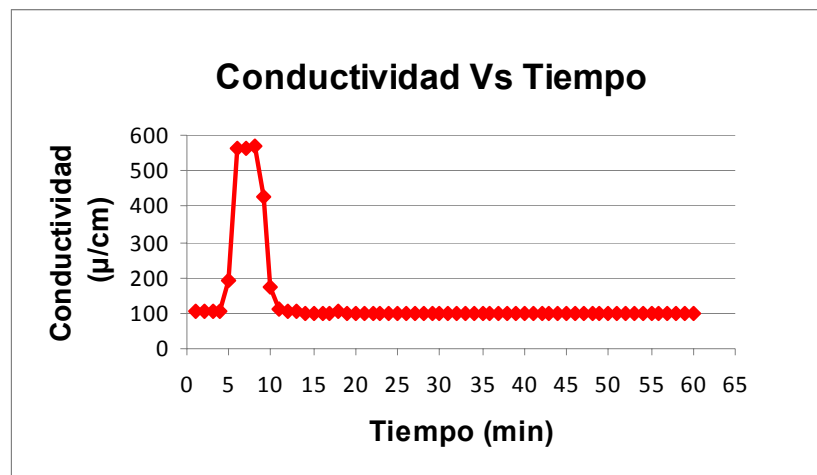
I: grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

K: constante en función del elemento o compuesto que será cuantificado durante el ensayo.

Para observar de forma representativa los tiempos de retención hallados por la prueba de trazadores fue necesario realizar una gráfica de conductividad Vs Tiempo, donde el pico más alto representa el valor máximo de conductividad, indicando de esta manera el tiempo de retención.

A continuación un ejemplo de la gráfica que se realizó:

**Gráfica 1. Tiempo de retención**



Fuente: La Autora

### **3.4 CALCULO DE LA CONCENTRACION DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO Y SÓLIDO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

Para conocer el número de partes de sulfato de aluminio líquido o sólido que se requiere en una muestra de agua es necesario aplicar la siguiente fórmula.

$$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$$

Donde:

C<sub>1</sub>: Concentración de sulfato a aplicar (mg/l)

C<sub>2</sub>: Concentración de sulfato (mg/l) (densidad o dilución)

V<sub>1</sub>: Volumen de la planta (Q lt/s)

V<sub>2</sub>: Volumen de aforo (Q lt/s)

Para el sulfato de aluminio líquido la concentración 2 es la densidad del sulfato, es decir C<sub>2</sub>: 1.32 gr/ml

Para el sulfato sólido la concentración es C: 100 g / m<sup>3</sup>

Se modificó la formula convirtiendo el volumen en caudal (volumen /tiempo),

$$Q_1 \times C_1 = Q_2 \times C_2$$

Donde:

Q<sub>1</sub>: Caudal de la planta en (L/s)

Q<sub>2</sub>: Aforo (volumen conocido) sobre el tiempo cronometrado (L/s)

C<sub>2</sub>: Densidad de sulfato

C<sub>1</sub>: Cantidad de sulfato

Existe una medida de control que consiste en medir la cantidad de partes de sulfato de aluminio suministradas por medio de: caudal de aforo, caudal de la planta, y densidad del sulfato de aluminio que es la anteriormente anunciada, otra medida de control consiste en tomar una muestra de agua y llevarla al equipo de jarras durante 10 minutos, con una velocidad de 40 rpm, simulando los floculadores, para así comprobar si es o no suficiente la cantidad de partes de sulfato suministrada por la bomba dosificadora y si el proceso de coagulación es óptimo o no.

### **3.5 SEGUIMIENTO AL STREAMING CURRENT DETECTOR (SCD)**

Se hizo seguimiento a la operación SCD marca CHEMTRAC SYSTEMS, INC; modelo SCC 3500XRD; de Chemical Metering Systems Inc. Se registraron datos de densidad de carga en la zona de mezcla rápida, con el propósito de establecer una relación entre este valor y el de dosis óptima de coagulante. Adicionalmente se verificó si la operación del SCD como controlador automático de dosificación se estaba realizando de manera correcta.

### **3.6 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES A LAS VARIABLES ESTUDIADAS**

El proceso de redes neuronales se aplicó solamente para sulfato de aluminio líquido, teniendo en cuenta que en la planta de tratamiento de agua potable Bosconia es más común utilizar este tipo de sulfato, además se contaba con mayor cantidad de datos.

#### **3.6.1 Registro de datos**

Se registraron los datos de condiciones iniciales del agua cruda (turbiedad, pH, color y alcalinidad) con las respectivas dosis óptimas.

#### **3.6.2 Regresión lineal**

Con ayuda de la regresión lineal se estableció la relevancia de cada variable del estudio con respecto a la dosis óptima de coagulante. Se graficaron las correlaciones de cada una de las variables con respecto a la dosis de coagulante.

### 3.6.3 Aplicación de redes neuronales

El primer paso que se dio para determinar las variables más influyentes y el tipo de problema a solucionar, fue graficar cada una de las variables de forma independiente y observar cuales son las que se relacionan más con la dosis de coagulante.

Seguidamente se aplicó el método de redes neuronales artificiales como seguidor de funciones, utilizando la función tangente (tansing); el número determinado de neuronas equivale al número de tangentes para mapear la gráfica correspondiente a cada variable respecto a la dosis.

Debido a la gran diferencia numérica de las variables hubo necesidad de normalizar los valores entre -1 y 1 y de esta manera facilitar el cálculo de los pesos de cada variable para entrenar la red.

El código requerido para el entrenamiento de la red neuronal se basa en cuatro etapas:

1. Épocas de entrenamiento: Consiste en el número de veces que la red neuronal repite el proceso de aprendizaje utilizando los datos de las variables (pH, turbiedad, color, alcalinidad) con su respectiva dosis.
2. Meta de error: Especifica la exigencia en la precisión de los resultados, esta exigencia puede variar; si la meta de error es pequeña, la precisión es alta ( $1 \times 10^{-6}$ ) y si la meta de error es grande, la precisión será baja ( $1 \times 10^{-2}$ ).
3. Aprendizaje: En esta etapa la red neuronal inicia su proceso de aprendizaje y memorización de las variables (pH, turbiedad, color, alcalinidad) con su respectiva dosis.
4. Evaluación: Se comparan los valores óptimos (Datos iniciales) con las respuestas dadas por la red neuronal, la exactitud de la respuestas

depende de la cantidad de datos iniciales establecidos dentro de la programación de la red.

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS

### 4.1 BASE DE DATOS CONSTRUIDA A PARTIR DE LAS CARACTERISTICAS MÁS IMPORTANTES DEL AGUA CON RESPECTO A LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE POR MEDIO DE LA PRUEBA DE JARRAS

#### 4.1.1 Prueba de jarras

TABLA 1. Mayo 10/07 Q=820 L/s

Condiciones del Rio			
Turbiedad	Ph	Alcalinidad (mg/l)	Color
60,7	7,87	58,8	722

Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO		
Dosis	pH	Turbiedad
20	7,18	44,2
25	7,15	2,07
30	7,01	1,20
35	6,98	1,14
40	6,81	0,831
45	6,78	0,839

Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO					
Dosis	pH	Turbiedad	Color	Alcalinidad	Aluminio
22	7,12	14,3	115	52	Gama Exc.
24	7,14	10,1	90	51,2	Gama Exc.
26	7,10	4,06	38	50,6	Gama Exc.
28	7,04	1,81	22	49,4	0,257
30	7,01	1,61	22	48,4	0,328
32	7,02	1,65	20	48,0	0,327



<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
44	7.22	15,7	126	52.4	Gama Exc.
48	7.14	14,8	116	52	Gama Exc.
52	7.11	8,59	47	51,8	Gama Exc.
<b>56</b>	<b>7.08</b>	<b>3,77</b>	<b>30</b>	<b>51,0</b>	<b>Gama Exc.</b>
60	7.06	1,51	21	50,4	0,244
64	7.01	1,36	21	47,6	0,247

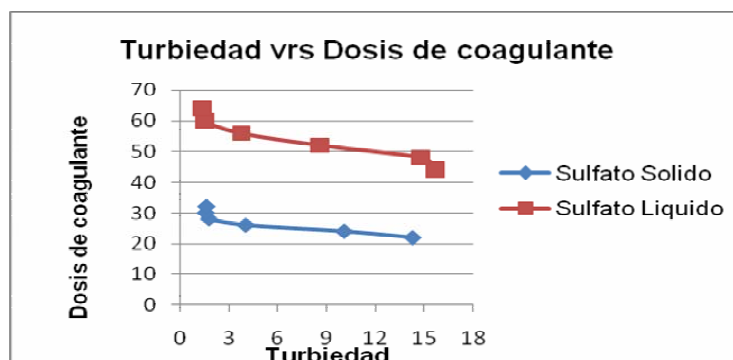
Fuente: La Autora

En el cuadro 2, se presentan los valores máximos de las variables más importantes para seleccionar la dosis óptima de coagulante en agua sedimentada recomendados por la planta de tratamiento de agua potable Bosconia. Según los valores de la tabla 1, se puede observar que existe una mayor eficiencia en el sulfato de aluminio sólido, ya que la turbiedad sedimentada es de 1,81 NTU, mientras que para el sulfato de aluminio líquido es de 3,77 NTU, observando que el color es de 22 UPC para el sulfato de aluminio sólido y para el sulfato de aluminio líquido es de 30 UPC. Aunque para el color no se cumpla el valor máximo según los parámetros (<15 UPC), se debe tener en cuenta que la zona de filtros en el tratamiento del agua potable cumple una función muy importante en la reducción del color y como en este caso solo se simula la prueba hasta la sedimentación, se puede ampliar el margen de valores máximos para esta variable. Los valores de pH y alcalinidad de los dos tipos de sulfato de aluminio fueron muy cercanos y cumplieron con los parámetros, por esta razón, se decidió que para las condiciones iniciales de río donde las variables medibles fueron turbiedad 60,7 NTU, pH 7,87, alcalinidad 58,8 mg/lit y color 722 UPC; la dosis óptima de coagulante sólido fue de 28 ppm y de líquido fue exactamente el doble, 56 ppm, manteniéndose así la misma tendencia en la planta para estos dos tipos de sulfato de aluminio, en la cual la dosis de líquido corresponde al doble de la de sólido, debido a su concentración.

Se realizaron aproximadamente 21 pruebas de jarras utilizando los dos tipos de sulfato de aluminio, en diferentes condiciones iniciales de río y agua cruda (Anexo B), resaltando la dosis de coagulante seleccionada como óptima. Durante el desarrollo de las pruebas de jarras se observó que para el sulfato de aluminio sólido la turbiedad y el color presentan valores menores con respecto al sulfato de aluminio líquido, y que la alcalinidad y el pH tienden a presentar valores cercanos, esto se mantiene siempre y cuando la dosis de coagulante de sulfato de aluminio líquido duplica o esta por encima que la dosis de sulfato de aluminio sólido. Es importante resaltar que cuando existe una adición representativa de coagulante de sulfato de aluminio (58 mg/L para sólido y 120 mg/L para líquido) (Ver Anexo B) el pH disminuye dando valores entre 6,65 y 6,50 respectivamente cumpliendo parámetro máximo de pH (6,5 – 9,0) según la resolución 2115/07.

Adicionalmente se realizó una interpretación gráfica con el fin de observar el comportamiento de cada variable es decir, Turbiedad vs. Dosis óptima (Grafica 2), Color vs. Dosis óptima (Grafica 3), Alcalinidad vs. Dosis óptima (Grafica 4). (Ver Anexo B), donde se observa que el sulfato de aluminio líquido indicado con una línea de color rojo siempre se encuentra por encima del sulfato de aluminio sólido representado con la línea de color azul, donde se mantiene una tendencia entre los valores dados en cada variable, pues a medida que la dosis de coagulante aumenta los valores de cada variable disminuyen.

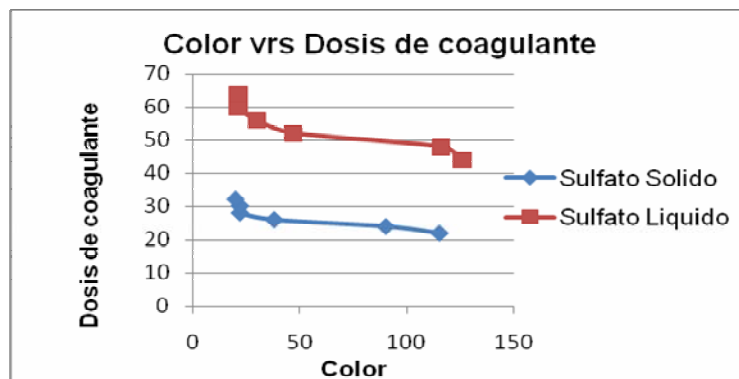
**Grafica 2. Prueba de jarras Turbiedad Vs Dosis Óptima**



Fuente: La Autora

Para una turbiedad inicial de 60.7 NTU, la dosis óptima de coagulante de sulfato de aluminio sólido fue de 28 mg/lit, y la turbiedad de agua sedimentada de 1,81 NTU, mientras que en el sulfato de aluminio líquido la dosis óptima de coagulante fue de 56 mg/lit, y la turbiedad de agua sedimentada fue de 3,77 NTU. Se interpreta que el sulfato de aluminio sólido es de mayor eficiencia que sulfato de aluminio líquido, aunque en los dos tipos de sulfato de aluminio se cumple el valor máximo permitido para agua sedimentada (< 5 NTU).

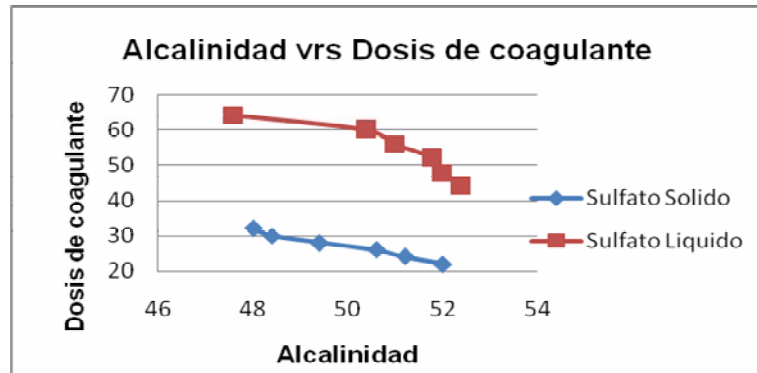
**Grafica 3. Prueba de jarras Color Vs Dosis Optima**



Fuente: La Autora

El color inicial fue de 722 UPC, al aplicarla la dosis óptima de sulfato sólido el color de agua sedimentada fue de 22 UPC, y para sulfato líquido el color de agua sedimentada fue de 30 UPC, aunque para esta dosis óptima aplicada tanto en sólido como para líquido el color no cumple con los valores máximos permitidos de agua sedimentada (<15), se tuvo en cuenta ya que según la tabla 1, los valores siguientes de color no tenían gran diferencia, y si era notable el cambio de turbiedad.

**Grafica 4. Prueba de jarras Alcalinidad Vs Dosis Optima**



Fuente: La Autora

La alcalinidad en condiciones iniciales fue 58.8 mg/lit, a medida que la dosis de sulfato de aluminio sólido y líquido va aumentando la alcalinidad disminuye, para la dosis óptima de sulfato la alcalinidad fue de 49,4 mg/lit y para sulfato líquido fue de 51 mg/lit, en los dos tipos de sulfato de aluminio se cumple el parámetro máximo de alcalinidad para agua sedimentada 200 mg/lit. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Sin embargo, en casos extremos cuando la acidez es alta en el agua la alcalinidad disminuye, esto puede causar mayor dificultad para la potabilización.

#### **4.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA CRUDA DESDE CAPTACIÓN HASTA EL INICIO DEL TRATAMIENTO PARA UN CAUDAL DE 850 (L/s) POR MEDIO DE UNA PRUEBA DE TRAZADORES.**

La cantidad de trazador se estableció con base en una prueba de trazadores realizada en el año 2006 por alumnos de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Proyecto de grado Ing. Alexandra Parada, 2006), donde la cantidad

de trazador utilizada en las estructuras de captación (cuadro 3), pre tratamiento (cuadro 4) y conducción para un volumen total de 6111,27 m<sup>3</sup> fue de 100 kg de sal, reemplazando la siguiente formula:

$$P = \frac{(6111,27 \text{ m}^3 \times 9 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1,65)}{(0,9 \times 1000)}$$

$$P=100,83 \text{ kg}$$

Según lo anterior se determinó que para obtener valores representativos de conductividad es necesario aumentar la cantidad del trazador, por lo que en captación se utilizó 170 kg de sal y para pre tratamiento 132 kg del trazador.

La prueba de trazadores se realizó única y exclusivamente para hallar el tiempo de retención desde captación hasta pre tratamiento, no para conocer las condiciones hidráulicas de la planta de tratamiento de agua potable.

En esta primera etapa (Captación – Cámara de llegada) de la prueba de trazadores el pico de conductividad indica que se encuentra la mayor concentración de iones, (Tabla 2) donde de las 60 muestras tomadas, la muestra 8 presentó el valor mas alto de conductividad 570,9 µ/cm y a su vez el tiempo de retención que es de 7 minutos.

## **Tabla 2. Prueba de trazadores captación – cámara de llegada**

Donde:

To: Tiempo de retención o tiempo teórico de retención V/Q

t: Tiempo inicial desde que se aplica el trazador

Co: Conductividad inicial

C: Conductividad de cada muestra

Prueba de trazadores						
Captación - Cámara de llegada (portería)						
To (min)	V(m <sup>3</sup> )	Q (L/s)	Co (μ/cm)	PUNTO DE MUESTREO		
9,09	463,73	850	102,4	Captación-Cámara de llegada		
Muestra	Tiempo (min)	Conductividad	t/To	C-Co	Σ( C-Co)	
1	0	102,4	0,000	0	0	
2	1	102,6	0,110	0,2	0,2	
3	2	102,7	0,220	0,3	0,5	
4	3	102,9	0,330	0,5	1	
5	4	190,5	0,440	88,1	89,1	
6	5	563,0	0,550	460,6	549,7	
7	6	564,1	0,660	461,7	1011,4	
8	7	570,9	0,770	468,5	1479,9	
9	8	425,5	0,880	323,1	1803	
10	9	175,5	0,990	73,1	1876,1	
11	10	113,5	1,100	11,1	1887,2	
12	11	104,8	1,210	2,4	1889,6	
13	12	103,6	1,320	1,2	1890,8	
14	13	102,0	1,430	0,4	1891,2	
15	14	101,9	1,540	0,5	1891,7	
16	15	101,7	1,650	0,7	1892,4	
17	16	101,9	1,760	0,5	1892,9	
18	17	102,1	1,870	0,3	1893,2	
19	18	101,9	1,980	0,5	1893,7	
20	19	101,8	2,090	0,6	1894,3	
21	20	101,6	2,200	0,8	1895,1	
22	21	101,5	2,310	0,9	1896	
23	22	101,3	2,420	1,1	1897,1	
24	23	101,2	2,530	1,2	1898,3	
25	24	101,7	2,640	0,7	1899	
26	25	101,9	2,750	0,5	1899,5	
27	26	101,6	2,860	0,8	1900,3	
28	27	101,4	2,970	1	1901,3	
29	28	101,5	3,080	0,9	1902,2	
0,3	29	101,7	3,190	0,7	1902,9	

31	30	101,6	3,300	0,8	1903,7
32	31	101,8	3,410	0,6	1904,3
33	32	101,4	3,520	1	1905,3
34	33	101,2	3,630	1,2	1906,5
35	34	101,2	3,740	1,2	1907,7
36	35	101,3	3,850	1,1	1908,8
37	36	101,4	3,960	1	1909,8
38	37	101,1	4,070	1,3	1911,1
39	38	101	4,180	1,4	1912,5
40	39	101,1	4,290	1,3	1913,8
41	40	101	4,400	1,4	1915,2
42	41	101	4,510	1,4	1916,6
43	42	101,1	4,620	1,3	1917,9
44	43	101,2	4,730	1,2	1919,1
45	44	101,0	4,840	1,4	1920,5
46	45	100,9	4,950	1,5	1922
47	46	101,2	5,061	1,2	1923,2
48	47	101,0	5,171	1,4	1924,6
49	48	101,1	5,281	1,3	1925,9
50	49	101,2	5,391	1,2	1927,1
51	50	100,9	5,501	1,5	1928,6
52	51	100,7	5,611	1,7	1930,3
53	52	101,1	5,721	1,3	1931,6
54	53	101,2	5,831	1,2	1932,8
55	54	101	5,941	1,4	1934,2
56	55	101,5	6,051	0,9	1935,1
57	56	101,7	6,161	0,7	1935,8
58	57	101,7	6,271	0,7	1936,5
59	58	101,4	6,381	1	1937,5
60	59	101,1	6,491	1,3	1938,8

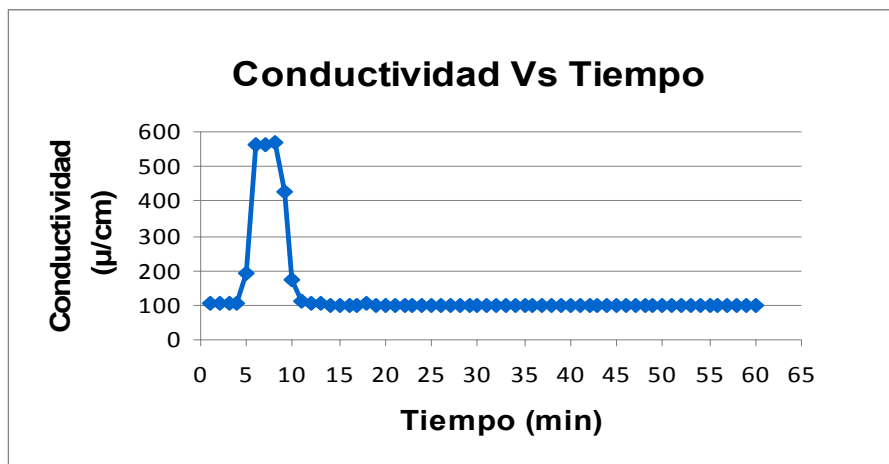
Fuente: La Autora

**Cuadro 5. Dimensiones de las estructuras de la primera etapa de la prueba de trazadores**

Estructura	Dimensiones (m)			Volumen (m <sup>3</sup> )
	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	
Cámara de Aducción	2,0	2,0	7,0	28,0
Cámara de llegada	3,2	1,5	7,0	33,6
Tubería captación	-	-	-	402,1
<b>Cantidad de trazadores: 170 kg</b>	<b>Volumen total</b>			<b>463,7</b>

Fuente: La Autora

**Grafica 5. Prueba de trazadores Captación – Cámara de llegada**



Fuente: La Autora

En la grafica 5 se observa que al minuto 4 la conductividad empieza a aumentar (190,5 µ/cm), y al minuto 7 se obtiene el valor mas alto de conductividad (570,9 µ/cm), en el minuto 10 empieza a disminuir hasta llegar aproximadamente a los valores iniciales (102,4-101,1 µ/cm), con esto se puede interpretar que el flujo de



agua desde captación hasta la cámara de llegada tiene un tiempo de retención de 7 minutos.

