



Universidad Técnica de Ambato
Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos
Carrera de Ingeniería Bioquímica



Tema:

Aprovechamiento del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua.

Trabajo de Titulación, modalidad de modalidad de experiencias prácticas de investigación y/o intervención, previo a la obtención del Título de Ingeniero Bioquímico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos

Autor: Díaz Muñoz David Alejandro

Tutor: Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suarez

Ambato - Ecuador

Julio-2017

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suárez

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 23 de Mayo del 2017.



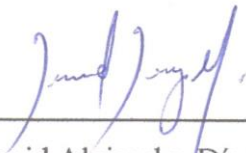
Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suárez

C.I. 1802874250-8

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, David Alejandro Díaz Muñoz, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de ingeniero Bioquímico son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas y datos proporcionados por los registros de la empresa EP-EMAPA-A.



David Alejandro Díaz Muñoz


C.I. 18524344-9

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación modalidad de Experiencias Prácticas de Investigación y/o Intervención, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Presidente de Tribunal



Ing. Mg. Pablo Israel Amancha Proaño
C.I. 180334186-4



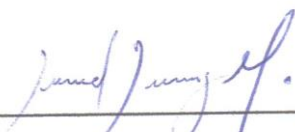
Dr. Rodny David Peñafiel Ayala
C.I. 1712283520

Ambato, 21 de Junio del 2017

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto de Investigación o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de nuestro Proyecto, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto dentro de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



David Alejandro Díaz Muñoz

C.I. 180524344-9

AUTOR

DEDICATORIA

A mi familia que siempre estuvo ahí, me apoyo incondicionalmente y me alentó a seguir mis sueños.

A los pilares de mi vida o más bien a las Pilares de mi vida, mi madre Pilar Muñoz y mi hermana Pilar Díaz.

AGRADECIMIENTO

No podría agradecer a todas las personas que contribuyeron conmigo para la realización de mi trabajo de graduación.

Por eso me limitare a agradecer a esa fuerza superior, ya sea Dios, casualidad o destino por: darme una familia hermosa donde jamás me faltó un plato de comida, una bendición, un consejo o una palabra de aliento.

Por poner en mi camino amigos que más allá de brindarme su afecto y ser cómplices de aventuras me conocen y confían en mí.

Por brindarme todo el conocimiento que ahora tengo a través de esas personas que vieron en mí un buen aprendiz, me regalaron su paciencia y sabiduría sin esperar nada a cambio.

A todas esas personas les doy mi más sincero agradecimiento espero que al leer estas palabras todos se identifiquen y sepan que todas las experiencias que viví junto a ustedes las llevo en lo más profundo de mi corazón.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	IV
DERECHOS DE AUTOR.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
CAPITULO I	
EL PROBLEMA.....	1
1.1.- Tema.....	1
1.2.- Justificación	1
1.3.- Objetivos	2
1.3.1.- Objetivo General.....	2
1.3.2.- Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	3
2.1.- Antecedentes Investigativos.....	3
2.1.1.- Características de los lodos.....	3
2.1.2.- Obtención del Sulfato de Aluminio.....	3
2.1.3.- Acidificación con Ácido Sulfúrico	4

2.1.4.- Coagulantes a base de Aluminio.....	5
2.1.5.- Hidrólisis de los coagulantes.....	6
2.1.6.- Clarificación Del Agua.....	7
2.1.7.- Determinación de la dosis óptima de coagulante	8
2.1.8.- Caracterización del agua	9
2.2.- Hipótesis	11
2.3.- Señalamiento de Variables de la Hipótesis	11
 CAPÍTULO III	
Material y Métodos	12
3.1.- Materiales.....	12
3.1.1.- Equipos.....	12
3.1.2.- Reactivos.....	12
3.2.- Métodos.....	13
3.2.1.- Metodología.....	13
3.2.2.- Recolección y almacenamiento de muestras	14
3.2.3.- Caracterización de los lodos	14
3.2.4.- Obtención de Sulfato de Aluminio.....	18
3.2.5.- Caracterización del agua cruda	21
3.2.6.- Dosificación del sulfato de aluminio obtenido.....	22
3.3.- Diseño Experimental	22
3.3.1.- Análisis Estadístico.....	23
 CAPÍTULO IV	
Resultados y Discusión.....	24
4.1.- Análisis y discusión de resultados.....	24
4.1.1.- Evaluación del lodo como materia prima.....	24
4.1.2.- Determinación de la eficiencia del proceso de acidificación.....	26
4.1.3.- Análisis del Sulfato de Aluminio extraído.	28
4.1.4.- Balance de materia del proceso.	30
4.1.5.- Eficiencia del Coagulante recuperado	32
4.1.6.- Caracterización del agua que trata la planta “Casigana”	33
4.1.7.- Ensayos de clarificación del agua.....	36
4.1.8.- Estimación de costos de producción.....	38
4.2.- Verificación de Hipótesis	39

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones.....	40
5.1.- Conclusiones.....	40
5.2.- Recomendaciones.....	41
MATERIAL DE REFERENCIA	42
ANEXOS	47

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tablas

Tabla 1. Comparación básica de las características del tratamiento del agua con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio PAC's	6
Tabla 2. Métodos utilizados para la caracterización del agua cruda.....	21
Tabla 3 Caracterización de los lodos de la planta "Casigana.....	25
Tabla 4. Eficacia del proceso de acidificación.....	26
Tabla 5 Caracterización del sulfato de aluminio obtenido.....	29
Tabla 6. Caracterización del agua que trata la planta "Casigana.....	34
Tabla 7 Costo de materiales e insumos para la producción de sulfato de aluminio a partir de 1000 L de lodo.....	38
Tabla 8 Datos del proceso de acidificación de los lodos	49
Tabla 9 Análisis de Varianza para [Al] mg/L - Suma de Cuadrados Tipo III	49
Tabla 10 Turbiedad residual de las muestras de agua y caolín	51
Tabla 11 Caracterización del agua que trata la planta durante el periodo de investigación.	52
Tabla 12 Turbiedad residual del agua tratada.	53
Tabla 13 Color residual del agua tratada.....	54
Tabla 14 Porcentaje de remoción de la turbiedad.	55
Tabla 15 Análisis de varianza entre las concentraciones 30 y 40 ppm de sulfato de aluminio aplicadas al agua cruda de la planta "Casigana"	56

Figuras

Figura 1 Flujograma de Procesos	13
Figura 2 Pruebas de múltiple rango para [Al] mg L ⁻¹ por pH.....	27
Figura 3 Pruebas de múltiple rango para [Al] mg L ⁻¹ por tiempo de reacción (min)	27
Figura 4 Balance de materia del proceso de producción de sulfato de aluminio a partir del lodo.	31
Figura 5 Eficiencia del sulfato de aluminio para la remoción de la turbiedad en el agua ligeramente turbia (50 NTU), medianamente turbia (100NTU) y altamente turbia (200 NTU) de acuerdo con la dosis de coagulante aplicado en ppm.....	33
Figura 6 Turbiedad residual del agua de la planta “Casigana” tras la aplicación del sulfato de aluminio reciclado.	37
Figura 7 Color aparente residual del agua de la planta “Casigana” tras la aplicación del sulfato de aluminio reciclado.	37
Figura 8 Diagrama de flujo de la planta “Casigana”.....	47
Figura 9 Recolección de muestras.....	47
Figura 10 .Proceso de acidificación de lodo	48
Figura 11. Proceso para la determinación de la eficiencia del coagulante.....	48

RESUMEN

En esta investigación se aprovechó el lodo residual producto de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación de la planta de potabilización de agua “Casigana” de la Empresa Pública Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A) para la obtención de sulfato de aluminio como coagulante para la clarificación de agua.