En la segunda etapa de la prueba de trazadores (Cámara de llegada – Inicio tratamiento), se tomaron 60 muestras durante una hora, dado que no se logró en la muestra 60 tomada a los 59 minutos obtener un valor de conductividad aproximado al inicial, fue necesario recopilar información mas detallada sobre las anteriores pruebas de trazadores y se encontró que el valor de tiempo de retención de esta fase está entre los 28 y 35 minutos. El valor de mayor importancia lo indica el que tenga mayor conductividad, es decir 209,00 $\mu$ /cm.

**Tabla 3. Prueba de trazadores Cámara de llegada – Pre tratamiento**

Donde:

To: Tiempo de retención o tiempo teórico de retención  $V/Q$

t: Tiempo inicial desde que se aplica el trazador

Co: Conductividad inicial

C: Conductividad de cada muestra

Prueba de trazadores Cámara de llegada (portería) - pre tratamiento agua cruda						
To (min)	V (m <sup>3</sup> )	Q (L/s)	Co ( $\mu$ /cm)	PUNTO DE MUESTREO		
77,2	3891	840	149,7	Cámara de llegada- inicio tratamiento		
Muestra	Tiempo (min)	Conductividad	t/To	C-Co	$\Sigma$ ( C-Co)	
1	0	149,7	0	0	0	
2	1	151	0,012	1,3	1,3	
3	2	150,9	0,025	1,2	2,5	
4	3	151,3	0,038	1,6	4,1	
5	4	151,6	0,051	1,9	6	
6	5	151,4	0,064	1,7	7,7	
7	6	151	0,077	1,3	9	

8	7	151,4	0,09	1,7	10,7
9	8	150	0,103	0,3	11
10	9	151,5	0,106	1,8	12,8
11	10	151,4	0,129	1,7	14,5
12	11	151,3	0,142	1,6	16,1
13	12	151,3	0,155	1,6	17,7
14	13	150,9	0,168	1,2	18,9
15	14	151,8	0,181	2,1	21
16	15	151,4	0,194	1,7	22,7
17	16	151,6	0,207	1,9	24,6
18	17	151,2	0,22	1,5	26,1
19	18	151,7	0,233	2	28,1
20	19	151,9	0,246	2,2	30,3
21	20	152,1	0,259	2,4	32,7
22	21	152,1	0,272	2,4	35,1
23	22	152,8	0,284	3,1	38,2
24	23	153,4	0,297	3,7	41,9
25	24	155,7	0,31	6	47,9
26	25	159,1	0,323	9,4	57,3
27	26	165,3	0,336	15,6	72,9
28	27	172,6	0,349	22,9	95,8
29	28	181,4	0,362	31,7	127,5
0,3	29	188	0,375	38,3	165,8
31	30	199,6	0,388	49,6	215,4
32	31	204	0,401	54,3	269,7
33	32	207	0,414	57,3	327
34	33	209	0,427	59,3	386,3
35	34	208	0,44	58,3	444,6
36	35	206	0,453	56,3	500,9
37	36	204	0,466	54,3	555,2
38	37	202	0,479	52,3	607,5
39	38	201	0,492	51,3	658,8
40	39	199,3	0,505	49,6	708,4
41	40	197	0,518	47,3	755,7
42	41	195,8	0,531	46,1	801,8
43	42	193,1	0,544	43,4	845,2
44	43	192,7	0,556	43	888,2

45	44	193,4	0,569	43,7	931,9
46	45	193,3	0,582	43,6	975,5
47	46	193	0,595	43,3	1018,8
48	47	193,2	0,608	42,5	1061,3
49	48	192,5	0,621	42,8	1104,1
50	49	191,8	0,634	42,1	1146,2
51	50	191	0,647	41,3	1187,5
52	51	189,5	0,66	39,8	1227,3
53	52	190,1	0,673	40,4	1267,7
54	53	189,7	0,606	40	1307,7
55	54	189,6	0,699	39,9	1347,6
56	55	189,4	0,712	39,7	1387,3
57	56	189,6	0,725	39,9	1427,2
58	57	187,4	0,738	37,7	1467,3
59	58	187,7	0,751	38	1502,9
60	59	187,5	0,764	37,8	1540,7

Fuente: La Autora

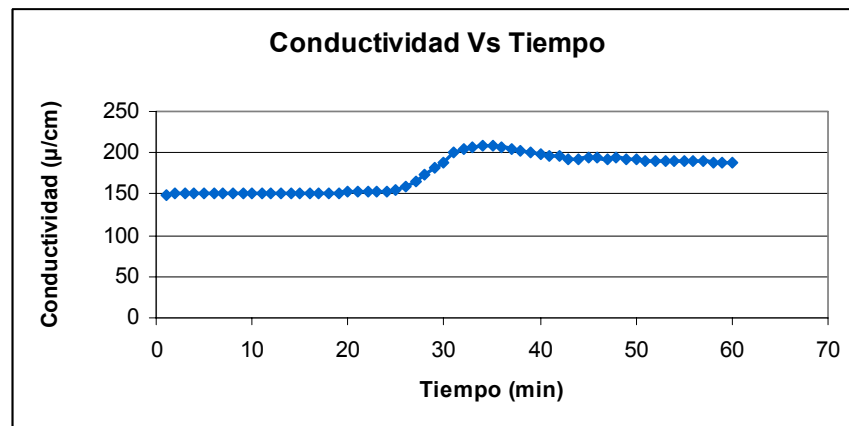
**Cuadro 6. Dimensiones de las estructuras de la segunda etapa de la prueba de trazadores**

Estructura	Dimensiones (m)			Volumen (m3)
	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	
Cámara de llegada	7,0	3,0	4,0	82,4
Canal de aproximación	4,8	2,3	1,3	14,5
Canal de entrada	-	6,9	1,5	10,6
Cámara distribuidora	1,5	6,0	3,2	28,7
(2) Desarenadores	14,7	4,0	3,4	399,8
(2) Presedimentadores	44,1 Aprox	14,0 Aprox	2,5 Aprox	4904,9
Tubería pre tratamiento	-	-	-	268,3
<b>Cantidad de trazador: 132 kg</b>			<b>Volumen total</b>	<b>5709,14</b>

Fuente: Autora

En la grafica 6 se observa que al minuto 33 se obtiene el valor más alto de conductividad (209,0 $\mu$ /cm), indicando así, que el tiempo de retención de la cámara de llegada a pre-tratamiento es de 33 minutos. En la muestra 60 se presentó una conductividad de 187,5  $\mu$ /cm, lo que indica que no se lleo a la conductividad indica lo cual hace referencia a que era necesario aumentar el periodo de la toma de muestras (> 60 minutos) hasta llegar a un valor aproximado de 149,7  $\mu$ /cm.

**Grafica 6. Prueba de trazadores Cámara de Llegada – Pre tratamiento**



Fuente: La Autora

En este registro fotográfico se observa la localización donde se realizó la segunda etapa de la prueba de trazadores, en la parte izquierda se encuentra la cámara de llegada o quietamiento lugar donde se adicionó el trazador y al lado derecho se encuentra el inicio al tratamiento o canal de los flotadores donde se registraron los valores de conductividad de las 60 muestras.

**Fotografía 2. Cámara de Llegada**



**Fotografía 3. Inicio del tratamiento**



Fuente: La Autora

### 4.3 CALCULO DE LA CONCENTRACION DE SULFATO DE ALUMINIO DE ALUMINIO LIQUIDO Y SOLIDO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE BOSCONIA

Es necesario conocer la cantidad de partes de sulfato de aluminio por medio de la dosis óptima dada por la prueba de jarras y así suministrar en modo manual el set point al SCD y a su vez se modifique el porcentaje de salida con el fin de que este envíe la señal de frecuencia a la bomba dosificadora de sulfato de aluminio, midiendo la densidad de carga de las partículas del agua cruda para dosificar el coagulante necesario sin desperdiciarlo. Luego que este set point esta definido el equipo de SCD se pone en modo automático.

A continuación se muestra la forma en que se hallo la concentración de sulfato de aluminio líquido donde se realiza la conversión de unidades de litros a metros cúbicos para obtener partes por millón (ppm) o g/m<sup>3</sup>.

Donde:

Q<sub>1</sub>: 750 (L/s)

Q<sub>2</sub>: 0.5/16 (volumen conocido) (L/s)

C<sub>2</sub>: 1.320.000 g/m<sup>3</sup>

C<sub>1</sub>: Cantidad de sulfato

$$C_1 = \frac{0.0005 \text{ m}^3}{16 \text{ sg}} \times 1320000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 0.75 \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} = 30 \text{ ppm}$$

Es decir para las condiciones dadas, la cantidad de sulfato de aluminio líquido aplicado es 30 ppm.

Existe una variación respecto al sulfato de aluminio sólido ya que la concentración es de 100000 mg/lit pues esta diluido al 10%.

Solución 10%

10 gr → 100ml

$$\left(\frac{10 \text{ g}}{100 \text{ ml}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}}\right) = 10000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

#### 4.4 SEGUIMIENTO STREAMING CURRENT DETECTOR SDC

El seguimiento del SCD (Fotografía 4) se hizo con el fin de obtener un registro del comportamiento del equipo en diferentes condiciones, y en sus dos modos de operación automático y manual, dando como resultado que el equipo no se encuentra operando de una manera satisfactoria y no son aprovechadas sus ventajas, por lo que requiere un estudio de sintonización.

En la Tabla 4 se observa que la densidad de carga del agua registrada por el SCD mantiene una gran variación y a su vez la señal de salida que se envía a la bomba dosificadora (Fotografía 5) también varía considerablemente confirmando la deficiente operacional del equipo.

**Tabla 4. Tabla de seguimiento de SCD**

STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Automático y Manual)						
Sulfato Liquido Mayo 28 de 2007						
Caudal	Turbiedad Rio	pH Rio	Turbiedad Cruda	Cantidad de Sulfato	Densidad de Carga	Señal de salida
820	92	8,6	77	53	+153	1.0%
770	52	8,1	48	48	+44	37.0%
679	51	8,09	40	44	+121	33.0%
700	51	8,08	40	39	+62	22.0%
630	49	8,06	39	38	+18	22.0%

620	51	8,04	35	38	+24	22.0%
610	53	8,02	38	41	+27	22.0%

Fuente: La Autora

**Observaciones:** Desde el caudal 770 L/s se cambió a modo manual ya que al realizar su respectiva prueba de jarras, ésta presentó exceso de coagulante.

**Fotografía 4. SCD**



Fuente: La Autora

**Fotografía 5. Bomba de frecuencia**



#### 4.4.1 Uso y manejo del Streaming Current Detector

- ✓ Para utilizar el SCD como control automático de la dosis de coagulante, se debe seguir las siguientes indicaciones:
  - El coagulante debe estar bien mezclado con el agua en el momento en que la muestra es tomada.
  - El tiempo de respuesta (el tiempo que le toma al monitor notar los cambios en la dosis de coagulante) no debe ser mayor de tres minutos.

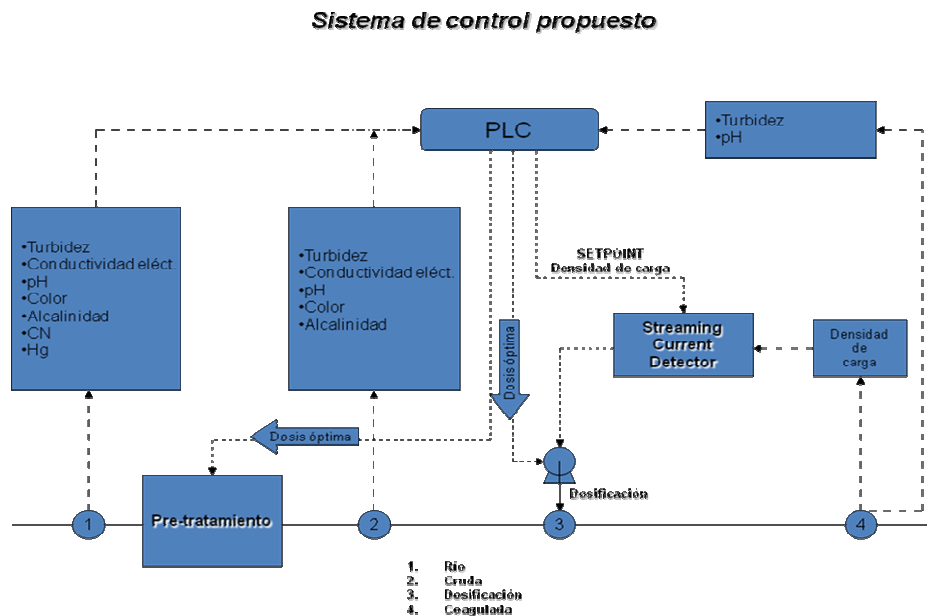
- La variación en la rata de flujo de la muestra no debe ser mayor a +/- 10 % de la rata inicial.
- Las bombas de coagulante se deben mantener en buenas condiciones mecánicas para asegurar una respuesta rápida y precisa a los cambios en el agua.
- El agua debe tener una condición estable de turbidez, pH, color, etc. cuando se esta configurando el sistema.
- Cuando la carga del agua es negativa (-), indica la falta de sulfato, si la carga es positiva (+), indica exceso de sulfato; en este caso se modifica la señal de salida que se envía a la bomba dosificadora.
- Para cada tipo de sulfato se utiliza una bomba dosificadora aparte. Para iniciar la dosificación, el SCD debe estar en modo manual con el fin de introducir al equipo el set point dado por la prueba de jarras.(Manual Instructivo SCD).

El sistema de control propuesto en la figura 3, plantea recibir las señales de los sensores ubicados en la entrada de la planta (agua de rio) y al inicio del tratamiento (agua cruda) de las variables medibles en línea (turbiedad, pH, conductividad) en un PLC (controlador lógico programable) configurado previamente para correlacionarlas de acuerdo al modelo desarrollado en este proyecto. La señal de salida del PLC se traducirá como un valor de dosis óptima de coagulante, el cual podrá ser dosificado directamente por una bomba o convertido en un valor de set point en el SCD (Controlador de dosificación) el cual



será el encargado directo de enviar la respectiva señal a la bomba dosificadora (3), adicionándose así la cantidad exacta de coagulante.

**Figura 3. Esquema del Sistema de control propuesto**



Fuente: Ing. Kento Taro Magara Gomez

## 4.5 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES A LAS VARIABLES ESTUDIADAS

### 4.5.1 Registro de datos

Se registraron 48 datos de condiciones iniciales, incluyendo las fechas de la toma de los datos, y su respectiva dosis de coagulante hallada por las pruebas de jarras. Ver tabla 6.

#### 4.5.2 Regresión lineal

Aunque la regresión lineal no es un método confiable de predicción, se utilizó esta herramienta matemática con el fin de comparar la dosis óptima hallada por las pruebas de jarras y por la red neuronal y se obtuvo que el coeficiente de correlación múltiple es de 0,93 y que el coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0,86 (Tabla 5) lo que indica que existe una correlación positiva es decir una dependencia entre las variables, cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción.

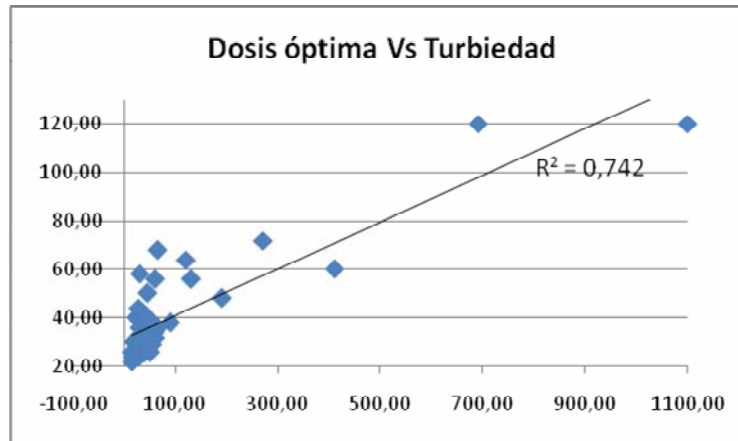
**Tabla 5. Análisis de regresión lineal múltiple**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,930562604
Coefficiente de determinación $R^2$	0,86594676
$R^2$ ajustado	0,852868395
Error típico	8,169335537
Observaciones	46

Fuente: La Autora

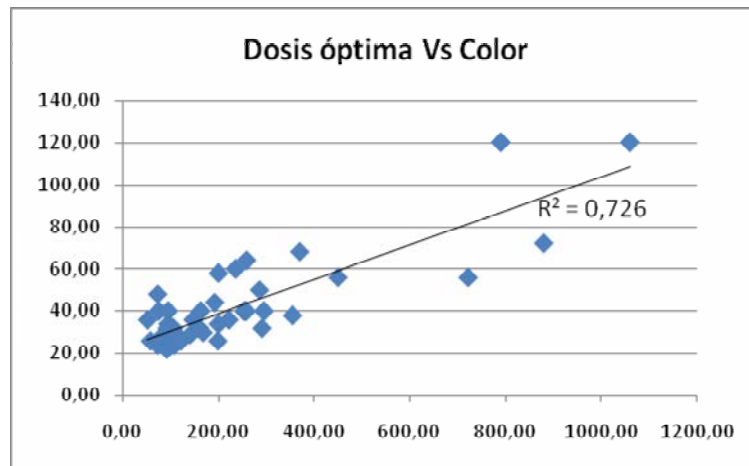
Se observa en la gráfica 7 que existe una dependencia lineal positiva entre la variable de turbiedad vs. dosis de coagulante, igualmente se presenta en la grafica 8 la misma dependencia con un  $R= 0,726$  donde la correlación ( $R^2$ ) es alta (próxima a 1), lo que indica que la turbiedad y el color son las variables de mayor efecto sobre la dosis óptima de coagulante.

**Grafica 7. Regresión Lineal Dosis Óptima Vs Turbiedad**



Fuente: La Autora

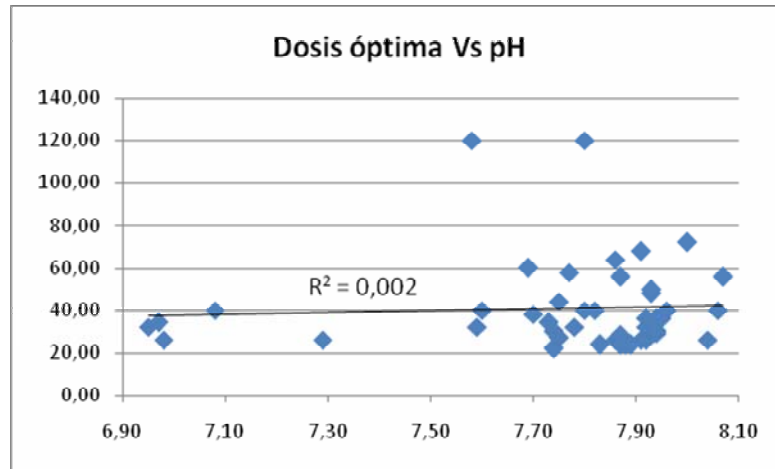
**Grafica 8. Regresión Lineal Dosis Óptima Vs Color**



Fuente: La Autora

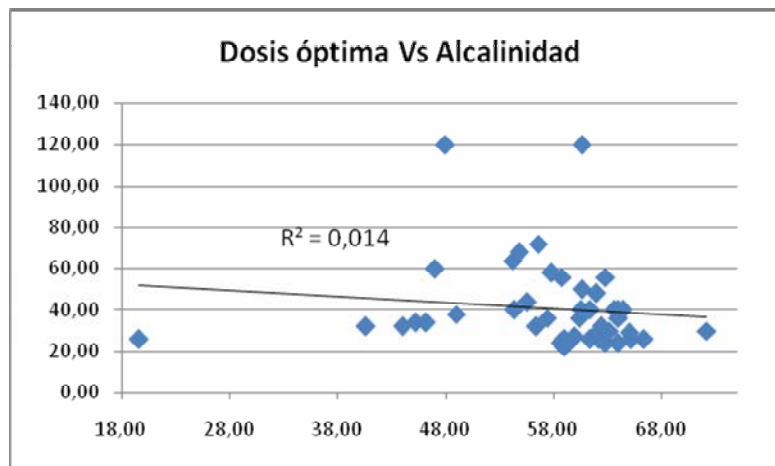
En la grafica 9 donde se relacionan el pH y la dosis de coagulante, la nube de datos se ajusta razonablemente a una recta con pendiente positiva, siendo semejante para la grafica 10 donde existe una dependencia funcional entre las variables pero no de tipo lineal, por tanto la correlación es muy pequeña.