Mediante el método de acidificación con ácido sulfúrico se extrajo sulfato de aluminio tipo B con características fisicoquímicas adecuadas para la clarificación de agua (remoción del color y turbidez). La obtención de sulfato de aluminio se realizó mediante una reacción del ácido sulfúrico con hidróxido de aluminio (presente en los lodos), evaluando los factores: pH y el tiempo de reacción bajo agitación. Se obtuvo como respuesta experimental la concentración de aluminio obtenido en el sobrenadante. Dichos factores fueron analizados mediante un diseño experimental de bloques totalmente al azar, obteniendo como resultado un pH de 1,5 durante 30 minutos de reacción, lo que permitió la recuperación del 72,2% del aluminio como sulfato de aluminio tipo B, asegurando su efectividad como coagulante según las normas NTE 1903 y NTC: 531 para Sulfato de Aluminio norma vigente nacional y norma colombiana referida en la ecuatoriana.

La eficiencia y dosis del coagulante fue evaluada mediante ensayos de jarras, evaluando color y la turbidez residual para el cumplimiento de la norma NTE 108:2011

Palabras Clave: Sulfato de aluminio, lodos residuales, Planta de potabilización, clarificación de agua, EP-EMAPA-A.

ABSTRACT

In this research the sludge's from purification plant "Casigana" from "Empresa Pública Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A)" product of its processes was used for obtaining aluminum sulphate as coagulant.

The acidification method with sulfuric acid extracted aluminum sulphate type b with physicochemical characteristics suitable for its clarification of water (color removal and turbidity). The aluminum sulphate was obtained by a reaction of the sulfuric acid with aluminum hydroxide (compound present in the sludge) in which the following factors were evaluated; pH of the reaction is carried and the reaction time under agitation, the experimental response was the concentration of aluminum in $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ obtained in the supernatant. These factors were analyzed by an experimental design of blocks totally random. Resulting in a pH of 1.5 for 30 minutes of reaction; Allowed a recovery of 72.2% of aluminum as aluminum sulfate type b, ensuring its effectiveness as a coagulant according to standards "NTE 1903 and NTC: 531 para productos químicos. Sulfato de Aluminio" national norm and Colombian norm referenced in Ecuador.

The efficacy and dose of the coagulant was evaluated in a jar tests, collecting water samples from the effluent treated by the "Casigana" treatment plant, evaluating the color and residual turbidity to comply with the NTE 108: 2011 standard.

Keywords: Aluminum sulphate, waste sludge, Water purification plant, water clarification, EP-EMAPA-A.

INTRODUCCIÓN

La Empresa Pública Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A) brinda el servicio de agua potable y alcantarillado a la ciudad de Ambato; la cual tiene diversas plantas de tratamiento entre las cuales se encuentra la planta Casigana, donde el agua es tratada y sometida a procesos de clarificación (mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración) y posteriormente desinfección por cloración; producto de los procesos de clarificación se obtienen lodos con alta concentración de aluminio debido a la adición del coagulante policloruro de aluminio lo que no permite su rápida deshidratación.

Los lodos aluminosos son aproximadamente el 0,3 al 1% del agua tratada en las plantas y son eliminados al alcantarillado sin ningún tratamiento, ocasionando daños al medio ambiente (**Berón, 1997**).

El método de extracción patentado de sulfato de aluminio a partir de lodos aluminosos por acidificación con ácido sulfúrico descrito por Jewell (1903) es ampliamente usado para la reducción del volumen de lodos y obtención de sulfato de aluminio como coagulante ya que mejora la deshidratación del lodo liberando el agua que queda atrapado en este.

El sulfato de aluminio que se recicla de los lodos tiene contaminantes iguales a los coagulantes comerciales obtenidos a partir de bauxita o arcillas, sin embargo, estos coagulantes están diluidos 15 veces mas que los comerciales (**Westerhoff, 1973**).

Los parámetros químicos que deben ser evaluados en el sulfato de aluminio tipo B son: alúmina soluble total expresado en % (m/m) de Al_2O_3 , hierro soluble total expresado en % (m/m) de Fe_2O_3 , materias insolubles en agua en % (m/m) y la basicidad expresada como Al_2O_3 (**INEN, 1992a**).

Los procesos de coagulación, floculación y sedimentación se ven afectados por características propias del agua como son la temperatura, turbidez, color, pH y

alcalinidad (Romero, 2002), razón por la cual la dosis de sulfato de aluminio o de cualquier coagulante puede variar de acuerdo con estas.

La clarificación del agua es la remoción de turbiedad y color del agua lo que implica el uso de coagulantes polielectrolíticos a base de metales como el aluminio o el hierro, que hacen que las partículas que aportan turbidez y color al agua se aglomeren formando flóculos que precipitan y dejan el agua clarificada (**Romero, 2002**). Los límites máximos permisibles para dichos parámetros están estipulados dentro de la Norma Técnica Nacional y en conformidad a estos el agua es considerada clara o turbia (**INEN, 2014**).

La eficacia del sulfato de aluminio en el agua se evalúa mediante suspensiones coloidales donde se aplican dosis del coagulante y se someten a un ensayo de jarras. Dichas suspensiones varían su turbidez mediante la aplicación de agentes que enturbian el agua, por ejemplo el caolín que en solución con el agua forma muestras de diferentes turbiedades. Una vez concluidos los ensayos de jarras se toma muestras de los diferentes tratamientos y se determina la turbiedad residual (**Pavón, Pacheco, & Cárdenas, 2004**).

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1.- Tema

Aprovechamiento del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua.

1.2.- Justificación

El aprovechamiento de residuos y la producción más limpia de recursos son estrategias que se aplican a los procesos, productos y servicios para el aumento de su eficiencia, reducción de costos y reducción del impacto ambiental.

La planta de tratamiento de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A genera un total de 196 mL de lodos residuales por litro de agua tratada, provenientes del proceso de coagulación - floculación, sedimentación y el retro lavado de los filtros, los mismos que son enviados a los causes del río Ambato, afectando negativamente al medioambiente (**Ruíz, 2011**).

En el estudio de recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados por acidificación con ácido sulfúrico en la planta de potabilización de la empresa aguas de Cartagena S.A. E.S.P mencionan que “el valor más alto de recuperación fue de 71.5% después de 30 min de reacción al completarse la disolución de aluminio con una concentración de $1038.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ” (**Nuñez & Peña, 2011**).

Por lo cual el presente estudio permitió aportar información a la empresa EP-EMAPA-A acerca del aprovechamiento de los lodos generados producto de sus procesos de clarificación, para la obtención de sulfato de aluminio y su efectividad en el tratamiento de sus aguas.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo General

Determinar la eficacia del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua.