**Grafica 9. Regresión Lineal Dosis Óptima Vs pH**



Fuente: La Autora

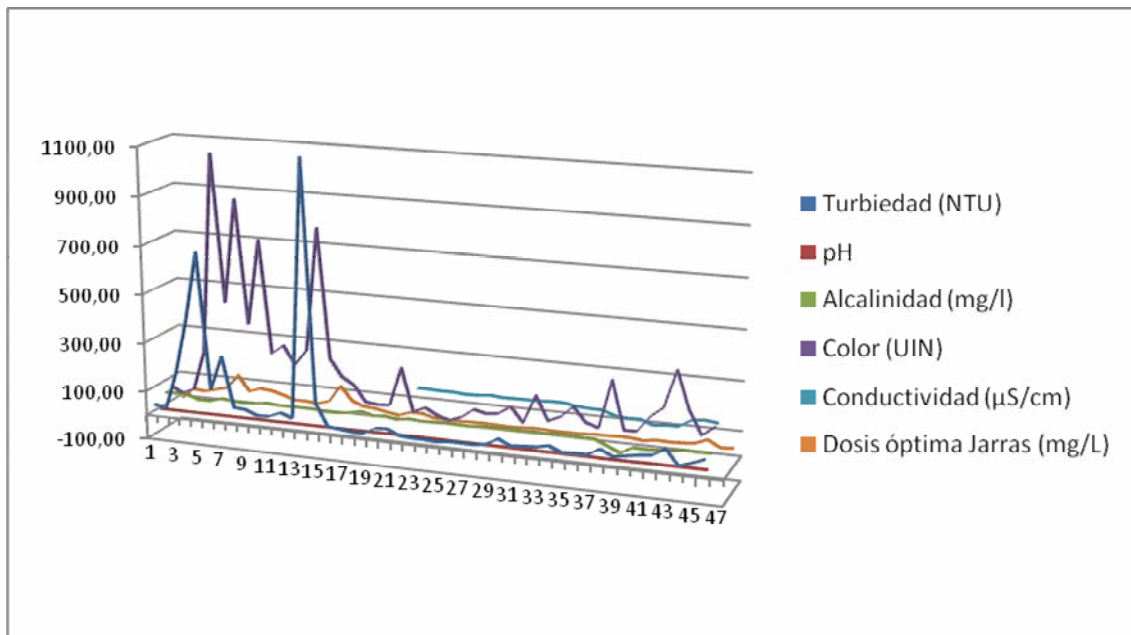
**Grafica 10. Regresión Lineal Dosis Óptima Vs Alcalinidad**



Fuente: La Autora

### 4.5.3 Aplicación de la red neuronal

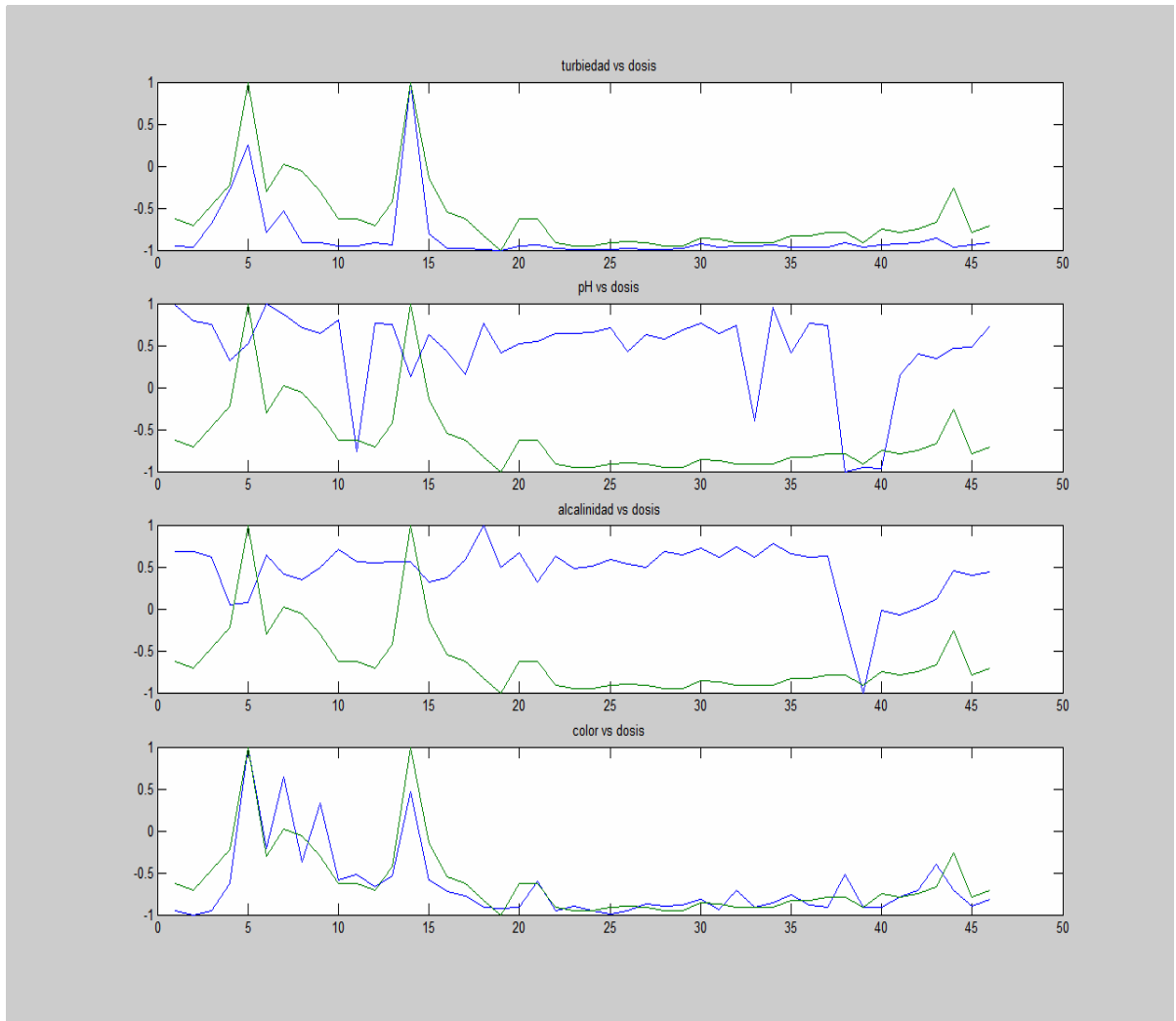
**GRAFICA 11. Relación turbiedad, pH, alcalinidad, color, conductividad, dosis de coagulante vs número de muestras.**



Fuente: La Autora

En la figura 4 se relacionan las variables de turbiedad, pH, color, alcalinidad, conductividad, dosis óptima de jarras vs. número de muestras para coagulante líquido, se puede observar que existe una relación visible entre la turbiedad y el color ya que cuando se presentan valores altos de turbiedad, el color a su vez aumenta, esto se debe a que la turbiedad es causada por la formación de arcillas en general a la tierra fina a veces coloreada, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua actuando de manera directa con el color; según este grafico el pH, la alcalinidad y la conductividad son variables que no influyen pues tienden a presentar valores constantes.

**Figura 4. Variables vs. Muestras**

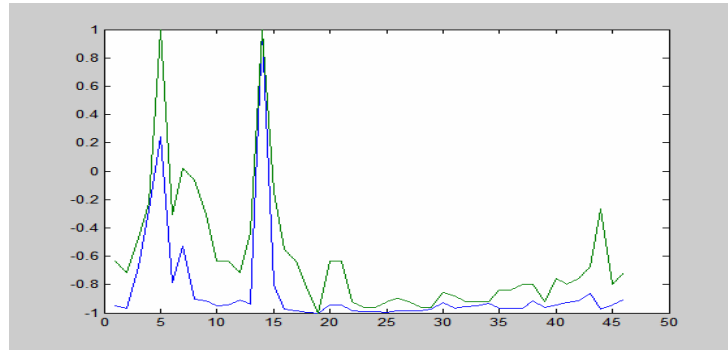


Fuente: Ing. Juan Carlos Villamizar

Las variables más influyentes en la determinación de dosis óptima (mg/L) son turbiedad (NTU) y color (UPC), ya que presentan las mismas tendencias como se observa en la figura 5.

A continuación en la figura 5 se muestra la relación entre las variables de turbiedad vs. dosis de coagulante.

**Figura 5. Relación Turbiedad (NTU) vs. Dosis de coagulante (mg/L).**

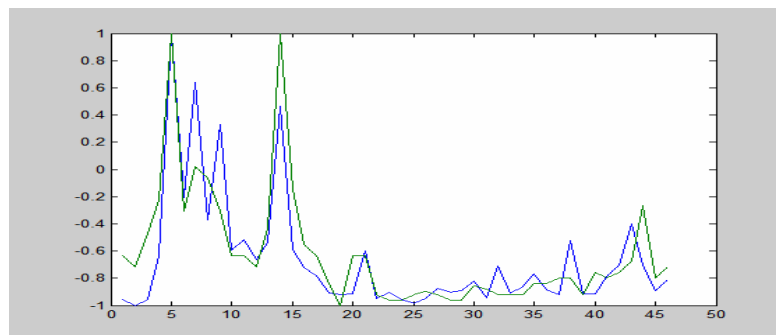


Fuente: Ing. Juan Carlos Villamizar

La tendencia de las líneas color azul (dosis real calculada por la prueba de jarras) y color verde (dosis calculada por la red neuronal) son semejantes indicando que la red neuronal fue correctamente entrenada.

Otra variable que se relaciona notoriamente es el color, como se puede apreciar en la figura 6. En esta gráfica también se puede ver la influencia que tiene el color en la dosis de coagulante ya que los picos de color en las muestras se relacionan aun más con la dosis de coagulante.

**Figura 6. Relación Color vs. Dosis de coagulante (mg/L).**

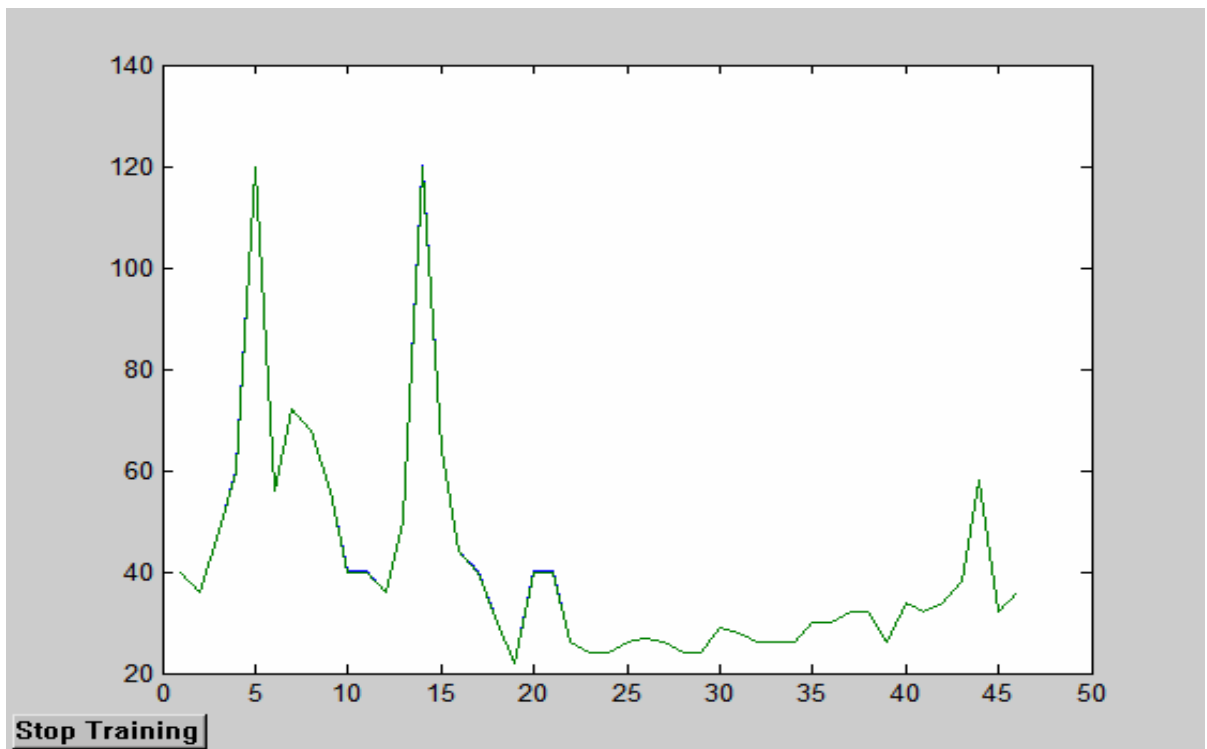


Fuente: Ing. Juan Carlos Villamizar

#### 4.5.4 Entrenamiento de la red neuronal.

Las variables a usar en el entrenamiento de la red neuronal son la turbiedad, el color, el pH y la alcalinidad pero como existe una gran diferencia numérica de las variables hay necesidad de normalizar los valores entre -1 y 1.

**Figura 7. Red Neuronal Entrenada.**



Fuente: Red Neuronal. Ing. Juan Carlos Villamizar

Como se puede ver en la figura 7, para la red neuronal no fue difícil aprender la curva de la dosis a partir de los datos de las variables, ya que en 5500 épocas (número de veces que la red neuronal repite el proceso de aprendizaje) se llegó a



la meta de error. La línea de color verde representa la dosis real, y la línea de color azul indica la dosis calculada por la red neuronal.

La topología de la red neuronal es un perceptrón multicapa con dos neuronas en la capa de entrada, 36 neuronas en la capa intermedia y una neurona en la capa de salida. Las funciones de activación son tangentes sigmoidales (tansig) y rectas (purelin).

En la tabla 6 se observa las condiciones iniciales del agua cruda, con sus respectivas fechas, los valores de conductividad se tomaron a partir del día 16 de julio de 2007, por otro lado se encuentran las dosis óptimas calculadas por prueba de jarras, regresión lineal y red neuronal.

Con fin de buscar cual de los dos métodos utilizados (regresión lineal y red neuronal) era mas eficiente, se utilizó como herramienta de apoyo hallar el porcentaje de error de cada uno respecto a la dosis óptima calcula por la prueba de jarras y se encontró que el de mayor porcentaje de error es la regresión lineal, ya que este oscila en un 40%, mientras que en la red neuronal el porcentaje de error mas elevado fue del 3%, siendo esta la de mayor eficiencia.

**Tabla 6. Red Neuronal Sulfato Líquido**

Agua cruda				Conductividad (µS/cm)	Fecha	Dosis óptima Jarras (mg/L)	Dosis óptima Calculada (mg/L)	Dosis óptima Calculada (mg/L)	% Error	% Error
Turbiedad (NTU)	pH	Alcalinidad (mg/l)	Color (UIN)			Líquido	Regresión Lineal	Redes Neuronales	Regresión Lineal	Red Neuronal
42	8,06	64	75		15 de febrero	40	32,25	40,00	19,38%	0%
31	7,95	64	52		28 de febrero	36	29,77	35,00	17,30%	3%
190	7,93	62	73		17 de marzo	48	40,2	48,00	16,25%	0%
410	7,69	47	236		22 de abril	60	60,51	60,00	0,85%	0%
690	7,8	48	1060		25 de abril	120	114,64	120,00	4,47%	0%
130	8,07	62,8	450		27 de abril	56	54,45	56,00	2,77%	0%
270	8	56,6	880		8 de mayo	72	82,19	72,00	14,15%	0%
65	7,91	54,8	370		9 de mayo	68	46,79	68,00	31,19%	0%
60,7	7,87	58,8	722		10 de mayo	56	61,54	56,00	9,90%	0%
40,9	7,96	64,4	258		15 de mayo	40	39,6	40,00	0,99%	0%
43	7,08	60,5	295		16 de mayo	40	35,46	40,00	11,36%	0%
64	7,94	60,4	222		17 de mayo	36	39,68	36,00	10,21%	0%
45,9	7,93	60,6	286		22 de mayo	50	41,38	50,00	17,25%	0%
1100	7,58	60,6	790		24 de mayo	120	123,75	120,00	3,12%	0%
120	7,86	54,2	259		4 de junio	64	44,78	64,00	30,02%	0%
28,2	7,75	55,6	192		5 de junio	44	35,4	44,00	19,55%	0%
21,7	7,6	61,4	163		12 de junio	40	31,95	40,00	20,12%	0%
16,1	7,94	72,2	98		13 de junio	30	29,93	30,00	0,25%	0%
14,1	7,74	59	92		14 de junio	22	29,62	22,00	34,63%	0%
43,3	7,8	63,6	95		19 de junio	40	31,38	40,00	21,55%	0%
45,2	7,82	54,4	254		4 de julio	40	39,82	40,00	0,44%	0%
21,8	7,87	62,4	77	161,3	16 de julio	26	29,95	26,00	15,20%	0%
18,1	7,87	58,6	100	161,2	16 de julio	24	31,2	24,00	30,01%	0%

18,3	7,88	59,4	73	159,5	16 de julio	24	29,99	24,00	24,94%	0%
14,9	7,91	61,4	58	160,1	17 de julio	26	29,1	26,00	11,92%	0%
21,5	7,75	60	77	156,1	17 de julio	27	29,34	27,00	8,67%	0%
21,1	7,86	59	114	157,7	17 de julio	26	31,89	26,00	22,65%	0%
20,7	7,83	64	102	163	18 de julio	24	30,53	24,00	27,21%	0%
27,3	7,89	62,8	108	158,8	18 de julio	24	31,76	24,00	32,35%	0%
54,5	7,94	65	141	159,5	18 de julio	29	34,96	29,00	20,54%	0%
32,2	7,87	62,2	81	160,5	19 de julio	28	30,77	28,00	9,89%	0%
37,2	7,92	65,2	199	160,7	19 de julio	26	36,36	26,00	39,85%	0%
40	7,29	62,2	99	164,1	19 de julio	26	27,83	26,00	7,04%	0%
50,4	8,04	66,4	122	163,4	19 de julio	26	34,43	26,00	32,41%	0%
30,1	7,74	63,2	168	154,1	23 de julio	30	33,48	30,00	11,60%	0%
32,3	7,94	62,2	109	151,1	23 de julio	30	32,54	30,00	8,45%	0%
32,4	7,92	62,4	93	150,3	23 de julio	32	31,66	32,00	1,07%	0%
60	6,95	40,6	291	132,1	30 de julio	32	37,65	32,00	17,65%	0%
36	6,98	19,6	94	127,2	30 de julio	26	30,06	26,00	15,62%	0%
45	6,97	45,2	95	129,1	30 de julio	34	27,6	34,00	18,83%	0%
53,6	7,59	44	160	110,5	31 de julio	32	35,65	32,00	11,41%	0%
59,2	7,73	46,2	200	115,8	31 de julio	34	38,53	34,00	13,33%	0%
89,5	7,7	49	355	116,4	31 de julio	38	46,72	38,00	22,95%	0%
28,8	7,77	57,8	200	147,8	3 de Agosto	58	35,68	58,00	38,48%	0%
45	7,78	56,4	106	152,3	3 de Agosto	32	32,66	32,00	2,08%	0%
65	7,92	57,4	147	145,7	3 de Agosto	36	36,58	36,00	1,62%	0%

Fuente: La Autora

## CONCLUSIONES

Se correlacionaron exitosamente las propiedades del agua que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante: Turbiedad, pH, Color y Alcalinidad, por medio del método de redes neuronales artificiales.

El modelo desarrollado permitirá desarrollar un sistema de control automático capaz de predecir y aplicar la dosis óptima de coagulante, con base en mediciones en línea de las propiedades: Turbiedad, pH, Color y Alcalinidad.

Por medio de pruebas de trazadores se establecieron los tiempos de operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable “Bosconia” del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Con base en las pruebas de jarras realizadas a muestras de agua cruda del Río Suratá, así como en un análisis estadístico multivariable, se estableció que los parámetros de mayor influencia en la determinación de dosis óptima de coagulante son la turbiedad y el color, para la Planta “Bosconia”.

Los valores de dosis óptima de coagulante se determinaron de acuerdo con la resolución 2115/07, así como con los parámetros de calidad internos establecidos en la Planta “Bosconia”.

Los resultados obtenidos en la aplicación del método de redes neuronales para la estimación de la dosis óptima de coagulante constituyen una prueba real de su gran utilidad en la modelación de procesos de tratamiento de agua. El

porcentaje de error máximo obtenido en la comparación de dosis reales y modeladas fue de 3%.

El éxito de una red neuronal depende fundamentalmente de la veracidad y cantidad de datos suministrados para el entrenamiento de la misma. Los datos recopilados en el estudio lograron cubrir solamente los meses desde Febrero a Junio del año 2007.

## RECOMENDACIONES

Es necesario tener en cuenta los datos históricos de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia con el fin de adicionarlos a la red neuronal.

En cuanto a la prueba de trazadores, se requiere realizar varias de estas con diferentes caudales incluyendo los más usuales, con el propósito de crear una grafica de tiempo de retención vs. caudal que facilite al operador conocer el tiempo de reacción frente a cualquier eventualidad.

Es importante que se realicen continuos ajustes de calibración de equipos, para evitar el deterioro y el mal funcionamiento de estos, perjudicando directamente la calidad y eficiencia en las pruebas de laboratorio y los procesos del tratamiento de agua potable.

Se recomienda la calibración exclusiva del SCD ya que actualmente su funcionamiento es limitado y por ello no se resaltan sus grandes ventajas como controlador en la dosificación de coagulante.

Invertir en la compra de equipos como molinete para la medición de caudal y sustituir equipos como conductímetro, pH-metro y turbidímetro portátil que brinden mayor confiabilidad y mejor desempeño.

## BIBLIOGRAFIA

PEREZ PARRA, JORGE ARTURO. Manual de Potabilización del Agua, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Tercera Edición, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo I. Tercera edición. Mc Graw Hill. Bogotá. 2000.

ROMERO ROJAS, Jaime Alberto. Acuíquímica. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fé de Bogotá. 1996.

[www.acueductodebucaramanga.com](http://www.acueductodebucaramanga.com).

T.H.Y TEBBUTT, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Birmingham, Editorial Noriega Editores, México, España Venezuela, Colombia

ARBOLEDA V. (1975). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua, CEPIS, Lima, Perú.

AMERICAN WATER WORKS ASOCIATION, Manual de suministros de agua comunitaria.

Manual de operaciones de Streaming Current Monitor, Chemtrac System Inc. 2004.

GUIA DE LABORATORIO, Ing. Juan Carlos Villamizar, Profesor facultad Ing. Electrónica UPB, Bucaramanga.

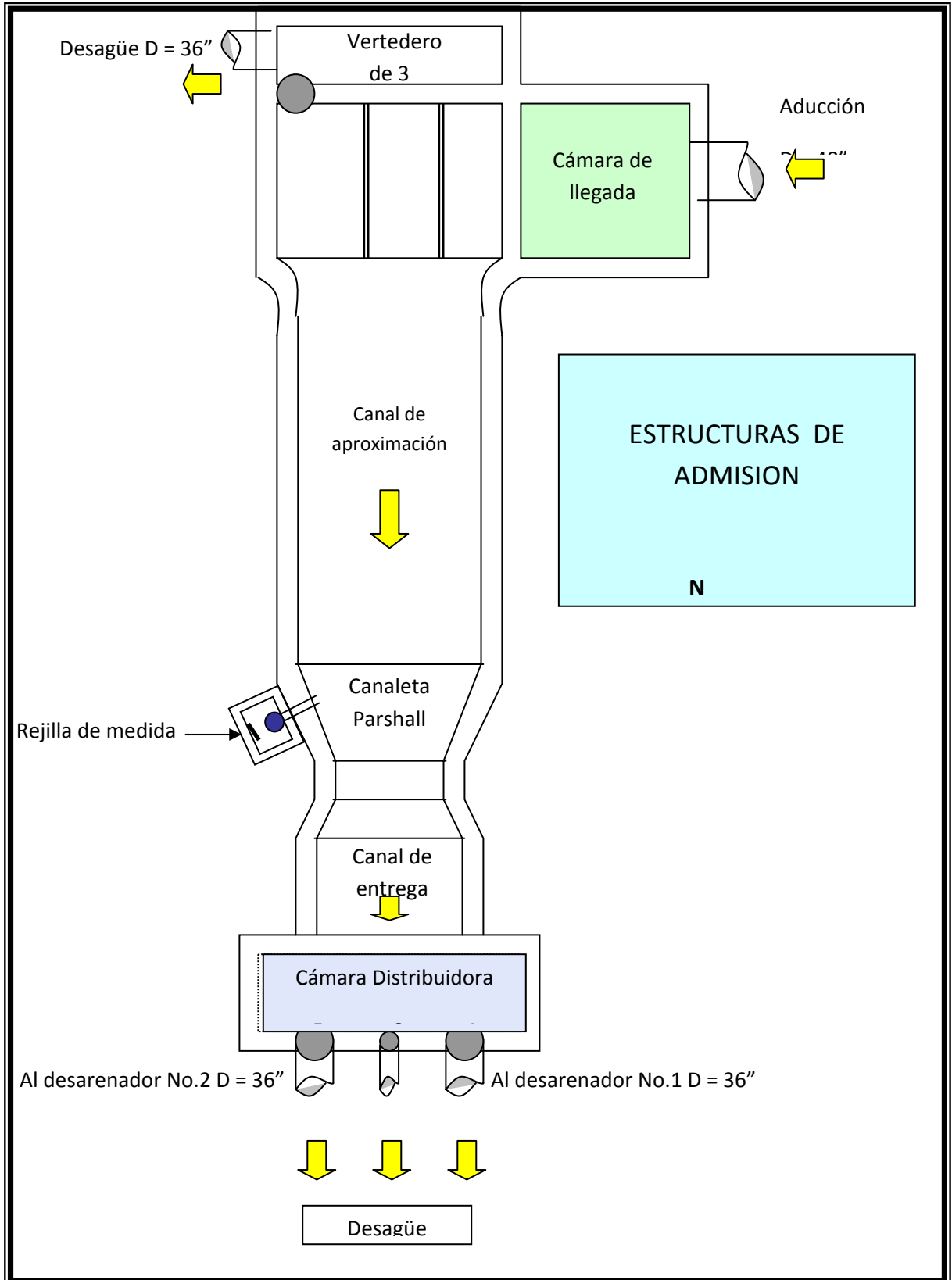
NICOLAS VALENTIN y THIERRY DENOEU, A Neural Network – based software sensor for coagulation control in a water treatment.

GUIA ANÀLISIS DE LABORATORIO PLANTA BOSCONIA, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2007.

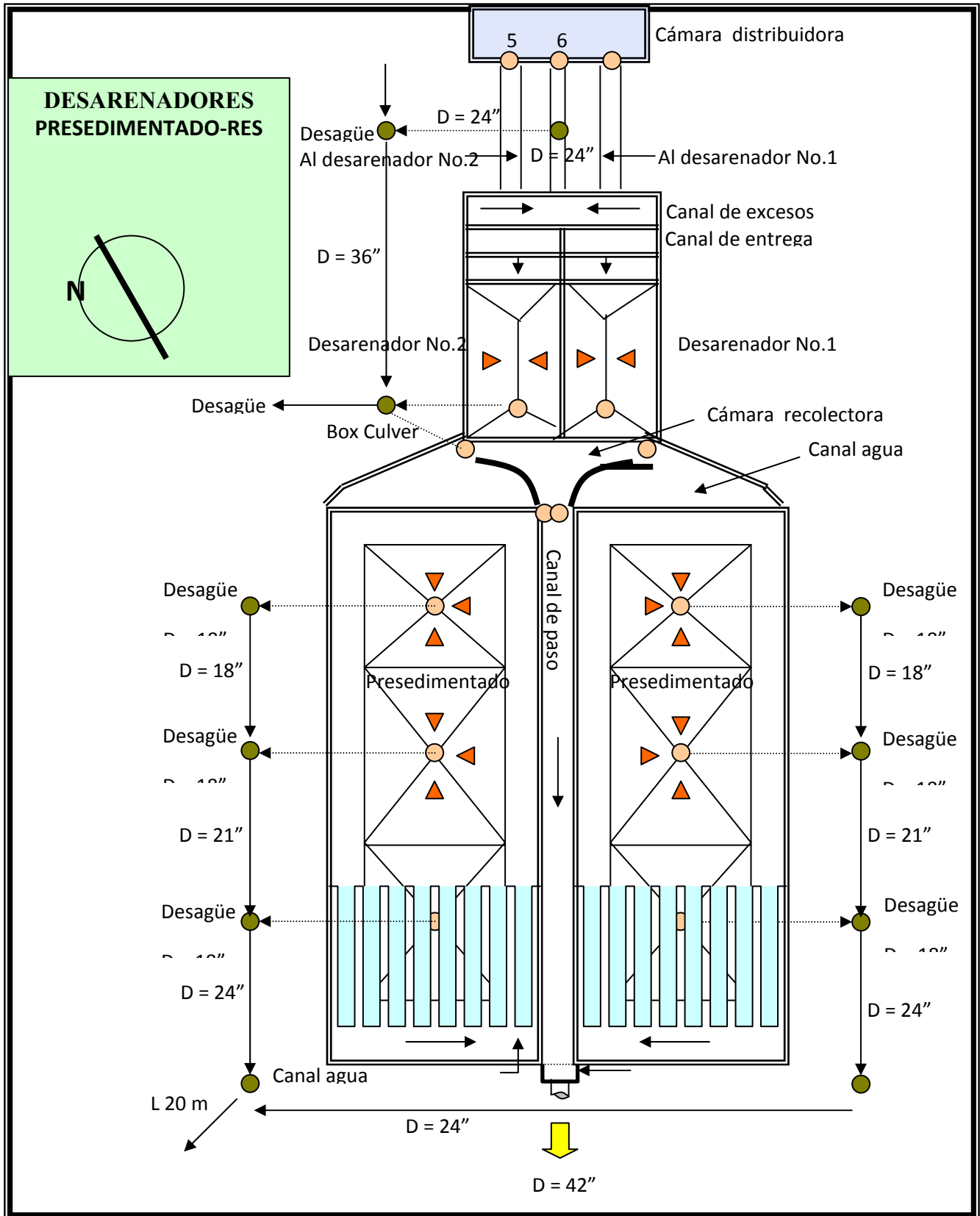


# **ANEXO A**

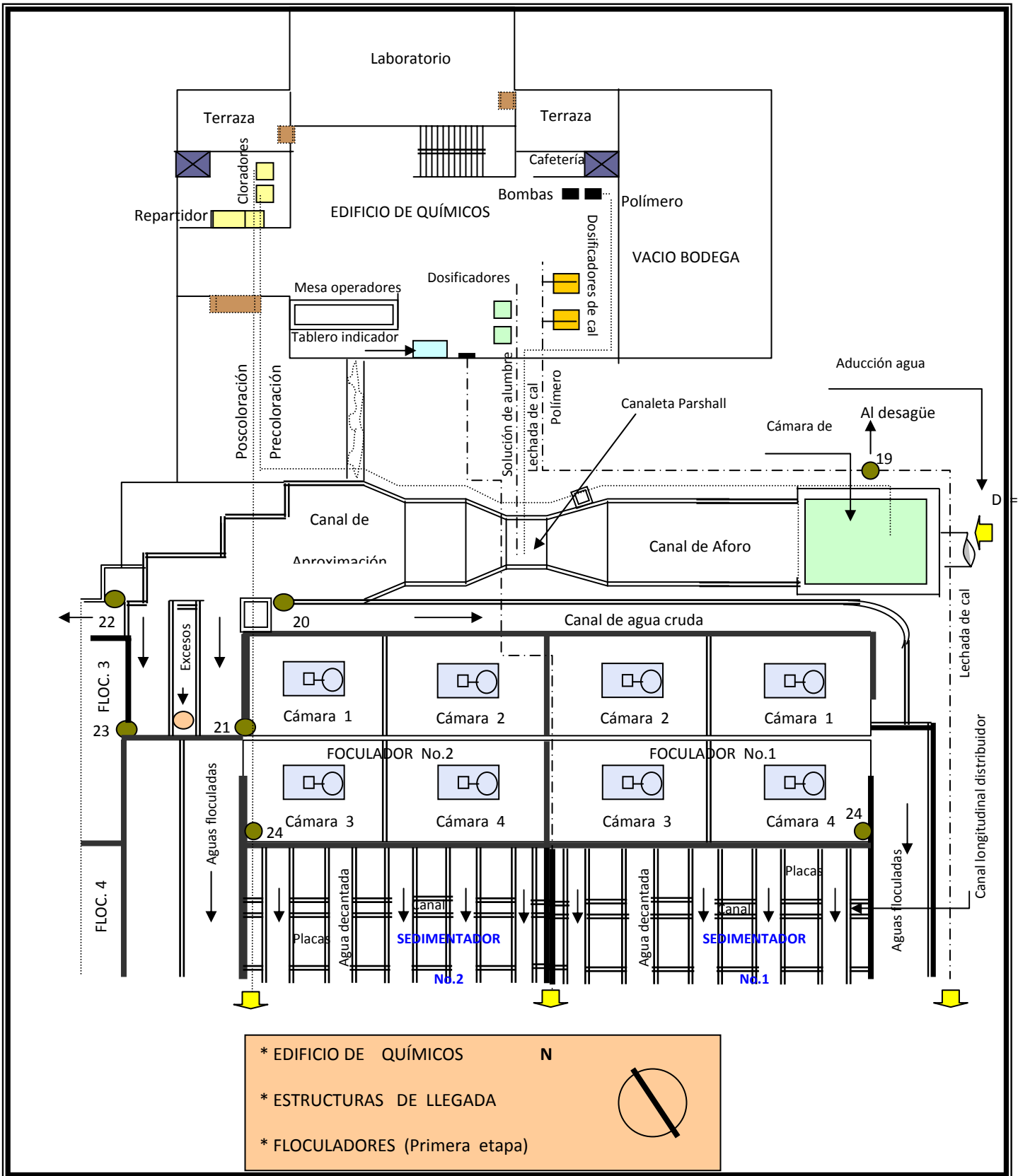
## ESTRUCTURAS DE ADMISION



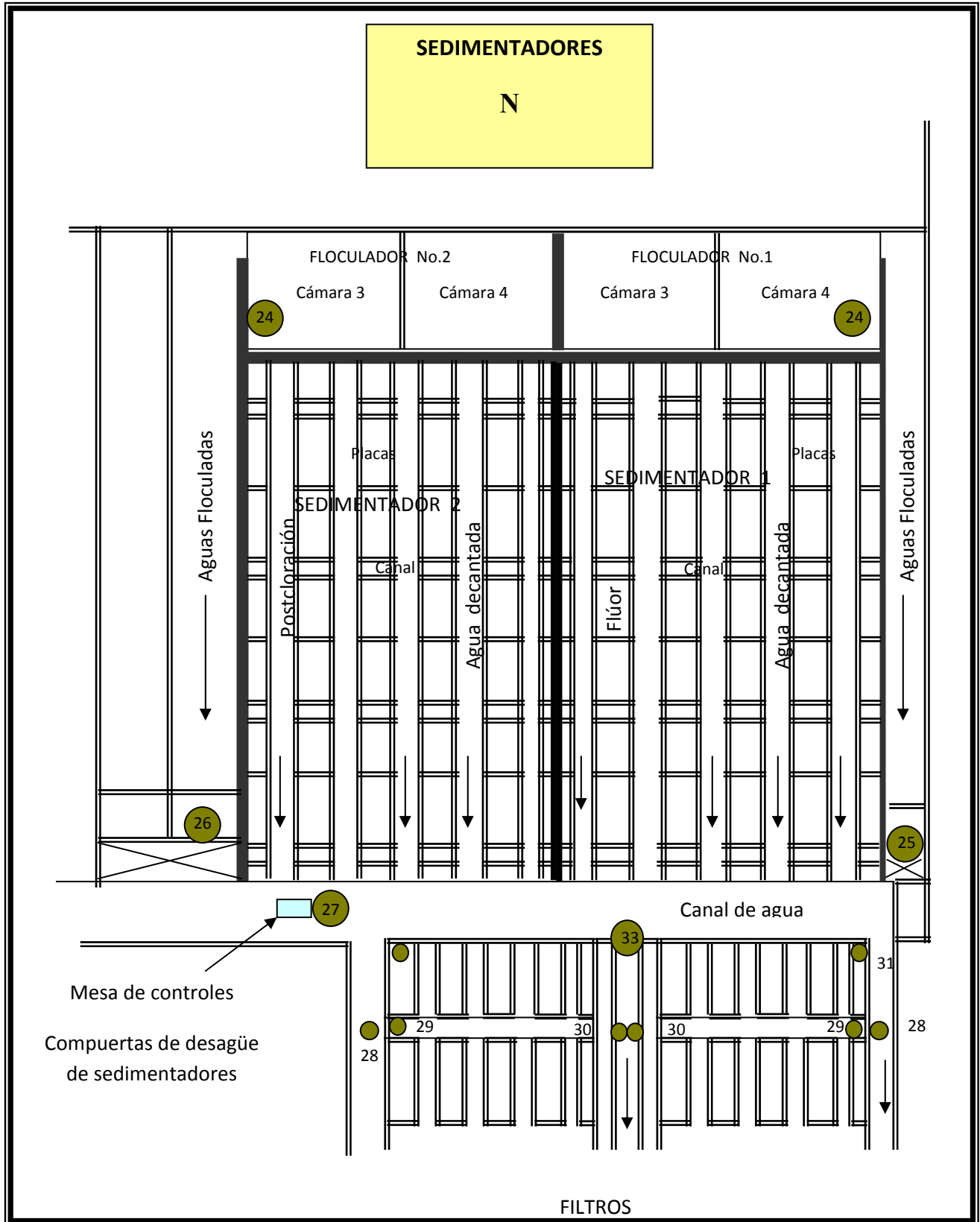
# ESTRUCTURAS DE PRE - TRATAMIENTO



# ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO



# SEDIMENTADORES



# **ANEXO B**

**TABLA 1**

**Febrero 15 de 2007**

**Q= 750 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
42	8.06	64	75

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
6	7,56	34,2
10	7,39	30,0
14	7,20	1,70
18	7,18	3,55
22	7,15	1,70
26	7,13	1,05

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>Ph</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
14	7,43	14,0	15	60,0	Gama Exc.
16	7,36	5,50	14	59,0	Gama Exc.
18	7,30	4,10	14	57,0	Gama Exc.
20	7,30	2,20	14	56,50	0,341
22	7,28	1,95	13	55,40	0,330
24	7,26	1,40	13	53,40	0,312

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
28	7,38	13,8	18	61,4	Gama Exc.
32	7,35	5,18	18	59,2	Gama Exc.
36	7,30	4,70	17	57,0	Gama Exc.
40	7,28	3,30	14	55,4	Gama Exc.
44	7,26	2,02	13	54,8	0,336
48	7,24	1,67	12	53,6	0,317

**TABLA 2**

**Febrero 28 de 2007**

**Q= 725 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
31	7.95	64.0	52

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
6	7.46	19
10	7.34	14.4
14	7.29	8.10
18	7.24	1.93
22	7.22	1.21
26	7.13	0.86

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
12	7.29	16.3	29	60.80	Gama Exc.
14	7.27	9.5	20	59.4	Gama Exc.
16	7.25	3.3	20	58.8	Gama Exc.
28	7.20	2.12	17	57.2	0.398
20	7.16	1.52	18	56	0.342
22	7.13	1.10	12	54	0.312

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
24	7.30	13.5	20	61	Gama Exc.
28	7.22	7.15	18	59.8	Gama Exc.
32	7.20	4.03	19	59	Gama Exc.
36	7.17	3.15	15	57.8	Gama Exc.
40	7.14	1.45	16	56	0.342
44	7.13	1.04	16	55	0.281



**TABLA 3**

**Marzo 17 de 2007**

**Q= 780 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
190	7,93	62	73

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7,39	52
15	7,24	31,6
20	7,15	4,4
25	7,09	1,86
30	7,05	1,22
35	7,03	0,88

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
14	7,35	18,6	40	57,4	Gama Exc.
16	7,24	8,20	35	57	Gama Exc.
18	7,16	4,5	30	56,4	0,383
20	7,13	4,05	29	55,8	0,336
22	7,09	2,15	16	54,2	0,291
24	7,05	1,43	12	53,2	0,243

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
28	7,31	23	92	59	Gama Exc.
32	7,26	10,5	60	58	Gama Exc.
36	7,21	7,3	47	57,2	Gama Exc.
40	7,17	4,7	28	56,4	0,356
44	7,14	2,3	19	55	0,331
48	7,09	1,65	15	53,4	0,295

**TABLA 4**

**Abril 22 de 2007**

**Q= 800 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
410	7.69	47	236

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
15	7.08	112
20	7	36.4
25	6.89	5.21
30	6.84	2.04
35	6.77	1.31
40	6.68	1.29

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7.06	22.5	85	39.2	Gama Exc.
22	7.02	18.3	59	38	Gama Exc.
24	6.98	7.6	35	37.2	0.253
26	6.95	3.6	34	36.6	0.212
28	6.93	2.4	28	35	0.176
30	6.87	1.9	20	33	0.154

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
40	7.04	34.2	86	37.4	Gama Exc.
44	7	24	63	36.8	Gama Exc.
48	6.97	7.2	41	35.4	0.282
52	6.96	5.5	36	33.6	0.240
56	6.90	2.8	27	32.6	0.165
60	6.86	2.2	21	31	0.139

**TABLA 5**

Abril 25 de 2007

Q= 850 L/s

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
690	7.80	48	1060

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
20	7,25	360
30	7,10	336
40	6,97	285
50	6,89	31
60	6,62	4,46
70	6,43	2,3

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
52	6,86	29,8	275	37,4	Gama Exc.
54	6,80	24	190	36	Gama Exc.
56	6,72	7,1	47	34,8	0,279
58	6,65	4,9	42	33,6	0,202
60	6,55	5,2	35	31,6	0,189
62	6,45	5,4	26	29,0	0,161

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
104	6,8	43	323	36	Gama Exc.
108	6,73	22,1	180	34,2	Gama Exc.
112	6,65	12,3	59	33,2	0,342
116	6,61	8,3	54	30,8	0,274
120	6,50	4,7	39	29,4	0,203

**TABLA 6**

Abril 27 de 2007

Q= 760 L/s

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
130	8.07	62.8	450

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7.5	98
15	7.41	75
20	7.29	32.2
25	7.24	10.1
30	7.18	5.3
35	7.16	2.0

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
18	7.31	65	395	58,4	Gama Exc.
20	7.26	25,3	170	58	Gama Exc.
22	7.22	17,2	115	57,6	Gama Exc.
24	7.17	10,1	82	56,4	0.349
26	7.12	5,4	41	54	0.306
28	7.10	4,7	38	52,4	0.291

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
36	7.27	83	510	58,4	Gama Exc.
40	7.20	29,1	230	58	Gama Exc.
44	7.16	23,3	188	57,4	Gama Exc.
48	7.14	13,7	146	56	0.388
52	7.1	6	52	54,4	0.343
56	7.07	4,9	44	53,6	0.312

**TABLA 7**

**Mayo 8 de 2007**

**Q= 850 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
270	8,0	56,6	880

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
15	6,95	245
20	6,88	205
25	6,77	150
30	6,66	9,13
35	6,55	4,04
40	6,50	2,91

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
26	7,17	80,8	560	51,2	Gama Exc.
28	7,10	64,5	450	50,0	Gama Exc.
30	7,07	14,9	110	49,6	0,360
32	7,02	9,98	66	48,2	0,305
34	5,86	6,96	31	47,2	0,264
36	6,92	33	17	45,6	0,175

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
52	7,10	104	520	51	Gama Exc.
56	7,02	28,9	365	49,8	Gama Exc.
60	7	15,2	119	49,2	Gama Exc.
64	6,96	7,03	59	48,6	0,389
68	6,95	5,65	35	48	0,233
72	6,94	5,45	28	46	0,245

**TABLA 8****Mayo 9 de 2007****Q= 1050 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
65	7.91	54.8	370

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7.43	43.1
15	7.31	44
20	7.15	40.9
25	7.06	32.4
30	7.08	5.28
35	7.04	1.40

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
24	7.04	41,2	328	48.4	Gama Exc.
26	7.03	37,8	229	47	Gama Exc.
28	7.01	20,2	147	45.6	Gama Exc.
30	7.0	38,0	40	44.6	Gama Exc.
32	7.02	4,49	32	43.6	Gama Exc.
34	7.04	1,34	14	42.8	0.379

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
48	7.06	41.9	301	48	Gama Exc.
52	7.08	37.9	294	46.4	Gama Exc.
56	7.03	19.5	179	45.2	Gama Exc.
60	7.0	14.6	128	44.4	Gama Exc.
64	6.94	5.54	51	43	Gama Exc.
68	6.91	2.62	26	42	Gama Exc.