1.3.2.- Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros físico-químicos de los lodos generados en la planta de potabilización, de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA-AWWA-WPCF).
- Especificar el porcentaje de sulfato de aluminio recuperado por acidificación con ácido sulfúrico bajo condiciones óptimas para determinar la eficacia de este proceso.
- Analizar las características físico-químicas del agua cruda del efluente de la planta de potabilización, para determinar las concentraciones de coagulante a probar en ensayo de jarras.
- Establecer la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio) para la remoción de turbidez y color del agua cruda para el cumplimiento de los requisitos de la norma técnica ecuatoriana INEN 1 108:2011 de agua potable.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- Antecedentes Investigativos

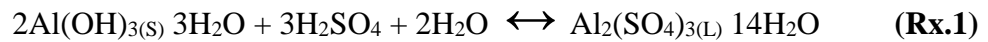
2.1.1.- Características de los lodos

Dependiendo de la planta potabilizadora, la calidad de agua del efluente, del tratamiento recibido, del coagulante utilizado y de la época del año, los lodos de alúmina tienen características distintas. De acuerdo con **Sandoval, Martín, Piña, & Montellano (2009)** a pesar de todas estas variables los lodos presentan características similares como: fluidos no Newtonianos, voluminosos y de aspecto gelatinoso, que están compuestos por más de un 90% agua, hidróxidos de aluminio, partículas de arcilla o arena, coloides, plancton y materia orgánica, mismos aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de su tratamiento y su disposición final.

En Ambato, las plantas de tratamiento de agua generan gran cantidad de lodos provenientes del proceso de potabilización, más específicamente de los procesos primarios de sedimentación. El volumen de estos lodos representa una gran fuente de sólidos y reactivos adicionados como el policloruro de aluminio que al ser una sal de aluminio y sedimentar como hidróxido de aluminio en los lodos afecta a la absorción de calcio y magnesio por el suelo al ser desechado (**Bernier & Alfaro, 2006**).

2.1.2.- Obtención del Sulfato de Aluminio

Sandoval et al. (2009) citando el trabajo patentado de **Jewell (1903)** manifiesta que la recuperación de alumbre de lodos y su posterior uso para la clarificación de agua, consiste en la reacción de ácido sulfúrico con el hidróxido de aluminio presente en los lodos generados en las plantas de potabilización de agua. La recuperación bajo condiciones ácidas disuelve el hidróxido de aluminio eficientemente, así lo demuestra la reacción química 1:



La presencia de otros metales que se precipitan con los lodos como el hierro, también tienen capacidad coagulante por sus cargas positivas, sin superar las del aluminio; Por lo tanto producto de la reacción de acidificación se obtendrían sales de hierro y aluminio, provocando una acumulación de sales de hierro con el reciclado constante del aluminio, generando una reducción en su capacidad como clarificador de agua (**Bishop, Rolan, Bailey, & Cornwell, 1987**).

Martínez, Jiménez, & Vaca (2002) expresan que al extraer en forma secuencial el aluminio del lodo con un contenido de sólidos de 3.4%, da como resultado la extracción de un 77% del total del aluminio recuperado mediante la reacción con ácido sulfúrico, porcentaje que fue descendiendo después de cada lavado. En el segundo ciclo la recuperación fue de 15% y en la tercera solo del 1.5%, datos similares a los que reportan **SenGupta, Cumbal, & Shantanu (1997)** donde expresa que del porcentaje de recuperación de aluminio es de 85% luego de cinco ciclos de lavado, pero en el tercer ciclo se recupera menos del 1% lo que no resultaría atractivo económicamente.

Los coagulantes son usados exitosamente en procesos de clarificación de aguas debido a su desempeño en la remoción de materia orgánica, partículas en suspensión y mínima diferencia al aplicarlo en distintos tipos de efluentes (**Sinha, Yoon, Amy, & Yoon, 2004**). Sin embargo la efectividad de los coagulantes reciclados no ha sido estudiada a profundidad, incluso poca son las investigaciones del reciclaje del sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio (**Cogollo, 2003**).

2.1.3.- Acidificación con Ácido Sulfúrico

Debido al carácter anfótero del hidróxido de aluminio este puede reaccionar con ácidos y bases, por ejemplo con el ácido sulfúrico para solubilizar el metal (aluminio) de la sal iónica (**Chu, 1999**). La aplicación en condiciones alcalinas para solubilizar el aluminio del hidróxido de aluminio, evitando otras reacciones con otros

metales, el carbón orgánico disuelto en el sobrenadante aumenta haciendo muy difícil el uso del coagulante recuperado (**Westerhoff, 1973**).

La acidificación es el método más efectivo para la recuperación de sulfato de aluminio de lodos. Los requerimientos estequiométricos para el uso del ácido sulfúrico para la reacción con $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (hidróxido de aluminio) a Al^{+3} son de 1.5 moles de ácido sulfúrico por 1 mol de hidróxido de aluminio, lo que quiere decir 1.11 Kg de ácido de hidróxido de aluminio o 5,45 Kg. de ácido de aluminio (**Westerhoff, 1973**).

De acuerdo con el método de **Sandoval et al. (2009)** la muestra es acidificada con H_2SO_4 al 25% y se agita por un lapso de 30 minutos a pH 1,5 a una velocidad de 100 rpm, después de la aplicación del tratamiento la solución se separa en dos fases, el aluminio se disuelve junto con el ácido sulfúrico y se separa de los residuos sólidos por gravedad.

2.1.4.- Coagulantes a base de Aluminio

La coagulación es el fenómeno por el cual partículas presentes en el agua se agregan a una sustancia que las atrapa llamada coagulante. Estos coagulantes, tales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, son ampliamente utilizados para el tratamiento primario del agua, es decir para la coagulación, floculación y sedimentación de partículas coloidales presentes en esta, clarificándola reduciendo así la turbidez y color (**Romero, 2002**).

El policloruro de aluminio (hidroxicloruro de aluminio) es un coagulante polimerizado de sales metálicas. Este mejora muchos aspectos del proceso de coagulación como: menor influencia de la temperatura en la coagulación, cinética más rápida, menor formación de lodos y menor efecto del pH para la coagulación (**Cogollo, 2003**). Estas características fueron comparadas con las del sulfato de aluminio por **Zouboulis, Traskas, & Samaras (2008)** en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación básica de las características del tratamiento del agua con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio PAC's

Parámetro	Sulfato de Aluminio	PAC's
Temperatura	Afecta directamente la producción de los hidroxilos en la coagulación	Afecta en menor medida al contener formas pre polimerizadas en su estructura
pH	El hidroxilo de aluminio se produce de acuerdo al pH	Menor impacto en el pH por formas de aluminio pre polimerizadas
Especie de Aluminio	Son complejos monoméricos con carga catiónica de +1 a +3	Formas de aluminio monoméricas y poliméricas
Cinética	Lenta	Rápida

Nota: La tabla 1 muestra el efecto de los criterios mencionados en la primera columna con respecto al tratamiento de agua cruda con los coagulantes y como afectan en el proceso para la clarificación del agua (Zouboulis, Traskas, & Samaras, 2008).