**TABLA 9**

**Mayo 10 de 2007**

**Q= 820 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
60,7	7,87	58,8	722

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
20	7,18	44,2
25	7,15	2,07
30	7,01	1,20
35	6,98	1,14
40	6,81	0,831
45	6,78	0,839

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
22	7,12	14,3	115	52	Gama Exc.
24	7,14	10,1	90	51,2	Gama Exc.
26	7,10	4,06	38	50,6	Gama Exc.
28	7,04	1,81	22	49,4	0,257
30	7,01	1,61	22	48,4	0,328
32	7,02	1,65	20	48,0	0,327

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
44	7.22	15,7	126	52.4	Gama Exc.
48	7.14	14,8	116	52	Gama Exc.
52	7.11	8,59	47	51,8	Gama Exc.
56	7.08	3,77	30	51,0	Gama Exc.
60	7.06	1,51	21	50,4	0,244
64	7.01	1,36	21	47,6	0,247

**TABLA 10****Mayo 15 de 2007****Q= 800 L/s**

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
40.9	7.96	64.4	258

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
20	7.17	2.78
25	7.08	1.23
30	7.00	1.20
35	6.97	1.30
40	6.86	1.57
45	6.82	1.0

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7.36	32,5	310	68	Gama Exc.
12	7.41	29,0	272	62	Gama Exc.
14	7.23	11,7	119	58,2	Gama Exc.
16	7.23	7,28	53	58	Gama Exc.
18	7.18	3,16	41	57,6	0.328
20	7.19	2,27	23	56,4	0.311

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7.38	34,3	311	61,6	Gama Exc.
24	7.37	29,7	303	60,6	Gama Exc.
28	7.28	10,3	101	58,8	Gama Exc.
32	7.28	4,41	50	58,4	0.385
36	7.30	3,24	38	56,6	0.359
40	7.17	2,07	29	54,4	0.311



**TABLA 11**

**Mayo 16 de 2007**

**Q= 1010 L/s**

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
43	7,08	60,5	295

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7,36	25,4
14	7,25	3,77
18	7,21	1,71
22	7,14	0,984
26	7,10	0,684
30	7,04	2,74

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
12	7,30	12,9	90	59,8	Gama Exc.
14	7,25	9,03	41	58,6	Gama Exc.
16	7,23	7,91	31	58	Gama Exc.
18	7,11	7,48	43	57,8	Gama Exc.
20	7,10	7,47	51	55,4	Gama Exc.
22	7,03	7,03	25	54,6	0,324

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
24	7,61	15	111	60,4	0,237
28	7,54	4,26	36	60	0,238
32	7,58	3,27	34	58	0,263
36	7,49	3,03	22	57,4	0,365
40	7,47	2,44	18	57	0,363
44	7,45	1,43	17	56	0,331

**TABLA 12**

**Mayo 17 de 2007**

**Q= 1200 L/s**

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
64	7.94	60.4	222

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
5	7.63	38.1
10	7.40	27.5
15	7.29	4.30
20	7.21	2.15
25	7.14	1.30
30	7.03	0.765

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7.49	32,2	190	64	Gama Exc.
12	7.44	22,1	54	60	Gama Exc.
14	7.37	5,14	36	58	0.346
16	7.35	4,49	27	58,8	0.326
18	7.33	4,06	22	56	0.295
20	7.27	1,83	19	57	0.262

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7.56	28,3	195	62	Gama Exc.
24	7.51	9,39	72	60	0.396
28	7.49	8,2	39	58	0.362
32	7.43	9,0	27	56	0.391
36	7.37	2,73	20	57	0.295
40	7.33	1,09	23	56	0.277

**TABLA 13**

**Mayo 22 de 2007**

**Q= 660 L/s**

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
45,9	7,93	60,6	286

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
5	7,59	48,0
10	7,50	46,8
15	7,38	36,9
20	7,26	4,45
25	7,17	3,15
30	7,13	1,32

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
15	7,52	36,9	68	58,9	Gama Exc.
17	7,38	8,56	65	57,2	Gama Exc.
19	7,35	4,61	32	56,8	0,354
21	7,30	3,31	21	56,6	0,299
23	7,29	2,05	10	55,6	0,252
25	7,19	0,346	8	55,2	0,190

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
30	7,45	41,2	185	55	Gama Exc.
34	7,35	9,7	98	55,2	Gama Exc.
38	7,30	5,3	74	53,6	0,340
42	7,23	4,2	49	52,2	0,362
46	7,18	3,1	22	50,6	0,310
50	7,13	2,7	15	48	0,295

**TABLA 14**

**Mayo 24 de 2007**

**Q= 600 L/s**

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
1100	7.58	60.6	790

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
30	6.98	415
45	6.75	70.8
60	6.53	3.47
75	6.34	1.59
90	6.25	1.06
105	6.07	1.32

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
45	6.77	234	345	43	Gama Exc.
48	6.65	34.6	249	41.8	0.296
51	6.62	23.2	135	38	0.293
54	6.58	13.9	111	36.6	0.177
57	6.52	9.38	88	36.4	0.090
60	6.49	6.73	48	36.8	0.313

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
90	6.65	277	479	43.6	Gama Exc.
96	6.69	211	326	42	Gama Exc.
102	6.71	145	205	42.5	Gama Exc.
108	6.73	112	135	41.8	Gama Exc.
114	6.67	65.9	96	40.6	0.383
120	6.63	9.1	52	40	0.001

**TABLA 15**

**Junio 4 de 2007**

**Q= 810 L/s**

<b>Condiciones del Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
120	7,86	54,2	259

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
15	7,36	128
20	7,32	116
25	7,19	25,1
30	7,06	5,76
35	6,96	5,09
40	6,98	1,47

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
22	7,14	63,4	540	49,6	Gama Exc.
24	7,08	33,3	240	48	Gama Exc.
26	6,97	17,4	152	47,2	Gama Exc.
28	6,92	12,4	105	46,6	Gama Exc.
30	6,8	2,25	20	45,4	0.193
32	6,85	2,2	17	44,4	0.172

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
44	7,08	105	716	50,0	Gama Exc.
48	7,03	63,5	441	49,2	Gama Exc.
52	6,98	57,1	308	48,6	Gama Exc.
56	6,93	15,7	132	47,4	0,385
60	6,86	8,4	68	46,2	0,298
64	6,84	2,40	21	45,0	0,166

**TABLA 16**

**Junio 5 de 2007**

**Q= 1090 L/s**

<b>Condiciones del Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
28.2	7.75	55.6	192

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7.93	29.8
15	7.68	29.7
20	7.57	1.66
25	7.53	1.69
30	7.50	0.75
35	7.49	0.74

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
12	7.74	28,2	239	51,6	Gama Exc.
14	7.57	27,4	197	52,8	Gama Exc.
16	7.44	7,25	62	49,4	0.390
18	7.35	2,29	36	49,2	0.282
20	7.26	1,34	32	47	0.236
22	7.16	1,19	27	45,6	0.299

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
24	8.08	30,7	312	52,4	Gama Exc.
28	7.62	29,6	306	51,4	Gama Exc.
32	7.51	15,0	161	49,8	Gama Exc.
36	7.48	4,88	120	49,2	0.340
40	7.40	3,32	71	49,0	0.329
44	7.60	1,58	53	48,9	0.297

**TABLA 17**

**Junio 12 de 2007**

**Q= 1100 L/s**

<b>Condiciones del Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
21,7	7,60	61,4	163

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
10	7,25	21,5
15	7,13	2,39
20	7,06	1,24
25	6,90	1,16
30	6,81	1,12
35	6,78	0,769

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
12	7,89	18	100	59	Gama Exc.
14	7,76	10,5	85	58,6	Gama Exc.
16	7,74	9,88	35	58	Gama Exc.
18	7,72	2,27	27	56,4	0,385
20	7,68	1,82	20	56	0,238
22	7,65	1,44	17	54,4	0,270

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7,9	16	120	60	Gama Exc.
24	7,82	10,1	97	58,2	Gama Exc.
28	7,76	9,7	72	58,1	Gama Exc.
32	7,73	5,3	53	55,4	Gama Exc.
36	7,7	1,9	23	53,1	0,335
40	7,68	1,0	15	52,9	0,245

**TABLA 18**

**Junio 13 de 2007**

**Q= 830 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
16.1	7.94	72.2	98

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
4	7.84	15.6
8	7.62	15.4
12	7.51	13.8
16	7.42	1.57
20	7.29	0.867
24	7.33	0.651

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7.53	13.5	96	59.4	Gama Exc.
12	7.42	10.8	43	56.8	Gama Exc.
14	7.41	4.08	27	56.6	Gama Exc.
16	7.40	2.12	21	56.2	Gama Exc.
18	7.36	1.46	12	56	0.361
20	7.33	0.888	11	55.4	0.341

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7.67	14.4	107	61	Gama Exc.
22	7.64	14.1	98	62	Gama Exc.
24	7.60	14.0	96	58.2	Gama Exc.
26	7.36	4.97	49	56.6	0.245
28	7.34	4.7	23	56.2	0.241
30	7.29	2.3	15	56	0.238



**TABLA 19**

**Junio 14 de 2007**

**Q= 720 L/s**

<b>Condiciones del Rio</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
14,1	7,74	59	92

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
4	7,60	7,97
8	7,59	2,97
12	7,39	1,29
16	7,27	0,651
20	7,25	0,536
24	7,12	0,419

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7,50	1,85	149	59	Gama Exc.
12	7,46	1,72	82	58,8	0,390
14	7,39	1,68	72	58,2	0,325
16	7,30	0,994	45	57,4	0,286
18	7,29	0,751	43	56,6	0,244
20	7,26	0,565	40	54,8	0,219

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
16	7,53	3,22	64	60	Gama Exc.
18	7,51	2,24	57	624	Gama Exc
20	7,5	1,74	54	58,0	0,340
22	7,49	1,54	52	56,80	0,311
24	7,47	1,5	52	56,2	0,287
26	7,43	1,40	50	56	0,266

**TABLA 20**

Junio 19 de 2007

Q= 820 L/s

<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
43.3	7.8	63.6	95

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
4	7.72	36.00
8	7.66	35.4
12	7.56	10.7
16	7.40	2.25
20	7.38	1.56
24	7.28	0.991

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7.54	11.1	88	67.4	Gama Exc.
12	7.53	12.4	48	59.6	Gama Exc.
14	7.51	3.6	44	59.4	Gama Exc.
16	7.42	2.14	20	58.6	0.328
18	7.40	1.68	18	58	0.215
20	7.36	1.48	10	57.8	0.210

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7.45	20.1	49	68.4	Gama Exc.
24	7.40	6.84	44	62	Gama Exc.
28	7.34	4.27	24	58.6	Gama Exc.
32	7.33	2.90	23	58.2	0.298
36	7.27	2.26	21	56.6	0.253
40	7.25	1.37	13	56	0.211

**TABLA 21**

**Julio 4 de 2007**

**Q= 960 L/s**

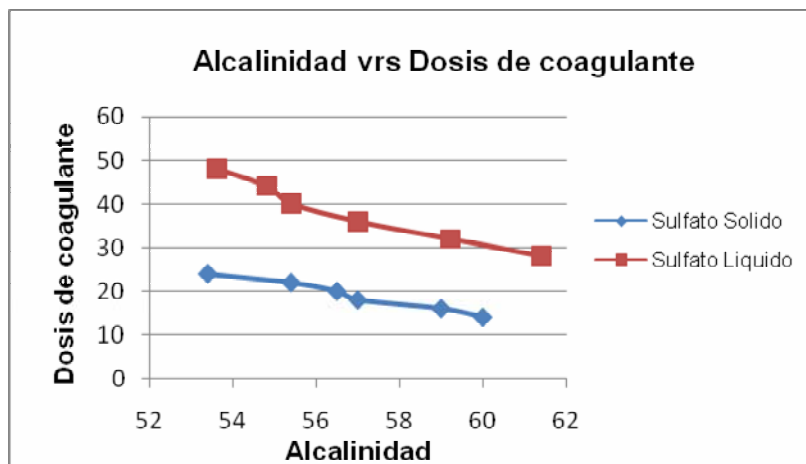
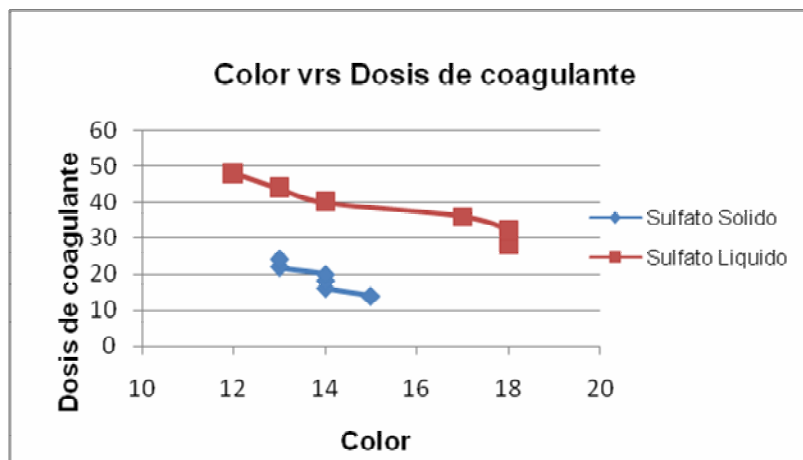
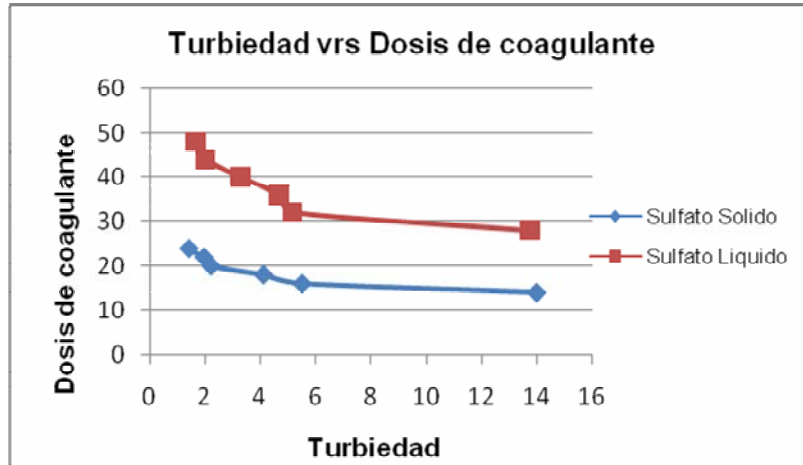
<b>Condiciones del Agua Cruda</b>			
<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>	<b>Color (UIN)</b>
45,2	7,82	54,4	254

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>		
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>
8	7,35	43,2
12	7,30	40,1
16	7,27	10,5
20	7,21	5,3
24	7,15	4,0
28	7,10	1,7

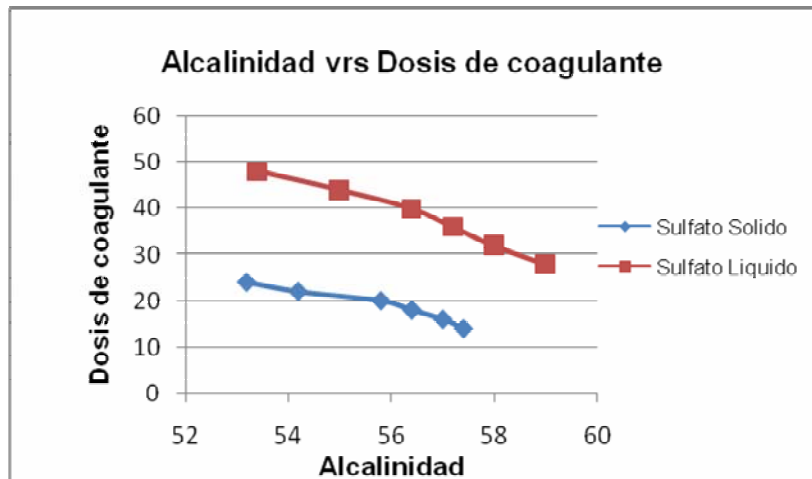
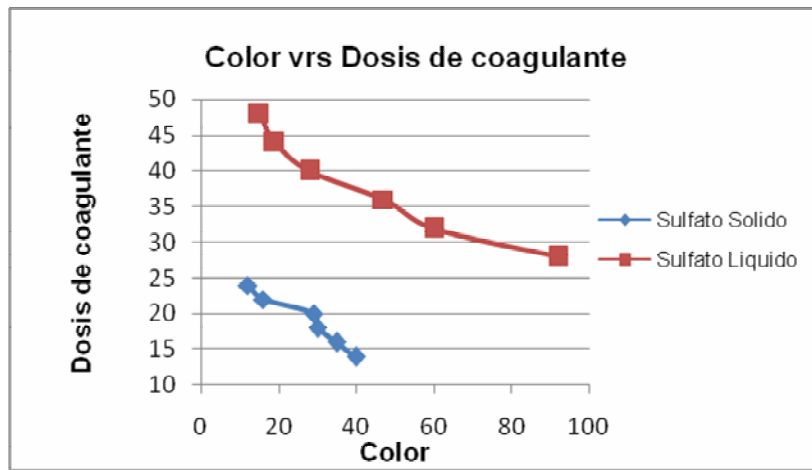
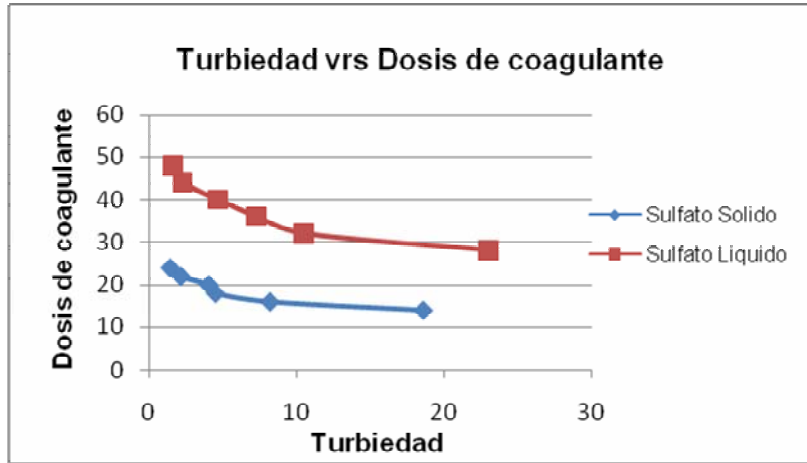
<b>Ensayo Sulfato de Aluminio SÓLIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
10	7.32	41,0	72	56,4	Gama Exc.
12	7.31	39,4	65	56,2	Gama Exc.
14	7.30	39,1	50	50	Gama Exc.
16	7.24	17,3	19	48	Gama Exc.
18	7.15	5,68	15	45,8	Gama Exc.
20	7.11	4,76	10	44,2	Gama Exc.

<b>Ensayo Sulfato de Aluminio LIQUIDO</b>					
<b>Dosis</b>	<b>pH</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Aluminio</b>
20	7,31	39,4	78	54,8	Gama Exc.
24	7,24	36,2	69	48,4	Gama Exc.
28	7,23	26,0	52	48,2	Gama Exc.
32	7,16	9,81	23	47,4	Gama Exc.
36	7,09	3,75	17	46	Gama Exc.
40	7,05	2,51	9	45,4	Gama Exc.

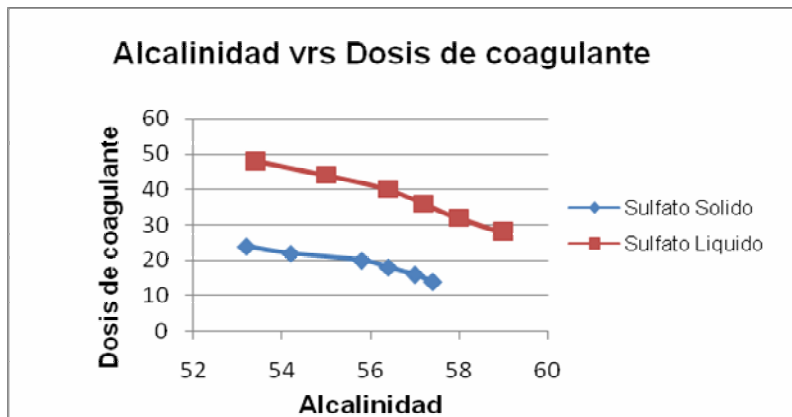
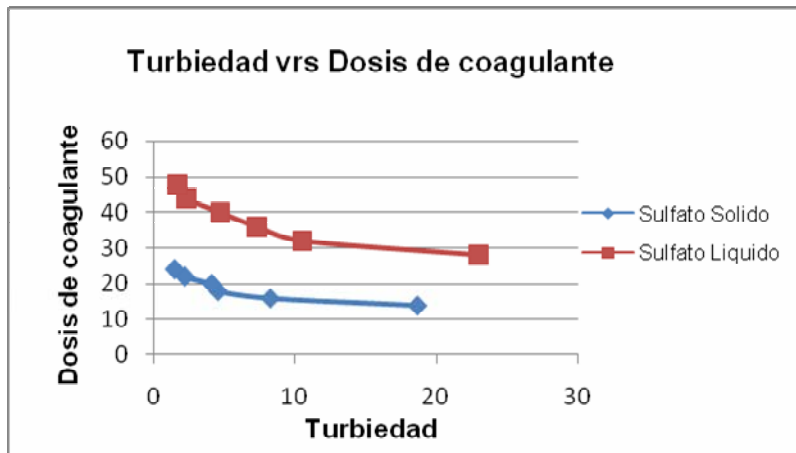
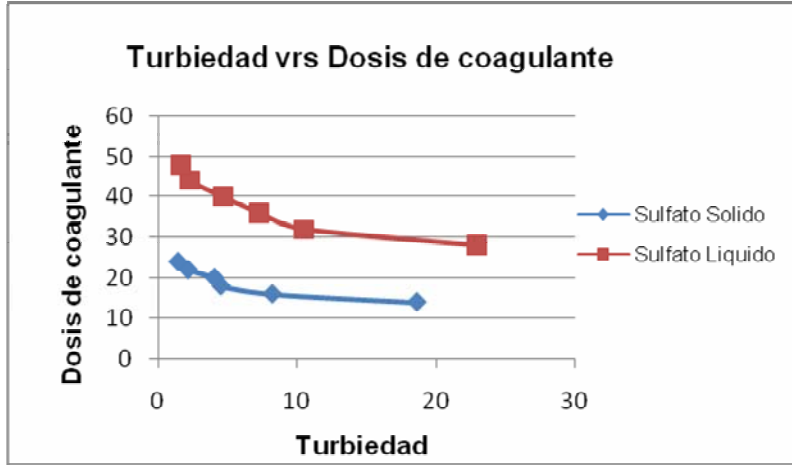
**GRAFICA 1. Febrero 15 de 2007**