2.1.5.- Hidrólisis de los coagulantes

Baes & Mesmer (1976) Las reacciones de hidrólisis de sales de aluminio en soluciones acuosas varían, por lo general la sal metálica en agua induce a la formación de una serie de especies solubles monoméricas, poliméricas y también precipitados como los siguientes:

Monómeros: Al^{3+} , $AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$ y $Al(OH)_4^-$
 Polímeros: $Al_2(OH)^{24+}$, $Al_3(OH)_4^{5+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ (Al_{13})
 Precipitado: $Al(OH)_{3(s)}$

2.1.6.- Clarificación Del Agua

La potabilización de agua consta de los siguientes tratamientos para su consumo: clarificación, desinfección y acondicionamiento químico y organoléptico. En el proceso de clarificación, la coagulación y floculación son subprocesos por los cuales la materia presente en el agua se aglutina y forma pequeñas partículas con un peso específico mayor al del agua. Dichas partículas sedimentan reduciendo así el color y la turbidez del agua, permitiendo cumplir con los límites máximos permisibles de dichos parámetros para el consumo humano (**Romero, 2002**).

2.1.6.1.- Coagulación

Las partículas presentes en el agua cruda natural, tienen cargas eléctricas positivas y negativas, es decir, que son eléctricamente neutras. Estas cargas eléctricas se repelen entre ellas manteniéndose suspendidas y separadas formando partículas coloidales. Estas no se sedimentan por lo que aportan color y turbidez al agua (**Romero, 2002**).

La coagulación al neutralizar la carga eléctrica del coloide anula las fuerzas electrostáticas repulsivas. Esto se consigue mediante la adición de sales de aluminio o hierro como coagulantes, donde los cationes trivalentes de aluminio o hierro son los responsables de neutralizar las cargas eléctricas negativas que rodean a las partículas coloidales dispersas en el agua cruda.

El proceso de coagulación y floculación dentro de las plantas de tratamiento consta de varias etapas sucesivas que permitirán una interacción efectiva del coagulante con el agua y una velocidad de mezcla que dará lugar a la formación de flóculos que sedimentaran, dejando el agua clarificada. Las etapas de coagulación son simuladas en el laboratorio mediante ensayo de jarras donde se determina la dosis óptima del coagulante para el tratamiento del agua cruda (**Castrillón & Giraldo, 2012**).

2.1.7.- Determinación de la dosis óptima de coagulante

2.1.7.1.- Ensayo de Jarras

El ensayo de jarras es una técnica de laboratorio utilizada para la determinación de la dosis de coagulantes adicionados al agua. En esta prueba se simulan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación mediante la variación de la velocidad de agitación (rpm) aplicadas a un volumen específico de agua. Los variables a tener en cuenta para el uso de esta técnica **(Romero, 2002)**.

1. pH
2. Temperatura
3. Concentración de coagulante
4. Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
5. Grado de agitación
6. Tiempo de sedimentación

Un pH muy bajo en el agua a ensayar ocasiona una disminución en la estabilidad de la suspensión coloidal, destruyendo las partículas que han absorbido iones hidroxilo (OH⁻) debido al aumento de iones hidronio (H₃O⁺), por lo cual el pH debe ser mayor que 5 para sales de aluminio y hierro **(Castrillón & Giraldo, 2012)**.

A bajas temperaturas se ha demostrado que la dosis de coagulante debe ser aumentada, para asegurar la formación de flóculos. El periodo en que se agrega el coagulante y a la velocidad con la que se lo realiza garantizan la difusión e interacción del reactivo con el agua. Así mismo el tiempo de agitación para la formación de flóculos y posteriormente el tiempo de sedimentación deben ser adecuados para permitir la clarificación del agua. Este ensayo consta de agitadores de paletas que giran a una misma velocidad (10 a 300 rpm), donde se colocan jarras con una capacidad de 1 a 2 litros habitualmente **(Romero, 2002)**.

2.1.7.2.- Parámetros para el ensayo de jarras

Para la determinación de la dosis específica es necesario mantener las condiciones y parámetros de operación que sigue el proceso industrial como son: el gradiente hidráulico, tiempos de mezcla rápida y lenta, periodo y dosis de aplicación del coagulante y tiempo de sedimentación (**Romero, 2002**).

Mezcla rápida

Garantiza el contacto del coagulante con las partículas coloidales del agua mediante la agitación vigorosa de la mezcla, permitiendo así la neutralización de las cargas y la aglomeración de las mismas. Esta mezcla se da dentro de un periodo corto y va a depender del coagulante, debido a que los coagulantes poliméricos tiende a distribuirse más lentamente que los coagulantes metálicos hidrolizantes (**Restrepo, 2009**).

Mezcla lenta

No suele exceder los 15 minutos debido a que periodos largos calientan la muestra y hacen que el agua flocule rápidamente. Este fenómeno a su vez libera gases del agua que se adhieren a los flóculos haciendo que estos floten impidiendo sedimentación (**Restrepo, 2009**).

Sedimentación.

En esta etapa la muestra no es agitada y suelen ser intervalos de tiempos similares a los de la mezcla lento (**Restrepo, 2009**)

2.1.8.- Caracterización del agua

Previo a los procesos de coagulación, floculación y sedimentación se requiere conocer los parámetros de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda. Estas características se verán afectadas directamente por el proceso de clarificación debido a que la turbidez y color se deben a las partículas coloidales disueltas en el agua

mismas que serán removidas por la coagulación. El pH también se verá afectado ya que las cargas en el agua cruda serán neutralizadas debido a las sales disueltas que aportan alcalinidad al agua (**Barrenechea, 2004**).

2.1.8.1.- Turbiedad

Generado por la formación de sistemas coloidales; es decir, partículas que por su tamaño, se suspenden y reducen la transparencia del agua (**Vargas, 2004**).

2.1.8.2.- Color

Depende de las sustancias disueltas en ella, las cuales aportan ciertas características visuales no deseadas. Normalmente el agua potable tiene un color transparente (**Romero, 2002**).

2.2.- Hipótesis

(Hi): El sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, es eficaz para la clarificación de agua que trata.

Hipótesis Nula

(Ho): El Sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, no es eficaz para la clarificación de agua que trata la planta.

Hipótesis Alternativa

(Ha): El Sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, es eficaz para la clarificación de agua que trata la planta.

2.3.- Señalamiento de Variables de la Hipótesis

Variable Dependiente:

- Remoción del color y turbidez del agua.

Variables Independientes:

- Contenido de aluminio de los lodos.
- Rendimiento del proceso de acidificación para la extracción de sulfato de aluminio
- Características fisicoquímicas del agua cruda
- Dosis de sulfato de aluminio aplicada al agua cruda.

CAPÍTULO III

Material y Métodos

3.1.- Materiales

3.1.1.- Equipos

Los equipos utilizados para el desarrollo de la metodología fueron: Turbidímetro (Lovibond®, Inglaterra), Colorímetro (Orbeco Hellige®, USA), Espectrofotómetro (Hach ®, USA), Espectrofotómetro de Absorción Atómica Analyst 400 (Perkin Helmer, USA), Test de jarras (Phipps Bird TM, USA), pH-metro (Mettler Toledo, USA), Densímetro (Mettler Toledo, USA), Plancha de agitación (Thermo Scientific, USA), Balanza analítica (Mettler Toledo, USA), Mufla (Selecta, USA) e instrumental de vidrio.

3.1.2.- Reactivos

- Solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 25%
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 25%
- Solución de EDTA 0,05 M
- acetato de amonio C₂H₇NO₂
- Anaranjado de xilenol
- Solución de Sulfato de zinc al 0,05 M
- Caolín
- Ácido ascórbico en polvo (Hach ®, USA)
- AluVer 3 en polvo (Hach ®, USA)
- Bleaching 3 en polvo (Hach ®, USA)

3.2.- Métodos

3.2.1.- Metodología

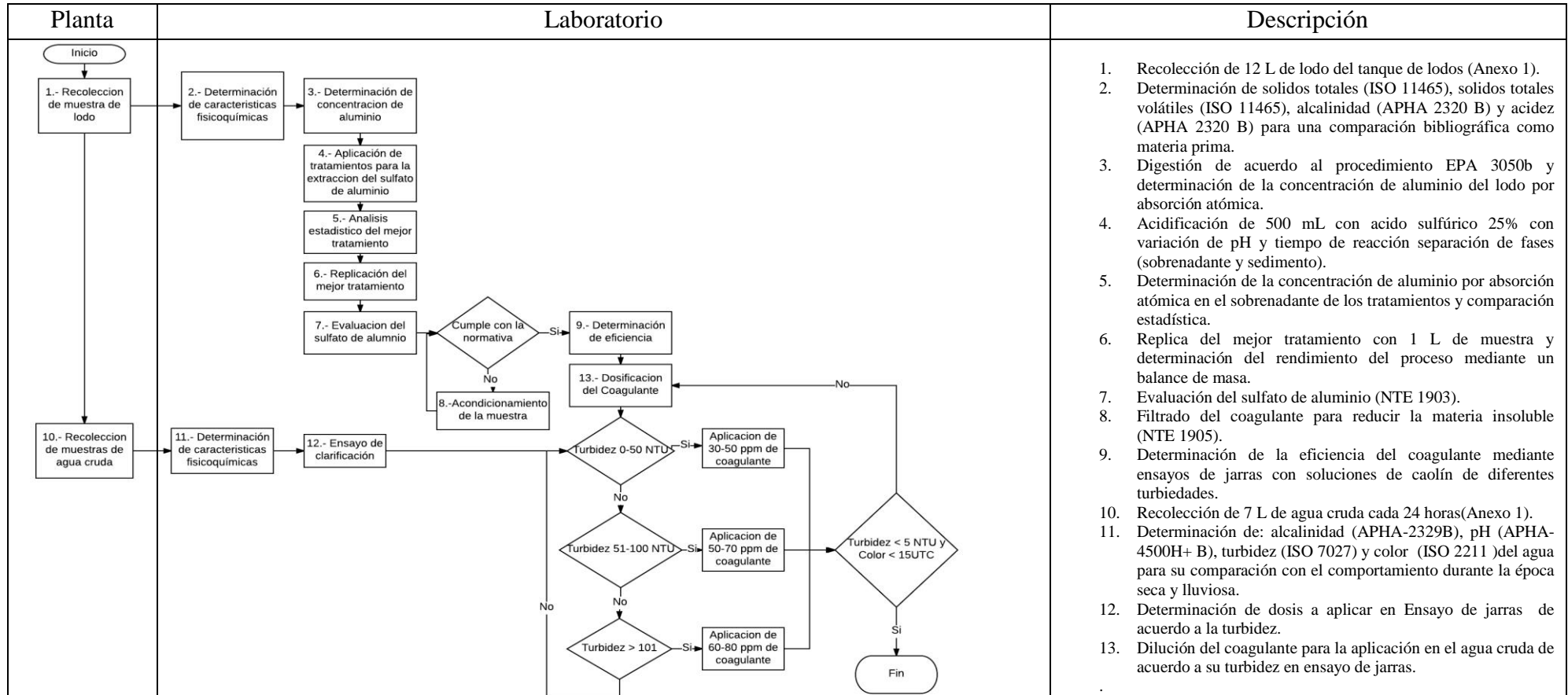


Figura 1 Flujoograma de Procesos

3.2.2.- Recolección y almacenamiento de muestras

Para la presente investigación se recolectaron 12 L de lodo proveniente del tanque de lodos posterior al vaciado de los tanques sedimentadores de la planta de tratamiento Casigana de la EP-EMAPA-A, de los cuales 9 L fueron utilizados inmediatamente para el desarrollo del método de obtención del sulfato de aluminio y 3 L fueron almacenados en refrigeración a 4 °C siguiendo el “Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos” para su posterior caracterización (**Zagal & Sadzawka, 2007**).

3.2.3.- Caracterización de los lodos

El lodo proveniente del tanque de sedimentación se homogenizó por agitación a 100 rpm en una plancha de agitación por 30 min para posteriormente determinar los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, acidez, concentración de aluminio, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (STV), y densidad de acuerdo con los métodos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (**APHA, 1995**)

3.2.3.1.- Determinación del pH

Se agregó 20 g de lodo en un matraz con 50 mL de agua destilada, la mezcla se agitó y tras dejar reposar por 2 horas se midió el pH con un pH-metro (Mettler Toledo, USA) (**APHA, 1995**)

3.2.3.2.- Determinación de la alcalinidad

Se agregó 10 ml de lodo en un matraz con 50 ml de agua destilada, adicionando 3 gotas de fenolftaleína a la mezcla y se tituló con ácido sulfúrico 0,02 N para el posterior cálculo de los mg L⁻¹ de carbonato de calcio (CaCO₃) de acuerdo a la ecuación 1 (**APHA, 1995**).

$$\text{Alcalinidad} \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{V_a * N_a * f}{V_m} * 50000 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

V_a = Volumen de ácido utilizado (mL)

N_a = Normalidad del ácido utilizado

f = Factor de conversión de unidades

V_m = Volumen de la muestra (mL)

3.2.3.3.- *Determinación de acidez*

Se agregó 10 ml de lodo en un matraz con 50 mL de agua destilada. Se adiciono 3 gotas de anaranjado de metilo a la mezcla y se tituló con hidróxido de sodio 0,02 N para el posterior cálculo de los mg L⁻¹ de CaCO₃ de acuerdo con la ecuación 2 (APHA, 1995)

$$\text{Acidez} \frac{\text{mg CaCO}_3}{\square} = \frac{V_b * N_b * f}{V_m} * 50000 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

V_b = Volumen de la base utilizada (mL)

N_b = Normalidad de la base utilizada

f = Factor de conversión de unidades

V_m = Volumen de la muestra (mL)

3.2.3.4.- *Determinación de solidos Totales (ST)*

En un crisol previamente tasado se pesó 25 g de lodo. Se colocó la muestra en la estufa sin tapa y se secó a 105 °C por 24 horas. Transcurrido el tiempo se retiró la muestra de la estufa y se colocó en el desecador por 1 hora. Posteriormente se pesó la muestra y se calculó de acuerdo con la ecuación 3 en porcentaje y con la ecuación 4 en mg*L⁻¹ (Zagal & Sadzawka, 2007).

$$ST (\%) = \frac{b - c}{a - c} * 100\% \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

a= masa muestra inicial (g)

b= masa lodo seco final (g)

c= masa recipiente seco (g)

$$ST (mg L^{-1}) = \frac{P_2 - P_1}{V} * 1000 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

P₁= peso del crisol (g)

P₂= peso del crisol + muestra seca (g)

V= volumen de la muestra (mL)

3.2.3.5.- *Determinación de Sólidos totales volátiles*

Se colocó la muestra obtenida del proceso de sólidos totales a calcinar a 550 °C, subiendo gradualmente la temperatura en intervalos de dos horas, transcurrido el tiempo se dejó secar y enfriar. Se pesó la muestra y se calculó de acuerdo a la ecuación 5 en porcentaje y de acuerdo con las ecuaciones 6 y 7 en mg*L⁻¹ (APHA, 1995).

$$STV (\%) = \frac{a - b}{m} * 100\% \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

a = masa previa calcinación (g)

b = masa post calcinación (g)

m = masa muestra de lodo inicial (g)

$$STF (mg L^{-1}) = \frac{P_3 - P_1}{V} * 1000 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$STV (mg L^{-1}) = ST - STF \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

P₁= peso del crisol (g)

P₃= peso de la cápsula más residuo calcinado (g)

V= volumen de la muestra (mL)

STF= solidos totales fijos

STV= solidos totales volátiles

3.2.3.6.- Determinación de la concentración de aluminio.