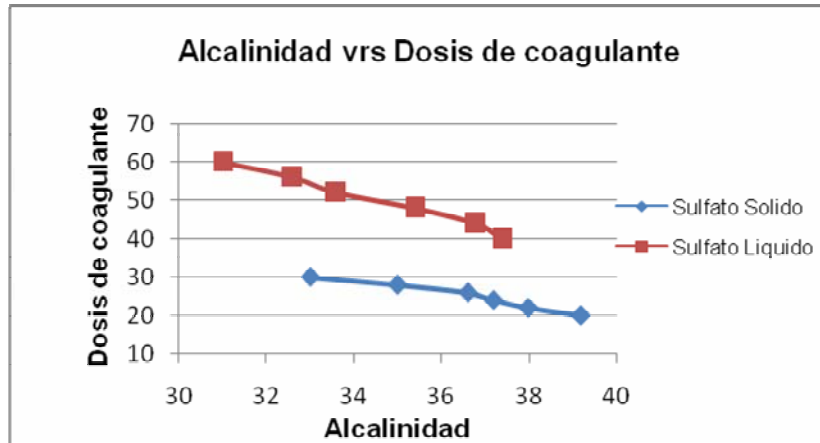
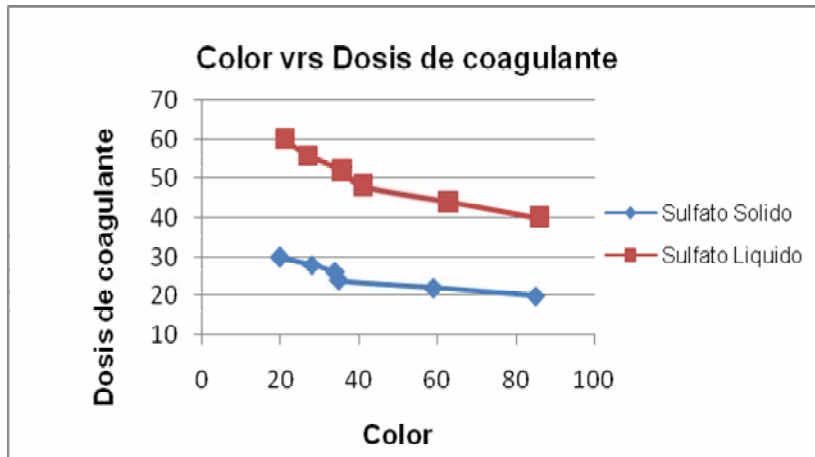
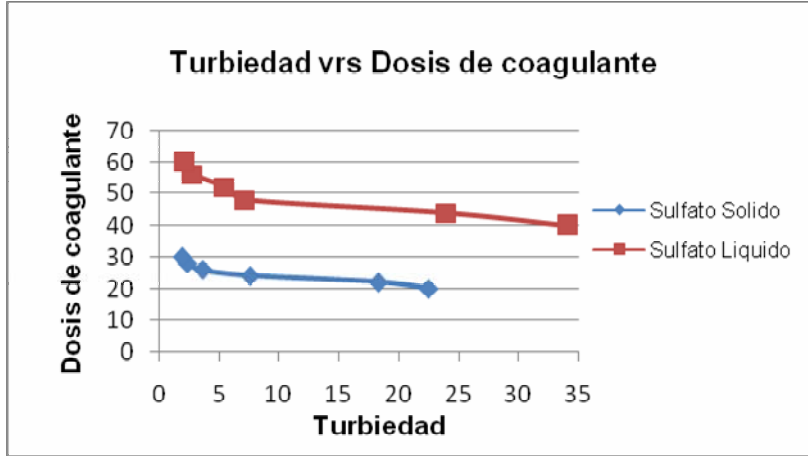
GRAFICA 2. Febrero 28 de 2007



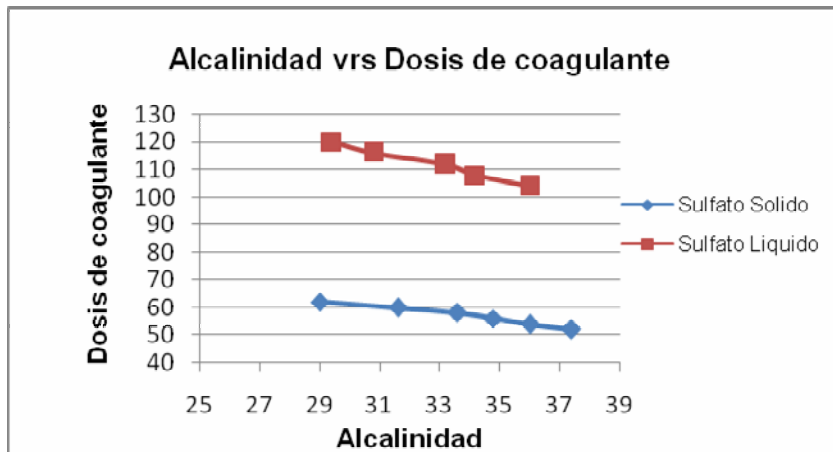
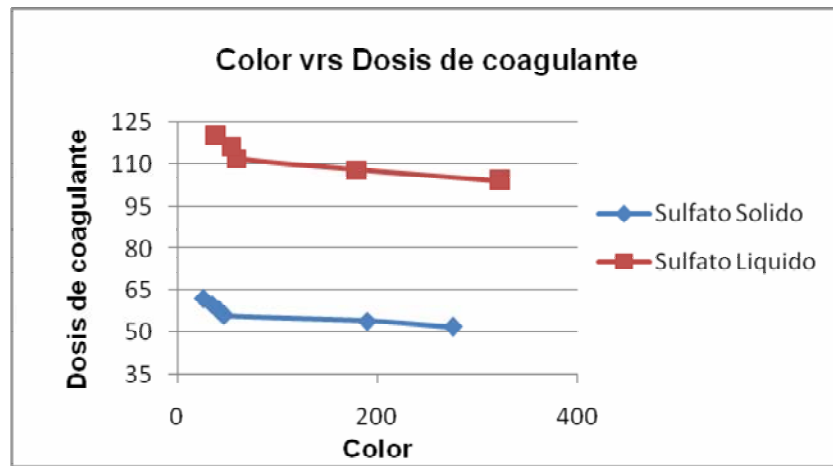
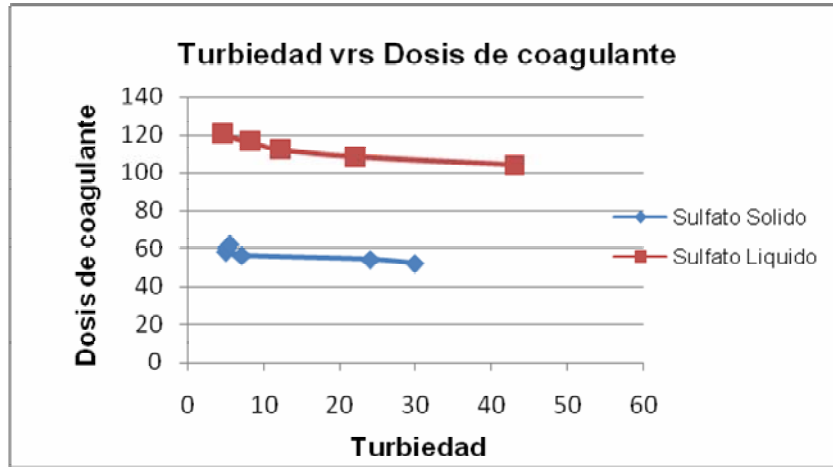
GRAFICA 3. Marzo 17 de 2007



GRAFICA 4. Abril 22 de 2007

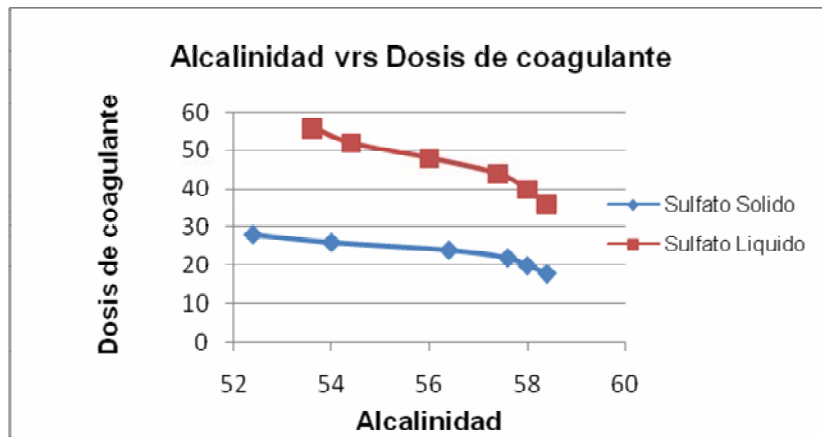
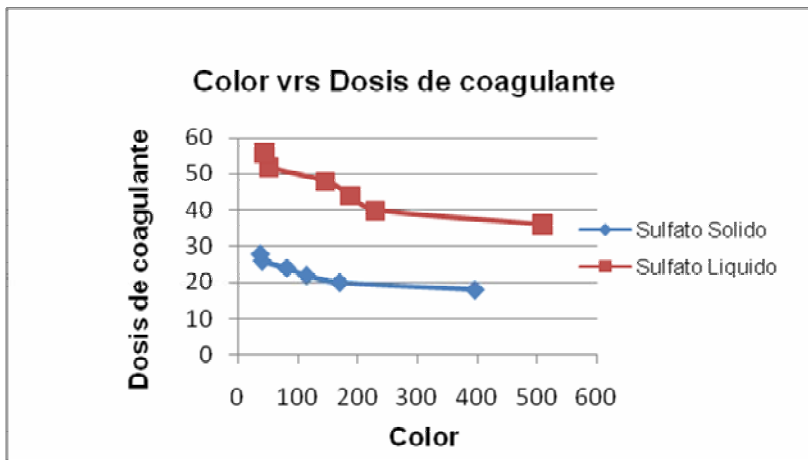
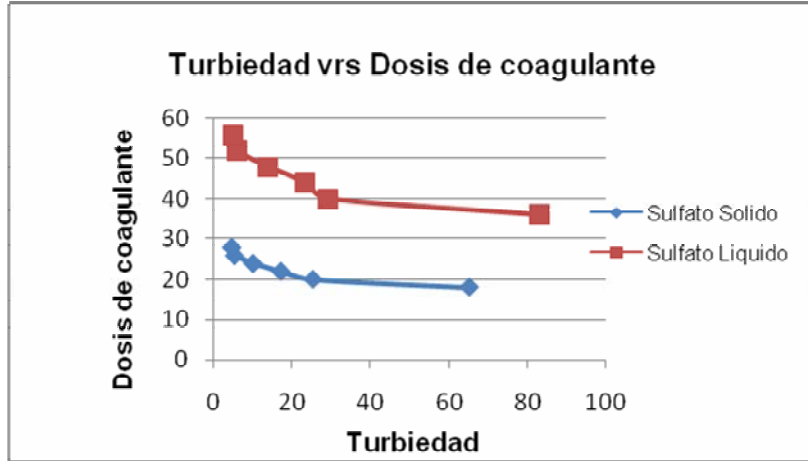


GRAFICA 5. Abril 25 de 2007

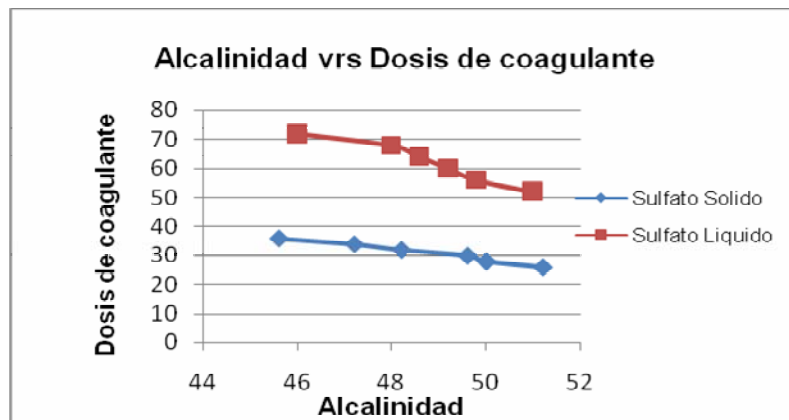
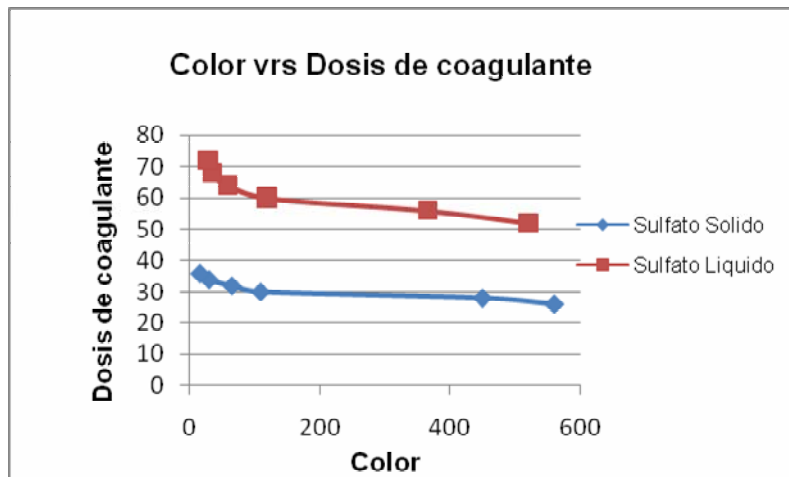
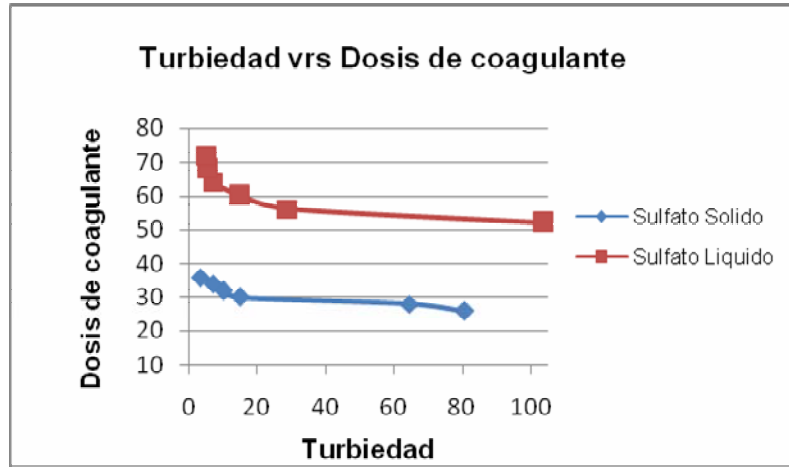




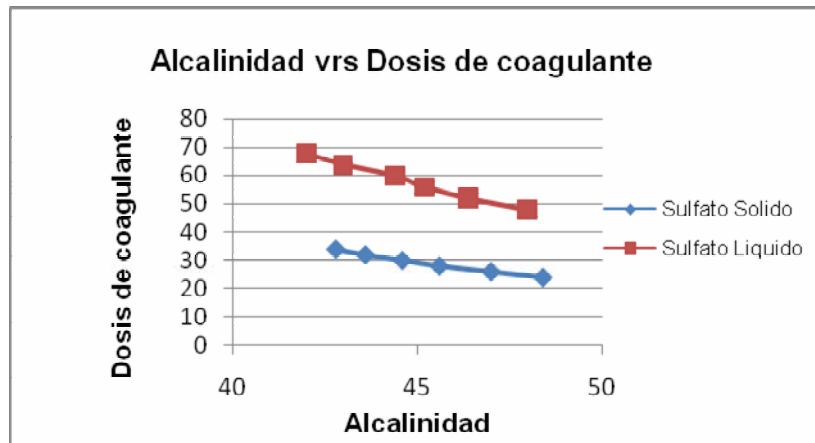
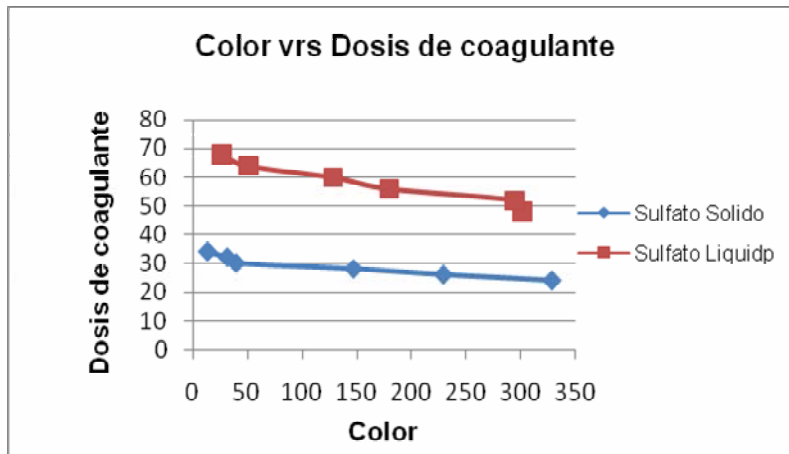
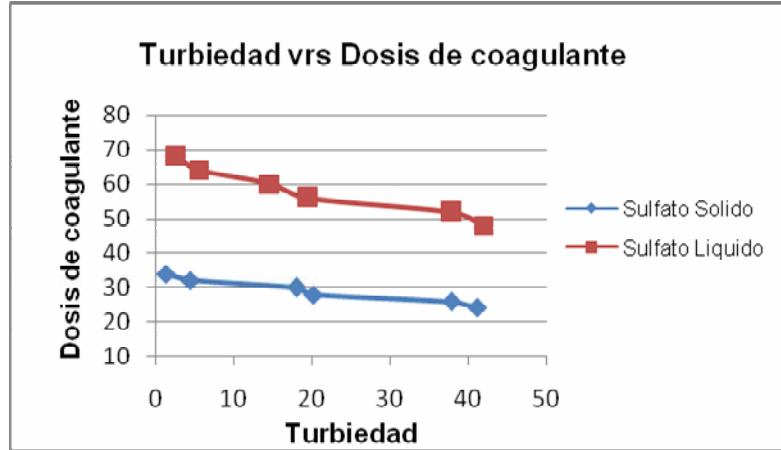
GRAFICA 6. Abril 27 de 2007



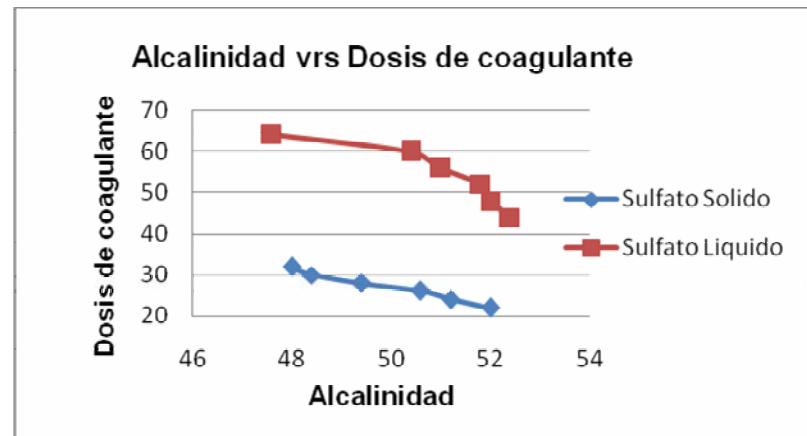
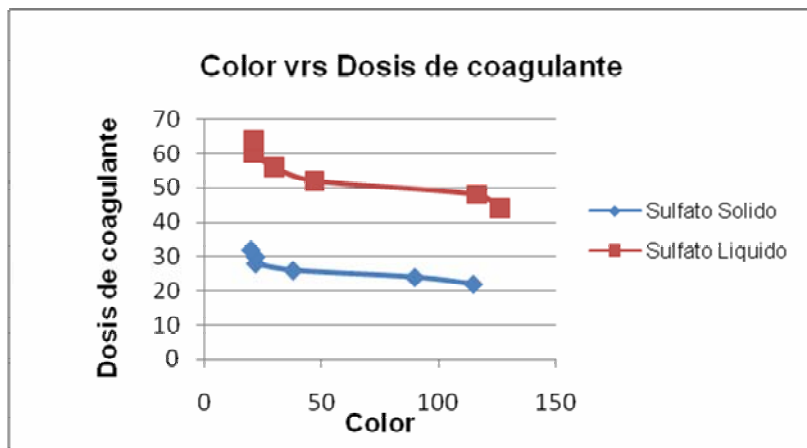
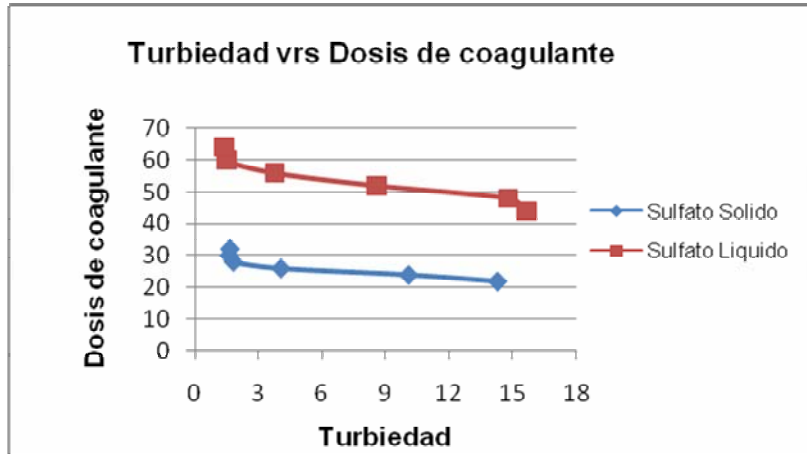
GRAFICA 7. Mayo 8 de 2007



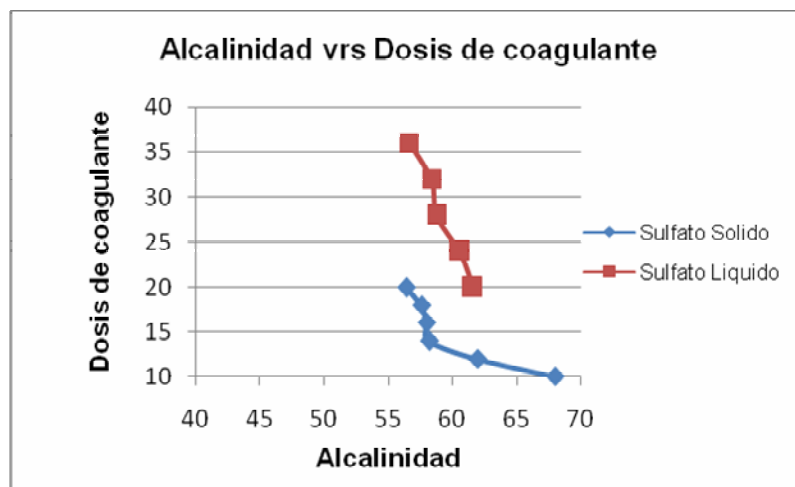
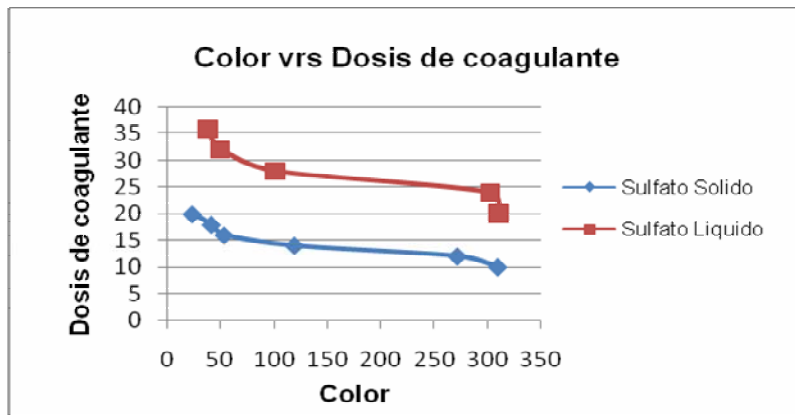
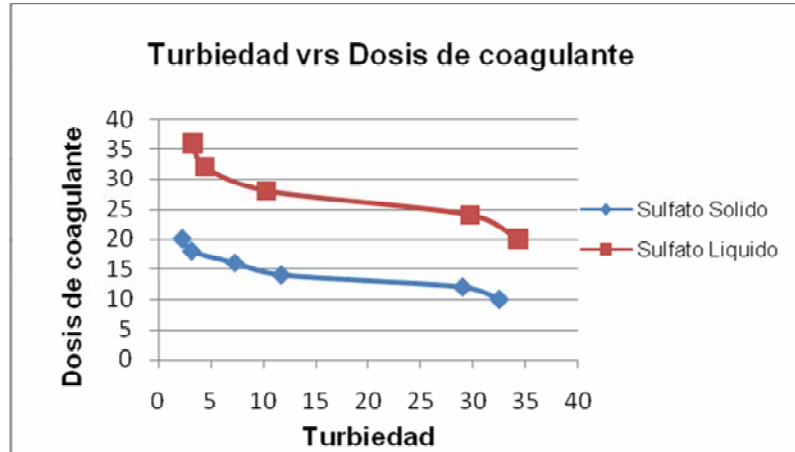
**GRAFICA 8. Mayo 9 de 2007**