Se pesó 1 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL al que se le añadió 10 ml de ácido nítrico 1:1. La mezcla se calentó en una plancha a 95 °C procurando que la muestra no llegue a ebullición por 15 min. Se dejó enfriar la mezcla hasta menos de 70 °C y se añadió 5 ml de ácido nítrico concentrado y se sometió a reflujo durante 30 min a 95 °C sin ebullición colocando un vidrio reloj sobre el matraz, esta etapa se repite una vez más. Después de las etapas de reflujo se evaporó la muestra hasta alcanzar un volumen aproximado de 5 ml sin ebullición. Posteriormente la muestra se deja enfriar a menos de 70 °C. Se añadieron 2 mL de agua destilada y 3 mL de agua oxigenada al 30% gota a gota. La solución se calentó hasta que la efervescencia calmó. Se añadió 8 alícuotas de 1 mL del agua oxigenada al 30% a la mezcla y se calentó con reflujo. Se dejó enfriar la mezcla a menos de 70 °C y se añadieron 10 mL de HCl concentrado y la muestra se calentó a reflujo durante 15 min sin ebullición. Una vez que se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente, la muestra se filtró y se diluyó a 100 mL en un balón de aforo con agua destilada (EPA, 1996).

3.2.4.- Obtención de Sulfato de Aluminio

3.2.4.1.- Evaluación del método para la obtención de sulfato de aluminio

De acuerdo con el método de **Nuñez & Peña (2011)** basado en la obtención de sulfato de aluminio mediante acidificación con ácido sulfúrico, se tomó 500 mL de muestra de lodo, la cual se homogenizó durante 30 min a 100 rpm en una plancha de agitación. Transcurrido este tiempo se aciduló la muestra agregando gota a gota ácido sulfúrico controlando el pH hasta obtener el valor respectivo al tratamiento (3,5; 2,5 y 1,5) y se dejó reaccionar bajo agitación de 100 rpm durante el tiempo respectivo (5, 30 y 90 min). Una vez terminado el tiempo de reacción se dejó reposar la muestra durante 60 min, donde transcurrido el tiempo se formaron 2 fases, de las cuales se colectó la superior (sobrenadante) y se midió el volumen obtenido y la concentración de aluminio de esta mediante absorción atómica de acuerdo al método APHA-3500Al D (**APHA, 1995**).

El tratamiento con la mayor concentración de aluminio fue replicado con 1 L del lodo y se caracterizó de acuerdo con los parámetros indicados en la Norma Técnica Ecuatoriana 1903 de productos químicos para uso industrial. (**INEN, 1992a**). Adicionalmente se determinó el porcentaje de recuperación de aluminio en el sobrenadante, pH, eficiencia como coagulante y el porcentaje de lodo que redujo tras los tratamientos aplicados.

3.2.4.2.- Determinación del porcentaje de alúmina

Se tomó 1 mL de muestra en un vaso de precipitación y se pesó. En un matraz se colocó 50 mL de agua destilada, 2 gotas de ácido sulfúrico en relación 1:1, 50 mL de EDTA 0,05 M y 25 mL de acetato de amonio. A esta mezcla se adicionó la muestra y se pesó el residuo en el vaso. La mezcla descrita se calentó hasta ebullición manteniendo este estado por 3 minutos, una vez que la muestra se enfrió se colocó 3 gotas de anaranjado de xilenol y se tituló con sulfato de zinc 0,05M hasta obtener un color rosáceo canela y se calcula de acuerdo con la ecuación 8 (**INEN, 1992d**)

$$\%Al_2O_3 \text{ y } Fetotal \text{ expresado como } Al_2O_3 = \frac{(V_1 - V_2) * M * 5,098}{m} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

V_1 = volumen de EDTA agregado (mL)

V_2 = volumen de sulfato de zinc 0,05 M utilizado en la titulación (mL)

M= molaridad del EDTA

m= peso de la muestra (g)

3.2.4.3.- Determinación de basicidad

Se disolvió 7 g de muestra en 100 mL de agua destilada y se calentó hasta ebullición. Mientras la mezcla estaba caliente se colocó 10 mL de ácido sulfúrico 0,5 N y se dejó enfriar, posteriormente se adiciono 20 mL de solución estándar de fluoruro de potasio junto con 3 gotas de fenolftaleína 1% y se tituló la mezcla con hidróxido de sodio 0,5 N hasta que la muestra tomó un color rosado y se calculó la basicidad y acidez libre de alúmina de acuerdo con la ecuación 9 (INEN, 1992c).

$$\%Basicidad \text{ libre de masa} = \frac{V_1 - V_2}{m} * 0,85 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

V_1 = Volumen de ácido sulfúrico 0,5 N agregado (mL)

V_2 = Volumen de hidróxido de sodio 0,5 N utilizado en la titulación (mL)

m= masa de la muestra (g)

3.2.4.4.- Determinación del porcentaje de hierro

Se pesó 10 g de la muestra y se disolvió en 100 ml de agua destilada. Llevandola a ebullición durante 5 minutos. Posteriormente se filtró y se lavó con agua destilada para transferir a un balón de aforo de 1 L. En un balón de 100 mL se colocó 5 ml de la muestra del balón de 1L, 50 ml de agua destilada, 10 ml de ácido sulfúrico en relación 1:1, se agregó gotas de $KMnO_4$ al 1 % hasta obtener un color rosado invariable y se dejó enfriar. Una vez fría la solución se completó el volumen del

balón con 10 ml de tiocianato de potasio 10% y agua destilada. La concentración de hierro se determinó después de 10 minutos en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 475 nm y se calculó de acuerdo la ecuación 10 (INEN, 1992e).

$$\% \text{ de Fe como } Fe_2O_3 = \frac{M * B * 0,14297}{W} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

M= concentración de hierro (mg L⁻¹)

B= alícuota de la muestra dividida para el volumen total del ensayo (mL)

W= masa de la muestra (g)

3.2.4.5.- Determinación de Materia insoluble

Se disolvió 15,75 g de muestra en 150 ml de agua destilada y se calentó hasta ebullición por 5 min. Posteriormente se filtró y recolecto en un crisol previamente pesado y secado hasta obtener un filtrado totalmente cristalino, indicando la presencia de sulfatos. Esto se verificó agregando cloruro de bario 10%. El crisol se calentó a 105 °C en una estufa hasta tener una masa constante y se calculó de acuerdo a la ecuación 11 (INEN, 1992b).