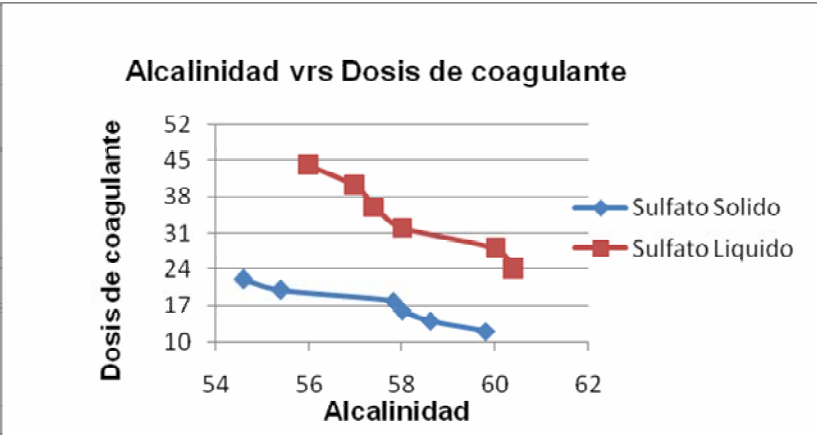
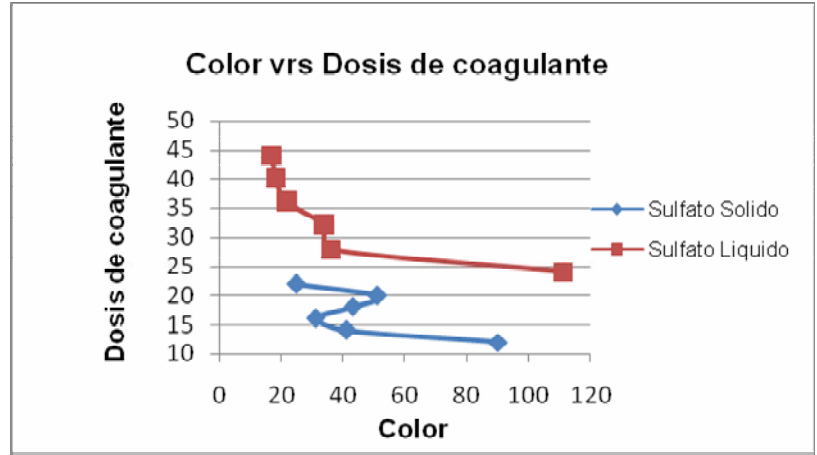
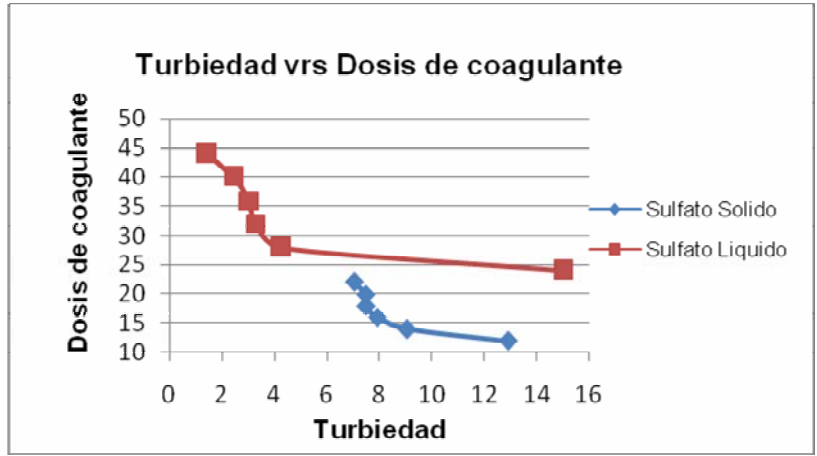
**GRAFICA 9. Mayo 10 de 2007**



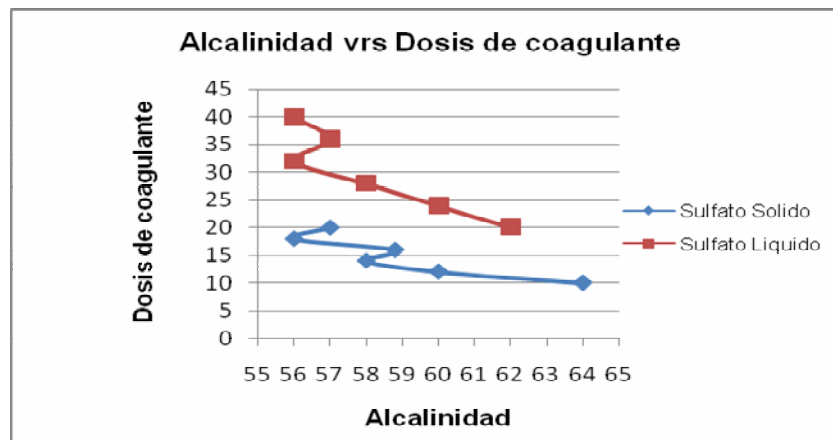
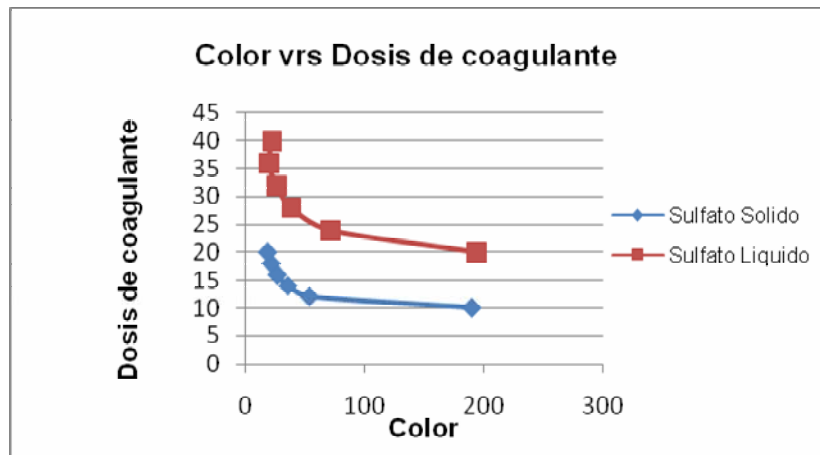
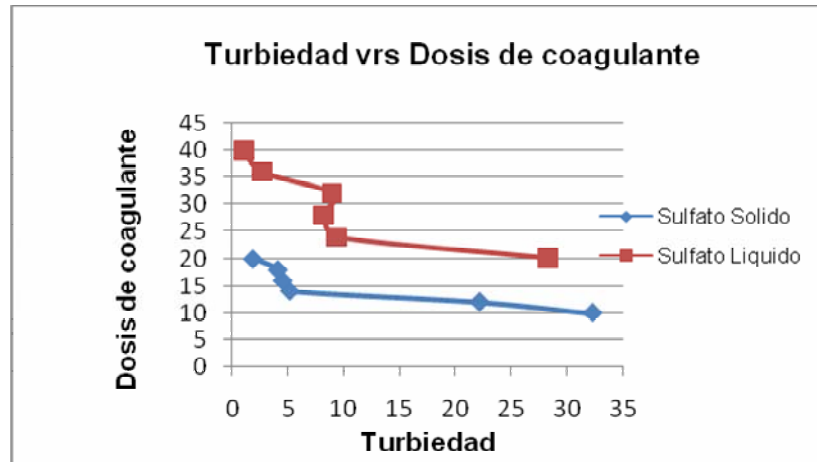
**GRAFICA 10. Mayo 15 de 2007**



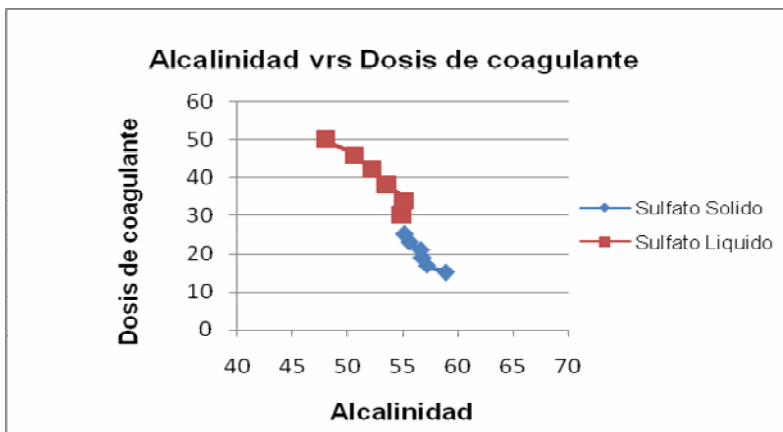
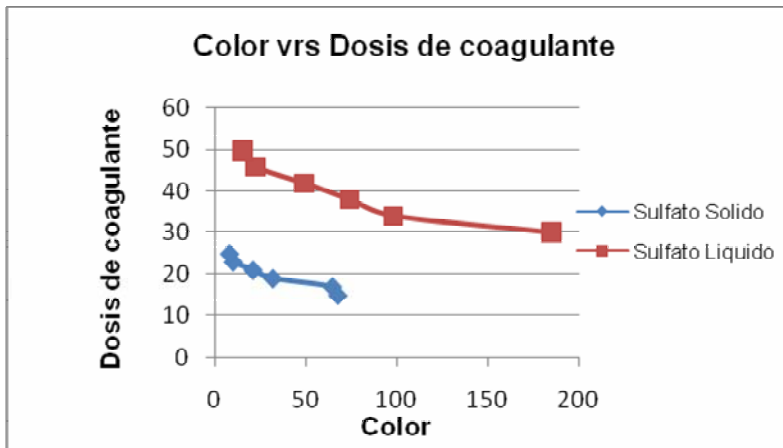
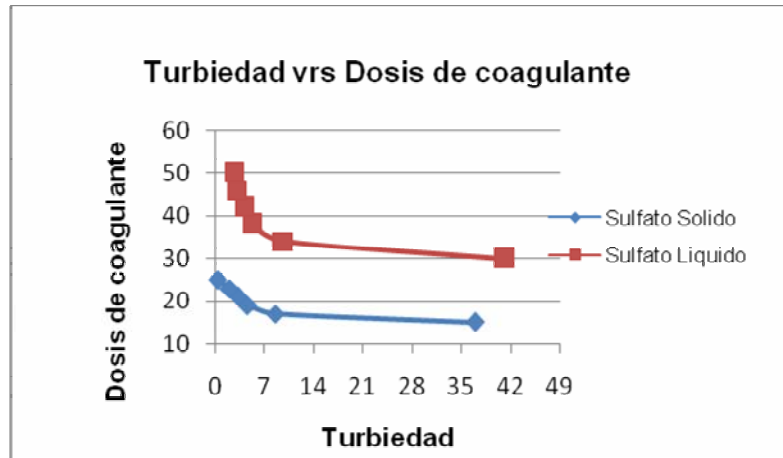
GRAFICA 11. Mayo 16 de 2007



GRAFICA 12 Mayo 17 de 2007

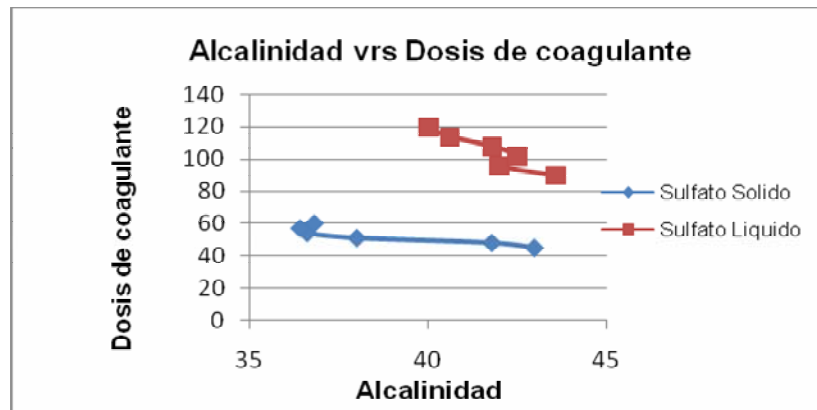
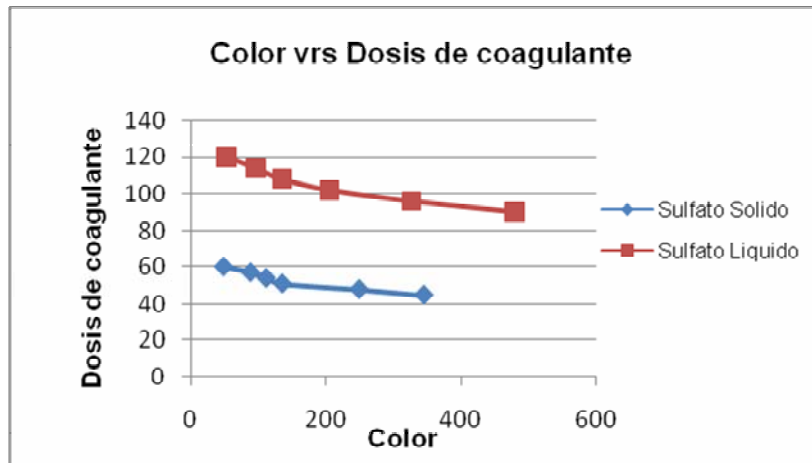
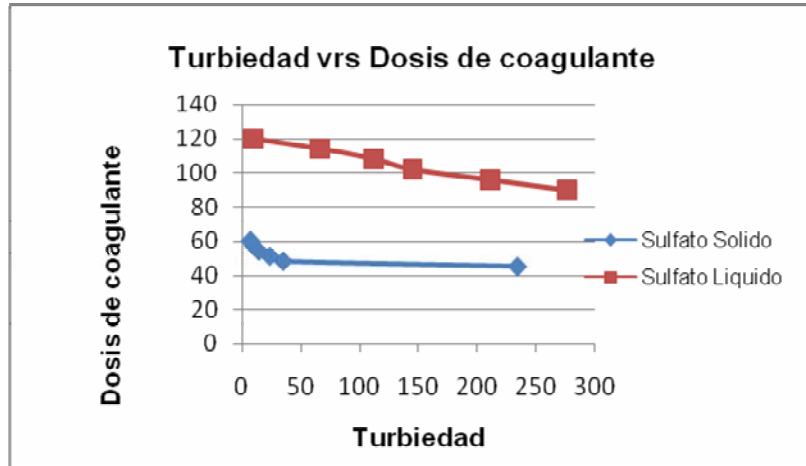


GRAFICA 13. Mayo 22 de 2007

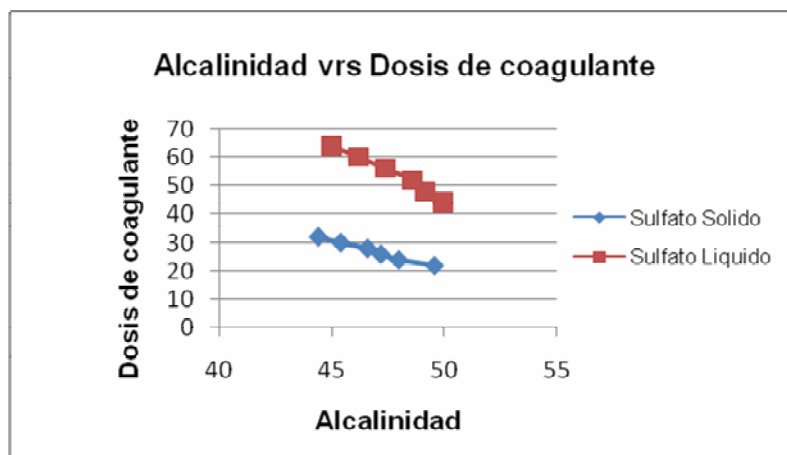
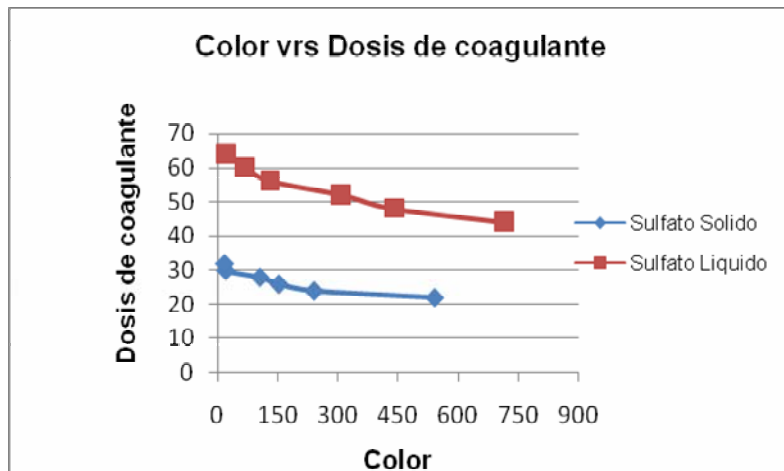
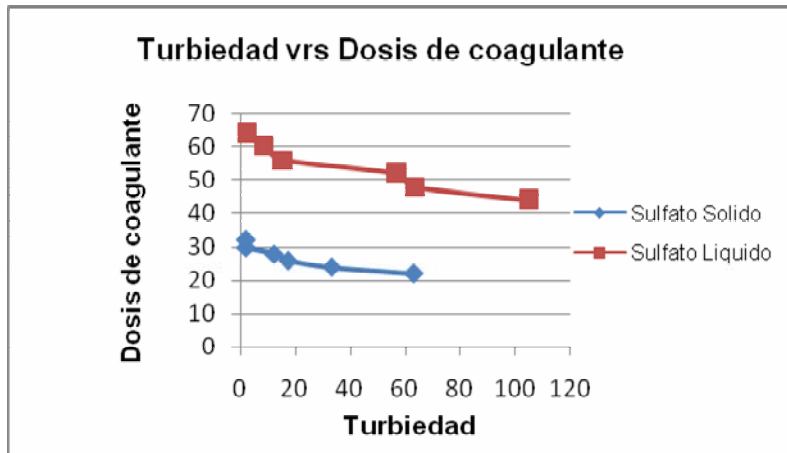




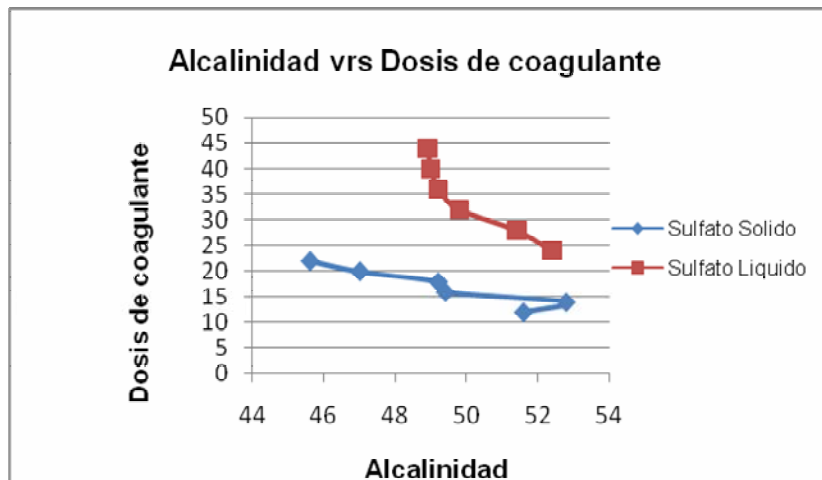
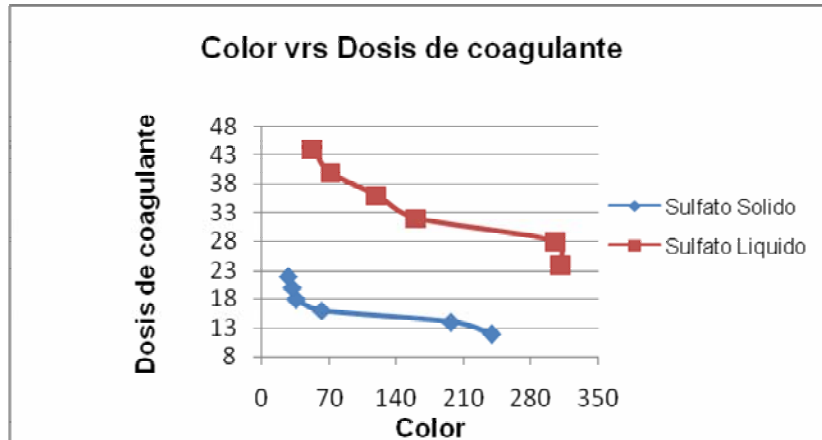
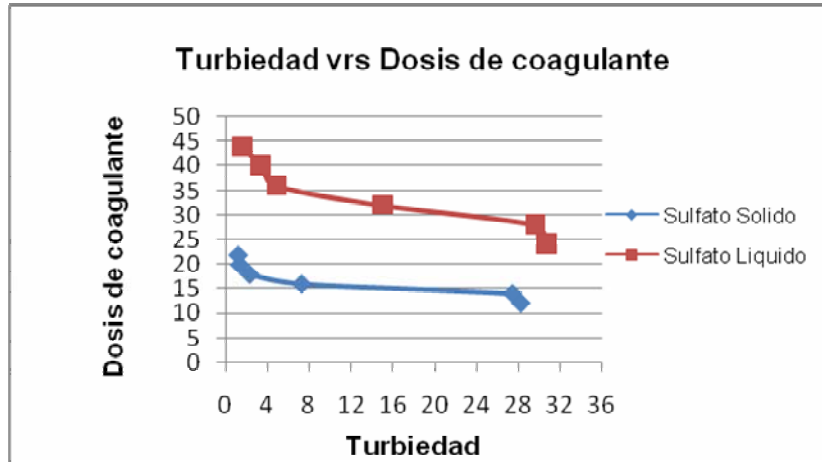
GRAFICA 14. Mayo 24 de 2007