$$\% \text{ de materia insoluble} = \frac{m_2 - m_1}{m} * 100\% \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

m₁= peso del crisol seco (g)

m₂= peso del crisol más residuo seco (g)

m= peso inicial de la muestra (g)

3.2.4.6.- Determinación de la Eficiencia del Coagulante recuperado

Se aplicó el sulfato de aluminio recuperado en dosis de: 30, 40, 50, 60, 70 y 80 ppm a soluciones estándar de 50 NTU (Unidad nefelométrica de turbiedad) para aguas con turbiedad baja, 100 NTU para aguas con turbiedad media y 200 NTU para aguas con turbiedad alta, preparadas a base de agua destilada y caolín en un ensayo de jarras a 100 rpm por 1 minuto, 40 rpm por 20 minutos y sedimentación sin agitación

durante 20 min. Una vez terminado el ensayo de jarras se tomó una muestra de 10 mL de cada jarra y se determinó la turbiedad residual y se calculó la eficiencia del coagulante de acuerdo con la ecuación 12 (**Pavón, Pacheco, & Cárdenas, 2004**).

$$Eficiencia(\%) = \frac{T_i - T_f}{T_f} * 100\% \quad (\text{Ec. 12})$$

Ti= Turbiedad inicial (NTU)

Tf= Turbiedad residual (NTU)

3.2.5.- Caracterización del agua cruda

Para determinar la eficiencia del coagulante en condiciones no experimentales se probó el coagulante recuperado en el efluente que la planta trata (canal Ambato Huachi Pelileo), previo a la dosificación se determinaron ciertos parámetros del agua.

De acuerdo con **Romero (2002)** los factores que influyen en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación para la clarificación del agua son: turbiedad, color, temperatura, alcalinidad y pH. Por tanto se determinaron dichos parámetros del agua cruda para ver su variabilidad a lo largo del experimento. Estos parámetros fueron determinados de acuerdo con los métodos que se utilizan dentro la planta “Casigana” descritos en la tabla 2.

Tabla 2. *Métodos utilizados para la caracterización del agua cruda.*

Parámetro	Método
Turbiedad	APHA-2130B
Color	APHA-2120B
Alcalinidad	APHA-2329B
pH	APHA-4500H+ B

Nota: Métodos utilizados dentro del Laboratorio de producción de la planta de tratamiento “Casigana” de la EP-EMAPA-A.

3.2.6.- Dosificación del sulfato de aluminio obtenido.

3.2.6.1.- Ensayos de coagulación en el efluente de la planta de tratamiento “Casigana”

El agua cruda fue tratada en ensayos de 6 jarras de 1 L, donde se aplicaron 3 concentraciones de sulfato de aluminio recuperado de acuerdo con la eficiencia del coagulante, correspondiente a la turbiedad del agua cruda (baja, media o alta), ajustados de acuerdo a la velocidad y tiempos de agitación empleados en la planta de tratamiento: mezcla rápida a 100 rpm por 1 minuto, fase lenta de coagulación y floculación a 40 rpm por 30 minutos y una fase de sedimentación sin agitación durante 20 minutos. Los ensayos de jarras se llevaron a cabo durante 30 días cada 24 horas con el efluente de la planta de tratamiento “Casigana”.

La determinación de la dosis óptima de coagulante se especificó de acuerdo a la evaluación del porcentaje de remoción de la turbidez y el color del agua tratada después de los ensayos de jarras. El porcentaje de remoción de turbiedad del agua se evaluó de acuerdo con la norma ISO 7027:1999 de calidad del agua y el color se evaluó de acuerdo con la norma ISO 2211:1973 en unidades UTC (escala platino-cobalto) en un colorímetro, así mismo el agua debió cumplir con los límites estipulados en la norma técnica ecuatoriana INEN 1 108:2011 de agua potable para color y turbiedad.

3.3.- Diseño Experimental

Se procesaron los datos obtenidos de acuerdo con las combinaciones de los factores experimentales: pH A (a0 3,5; a1 2,5 y a2 1,5) y tiempo de reacción B (b0 5, b1 30 y b2 90 min.) y se realizó un análisis de 2 vías sin interacción (diseño de bloques totalmente al azar) para determinar el mejor tratamiento en la obtención de sulfato de aluminio del lodo evaluando la concentración de aluminio en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Se compararon los datos del porcentaje de remoción de turbiedad mediante un análisis estadístico simple para determinar si existía diferencia significativa entre las concentraciones aplicadas al agua que trata la planta.

3.3.1.- Análisis Estadístico

Los datos se corrieron en el software estadístico IBM SPSS Statistics Version 21 y el software STAT Plus LE para Mac, mediante una ANOVA de dos factores para la determinación del mejor tratamiento en la obtención de sulfato de aluminio y una ANOVA de un factor para la comparación de la turbiedad residual en el agua y la determinación de la dosis óptima, mediante comparación de medias y test de Tukey con $\alpha = 0,05$.

CAPÍTULO IV

Resultados y Discusión

4.1.- Análisis y discusión de resultados

4.1.1.- Evaluación del lodo como materia prima

El policloruro de aluminio utilizado es un compuesto polimérico que coagula la materia coloidal del agua y su hidrólisis forma una serie de compuestos solubles monoméricas, poliméricos y precipitados como el hidróxido de aluminio, formando lodos de pH neutral, densos y con alto contenido de aluminio (**Zouboulis, Traskas, & Samaras, 2008**). La presente caracterización busca determinar si los lodos producto de este proceso son similares a los obtenidos de plantas donde usan sulfato de aluminio como coagulante evaluando su potencial como materia prima.

De los resultados de alcalinidad (Tabla 3) podemos inferir que las especies contenidas en los lodos correspondieron a hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio o sodio, a causa más común los bicarbonatos de calcio y magnesio resultado de la reacción entre el aluminio y el agua cruda (**Serna & Lopez, 2011**), debido a estas características y de acuerdo con la concentración de aluminio el principal componente de los lodos fue el hidróxido de aluminio.

El pH del lodo está dentro del rango de 6,6 a 7,3 (Tabla 3) considerado como neutro donde los efectos tóxicos de los elementos que lo constituyen son mínimos (**AEFA, 1997**), este es un indicativo de que los componentes del lodo son principalmente poco nocivos correspondientes a materia orgánica que precipita en los procesos de floculación, producto de la reacción entre el agua cruda y el coagulante agregado en la planta (policloruro de aluminio). El pH de 6,93 fue un indicativo de que existieron especies no solubles de aluminio principalmente hidróxido de aluminio, ya que estas se establecen en cifras cercanas al pH 6, no así con el hierro donde su solubilidad puede darse a rangos de pH amplios (**Cornwell & Susan, 1979**), debido a que el agua que la planta trata tiene concentraciones bajas e incluso nulas de hierro.

Los sólidos totales presentaron una concentración moderada de 5,4 % y los sólidos totales volátiles una concentración de 0,68 % (Tabla 3), representando una baja concentración de materia orgánica. Esto indicó que el volumen de lodo retuvo gran cantidad de agua y que debido a la concentración de aluminio que presentó este no se secó con facilidad por lo cual este lodo se transformó en una materia prima idónea para la aplicación del proceso de extracción del aluminio mediante acidificación con ácido sulfúrico.