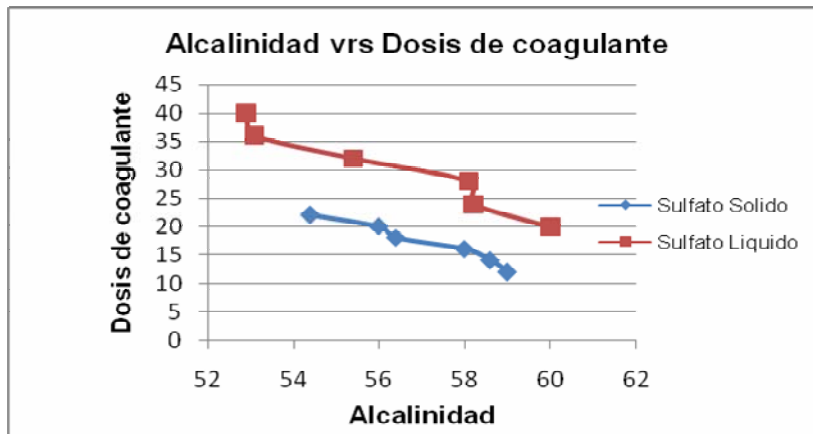
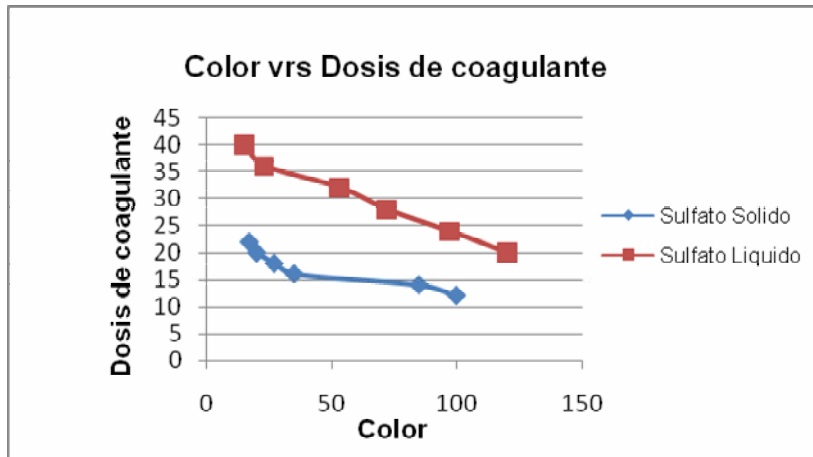
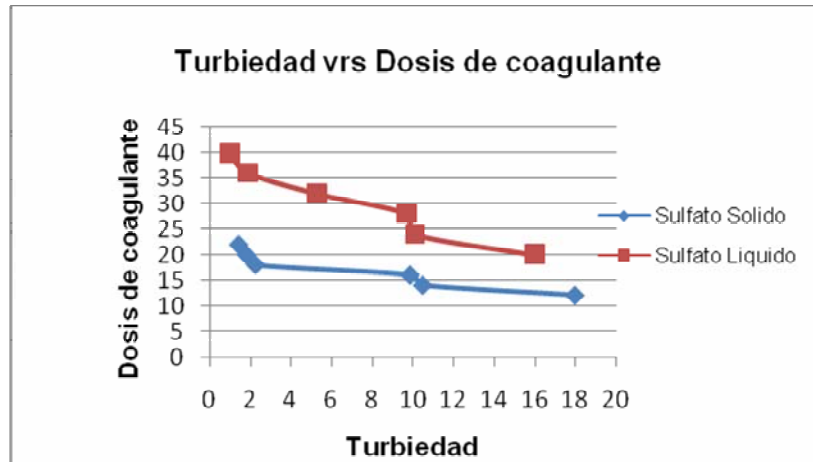
GRAFICA 15. Junio 4 de 2007



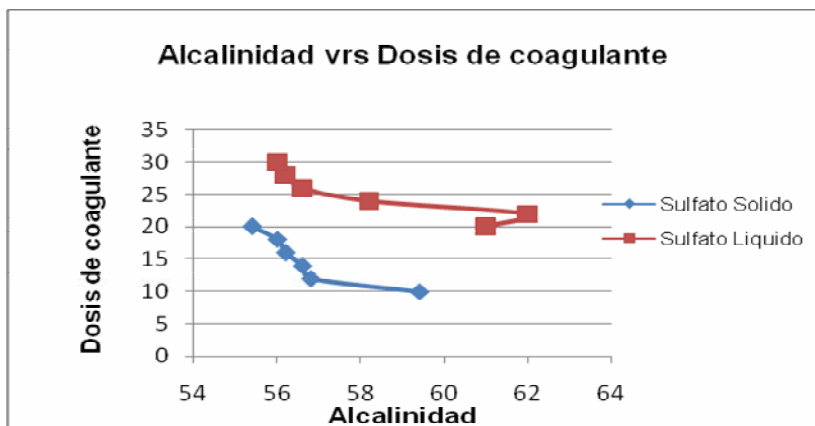
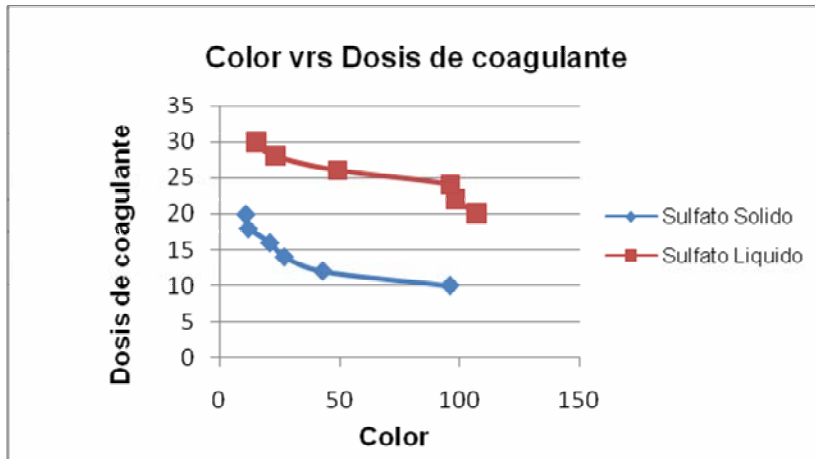
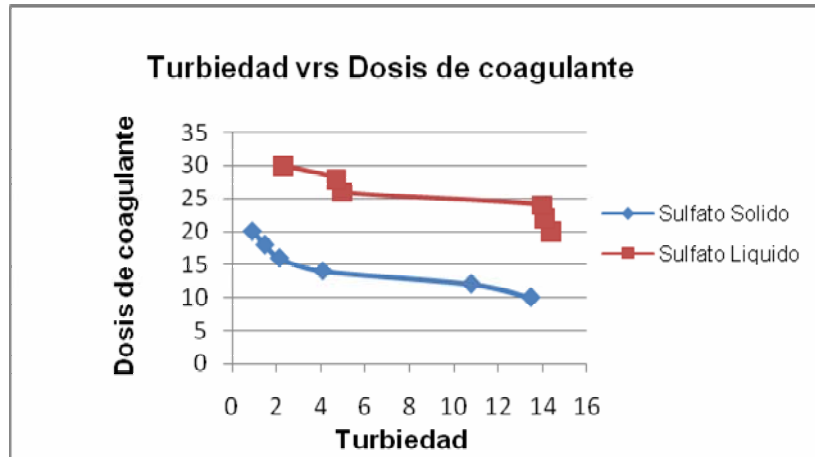
GRAFICA 16. Junio 5 de 2007



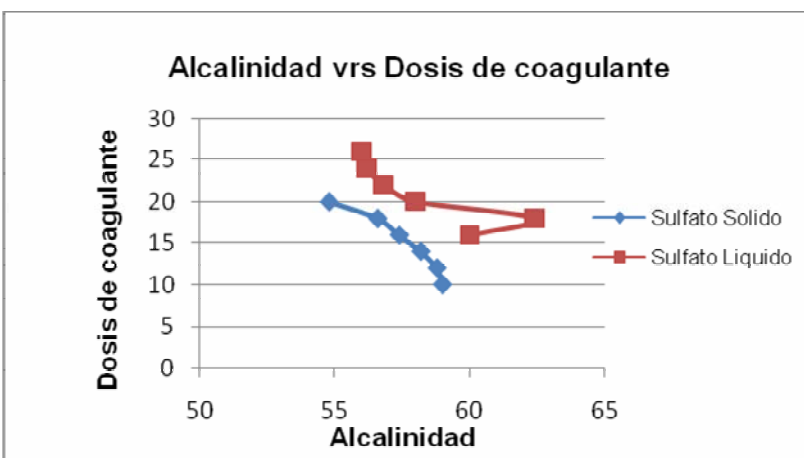
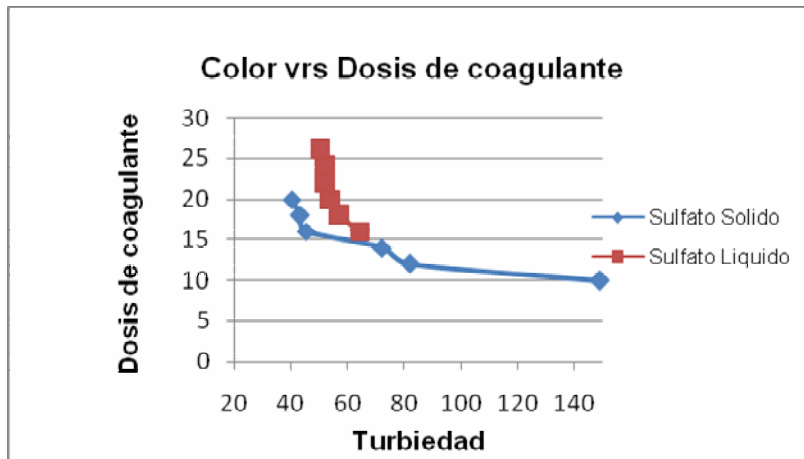
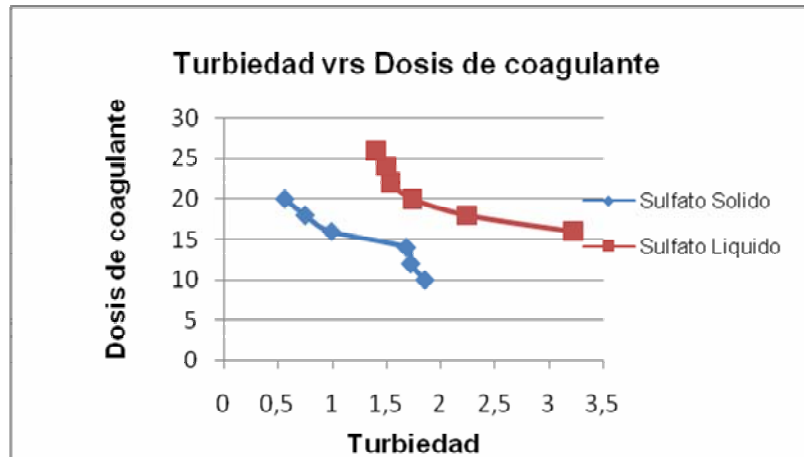
GRAFICA 17. Junio 12 de 2007



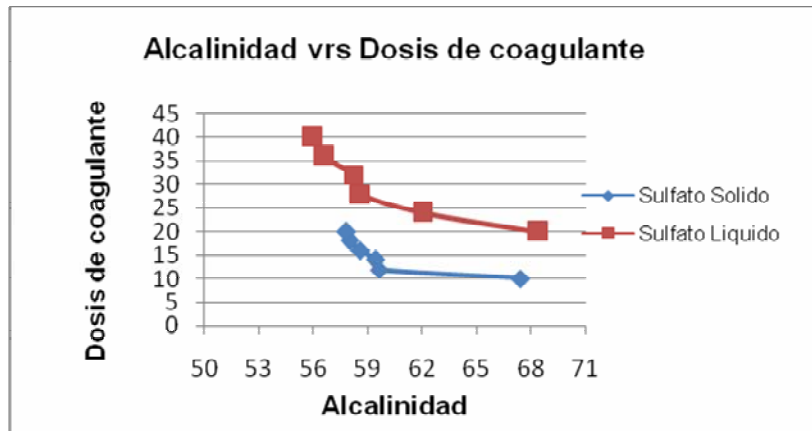
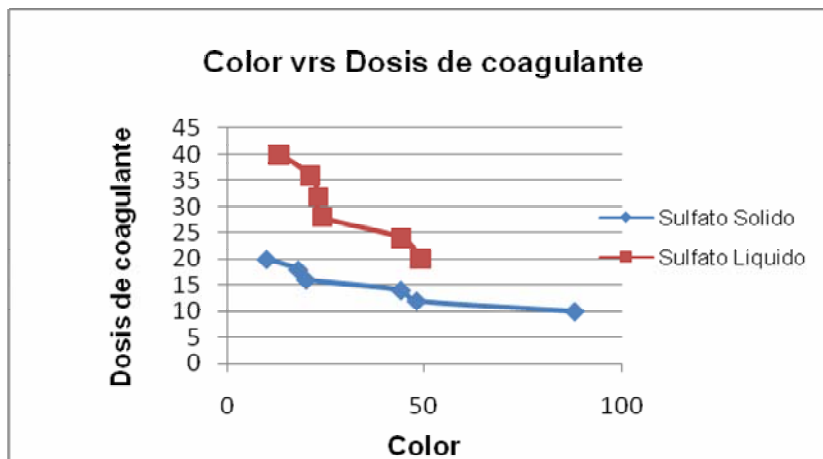
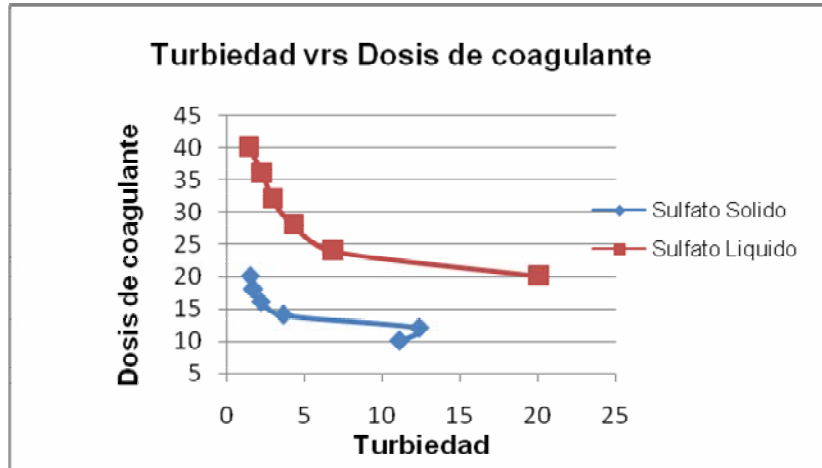
GRAFICA 18. Junio 13 de 2007



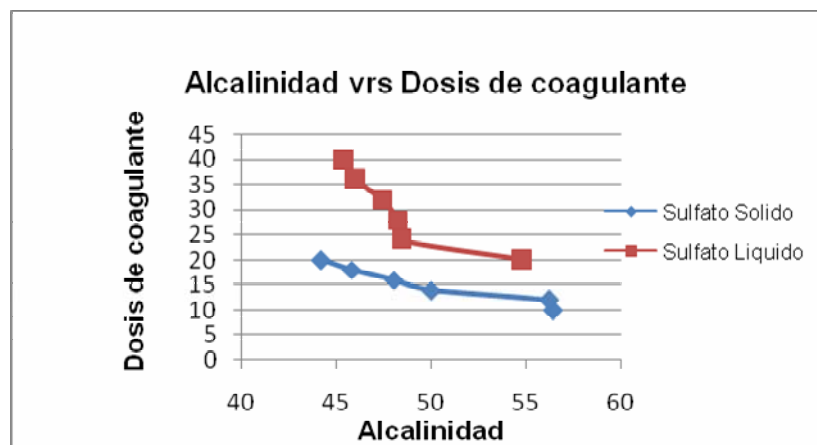
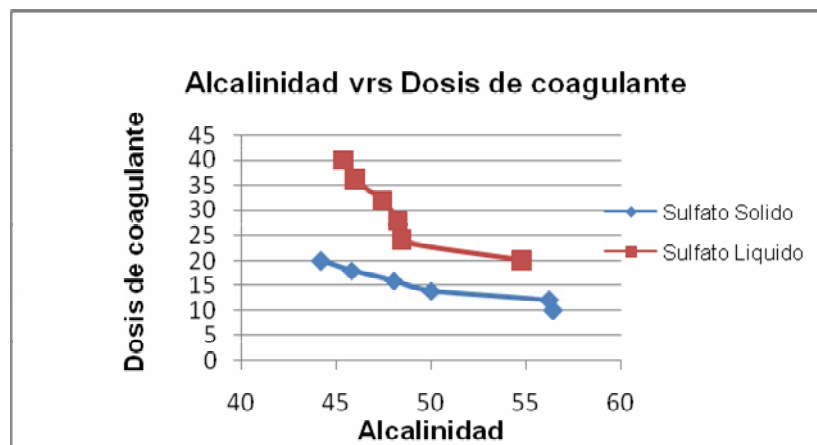
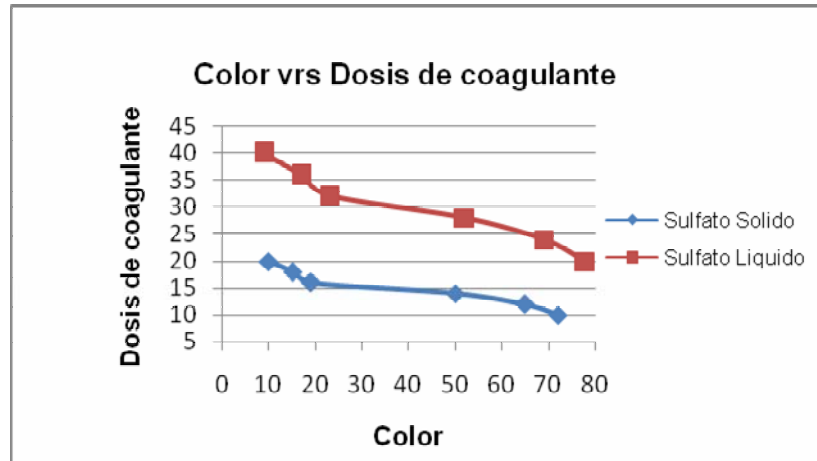
GRAFICA 19. Junio 14 de 2007



GRAFICA 20. Junio 19 de 2007



**GRAFICA 21. Julio 4 de 2007**





# **ANEXO C**

## SEGUIMIENTO AL STREAMING CURRENT DETECTOR

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Manual)</b>						
<b>Sulfato liquido Mayo 2 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
930	376	8	232	96	+26	12,00%
750	300	8	156	78	+116	12,00%
750	114	7,83	103	68	+98	12,00%
828	100	7,8	117	60	+84	12,00%
820	86	7,96	94	58	+56	12,00%
750	82	7,9	67	50	+45	12,00%
750	51	8,1	49	46	+39	12,00%

### Observaciones:

Se adiciono polímero, con el fin de flocular rápidamente, ya que el aumento de caudal provoco un movimiento de sedimentos.

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Automático)</b>						
<b>Sulfato liquido Mayo 3 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
800	156	8,13	127	60	+0	8,41%
780	140	8,19	156	80	+12	7,47%
780	140	8,2	140	80	+11	6,80%
740	130	8,23	140	60	+10	5,90%
720	120	8,25	130	54	+4	4,92%
720	75	8,16	80	48	+50	38,00%
700	60	8,2	78	46	+11	35,55%

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Automático)</b> <b>Sulfato liquido Mayo 7 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
1050	30	8,24	24	32	+0	31,10%
1050	32	8,05	27	32	-2	33,45%
960	31	8	29	32	+4	32,96%
690	29	8,13	29	32	-2	22,28%
690	29	8,12	28	32	+3	21,00%
690	29	8,1	28	32	+4	20,98%
680	32	8,11	27	32	-1	21,20%

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Manual)</b> <b>Sulfato liquido Mayo 7 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
930	376	8	232	96	+26	12,00%
750	300	8	156	78	+116	12,00%
750	114	7,83	103	68	+98	12,00%
826	100	7,8	117	60	+84	12,00%
820	86	7,96	94	58	+56	12,00%
750	82	7,9	67	50	+45	12,00%
750	51	8,1	49	46	+39	12,00%

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Manual)</b> <b>Sulfato liquido Mayo 22 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
740	111	8,2	98	38	+203	44,00%
614	90	8,19	49	41	+217	44,00%

600	80	8	65	39	+215	44,00%
600	95	8,3	78	37	+220	44,00%
650	75	8,1	62	42	+219	44,00%
720	62	8	53	41	+200	44,00%
630	78	8,2	61	37	+201	44,00%

**Observaciones:** fue necesario predosificar con sulfato de Aluminio ya que se presento valores altos de Mercurio (según la norma a partir de 2µg/lt)

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Automático y Manual)</b>						
<b>Sulfato Liquido Mayo 23 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
M 740	54	8,07	31	30	-80	27,00%
1072	42	7,96	37	30	-24	53,85%
702	42	7,98	38	31	28	28,31%
705	53	7,99	42	32	0	30,40%
697	51	7,98	45	32	3	32,41%
700	64	8	52	36	2	31,20%
700	58	8,01	50	36	1	30,30%

**Observaciones:** Al iniciar el seguimiento del SCD, este se encontraba en modo manual ya que se estaba buscando el set point, de acuerdo a la prueba de jarra para luego ponerlo en modo automático.

<b>STREAMING CURRENT DETECTOR (Modo Automático y Manual)</b>						
<b>Sulfato Liquido Mayo 28 de 2007</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Turbiedad Rio</b>	<b>pH Rio</b>	<b>Turbiedad Cruda</b>	<b>Cantidad de Sulfato</b>	<b>Densidad de Carga</b>	<b>Dosis de salida</b>
820	92	8,6	77	53	+153	1.00%
M 770	52	8,1	48	48	+44	37.0%
M 679	51	8,09	40	44	+121	33%

M 700	51	8,08	40	39	+62	22%
M 630	49	8,06	39	38	+18	22.0%
M 620	51	8,04	35	38	+24	22.0%
M 610	53	8,02	38	41	+27	22.0%

**Observaciones:** Desde el caudal 770 L/s se cambio a modo manual ya que al realizar la prueba de jarra esta presento exceso de coagulante.