Tabla 3 Caracterización de los lodos de la planta "Casigana"

Características	Método	Valor	Unidades
pH	APHA 4500 H ⁺ B	6,93	
Alcalinidad	APHA 2320 B	18,60	mg L ⁻¹
Acidez	APHA 2320 B	1,640	mg L ⁻¹
ST	ISO 11465	5,400	%
STV	ISO 11465	0,680	%
[Al³⁺]	APHA-3500Al D	0,982	mg g ⁻¹
Volumen		90,28*	L día ⁻¹

Nota: * la cantidad dependerá de las características del agua tratada por la planta.

Los parámetros descritos en la tabla fueron escogidos para determinar el potencial que estos poseían como materia prima para la extracción de sulfato de aluminio.

4.1.2.- Determinación de la eficiencia del proceso de acidificación

Tabla 4. Eficacia del proceso de acidificación

Tratamiento	[Al ³⁺] mg L ⁻¹	Volumen de sobrenadante (ml)	Lodo reducido %
a0b0	406,8±0,06	183	36,50
a0b1	415,5±0.02	253	50,50
a0b2	415,5±0.04	260	52,00
a1b0	493,4±0.00	248	49,50
a1b1	510,7±0.02	310	62,00
a1b2	527,9±0.01	313	62,50
a2b0	848,2±0.05	295	59,00
a2b1	908,8±0.07	383	76,50
a2b2	900,2±0.01	385	77,00

Nota: ± corresponde a la desviación estándar entre la replica

El proceso de acidificación mejorado se describe como la reacción del ácido sulfúrico, con hidróxido de aluminio en condiciones ácidas de entre 1 a 3 unidades de pH y un tiempo de reacción bajo agitación, formando como producto sulfato de aluminio tipo B ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3 \text{H}_2\text{O}$) y sedimentos (Sandoval, Martín, Piña, & Montellano, 2009).

Los resultados tras esta investigación muestran que la solución más concentrada de aluminio fue el tratamiento a2b1 similar a los presentados por Nuñez & Peña (2011), que obtuvieron una concentración de $1034 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de aluminio en la solución.

El porcentaje de reducción de volumen más alto de 77% (Tabla 6) fue el correspondiente al tratamiento a2b2 después de la separación de fases transcurridos los 60 minutos en reposo, sin embargo, la concentración de aluminio de los tratamientos a2b1 y a2b2 presentaron valores cercanos que podrían indicar que 30 minutos de reacción fueron suficientes para extraer todo el aluminio disponible y

reducir en al menos el 76,5 % del volumen del lodo inicial. Este resultado pueden deberse a la naturaleza de la materia prima, ya que según los lodos producidos por el tratamiento del agua con policloruro de aluminio (coagulante utilizado en la planta de tratamiento “Casigana”) son menos abundantes pero con mayor concentración de aluminio (Romero, 2002).

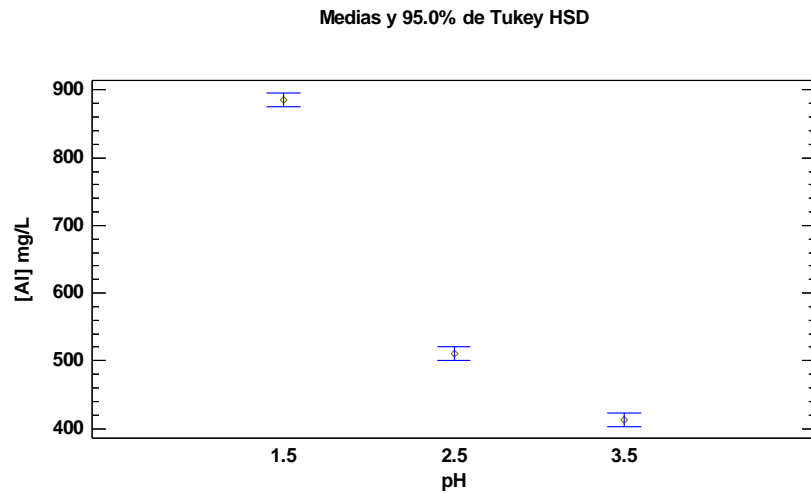


Figura 2 Pruebas de múltiple rango para [Al] mg L⁻¹ por pH

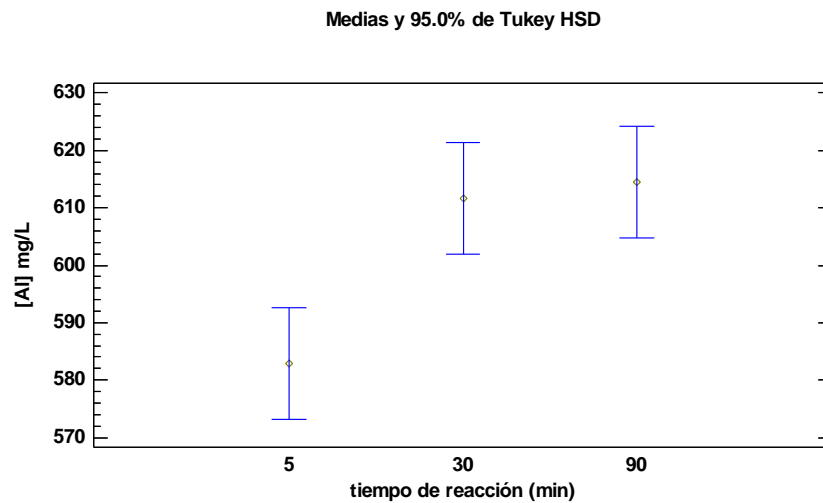


Figura 3 Pruebas de múltiple rango para [Al] mg L⁻¹ por tiempo de reacción (min)

De acuerdo con el análisis estadístico de varianza realizado en STAT Plus LE del cual se obtuvieron los resultados presentados en la figura 2 y 3 indicó que el pH y el tiempo de reacción, fueron significativamente diferentes entre los tratamiento aplicados, siendo el pH 1,5 durante 30 minutos el más eficiente para la extracción del

coagulante. De acuerdo con el flujograma cuando el pH disminuye la concentración de aluminio incrementa, puesto que el incremento de H^+ provocó que la reacción entre el hidróxido de aluminio y el ácido sulfúrico se desplazaran hacia la formación de especies solubles del aluminio mismas que quedan en el sobrenadante (**Gregory & Duan, 2001**). De acuerdo con **Villegas et al. (2005)** el pH óptimo para la reacción de acidificación del aluminio para la recuperación de sulfato de aluminio es de 1,5 unidades mismo valor de pH que la presente investigación encontró como óptimo.

El tiempo de reacción influyó significativamente en el proceso de acidificación, sin embargo, de acuerdo a las pruebas de comparación múltiple (Tukey α 0,05) estas demostraron que la acidificación tiene mejores resultados después de un lapso 30 minutos de reacción (Figura 2), ya que no presentaron una diferencia significativa con el tratamiento de 90 minutos.

4.1.3.- Análisis del Sulfato de Aluminio extraído.

El sulfato de aluminio líquido o alumbre ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3 H_2O$) tiene un peso molecular de 342 g/mol, es una sal que se forma de la reacción entre ácido sulfúrico y una materia prima rica en aluminio, como el hidróxido de aluminio, la bauxita o arcillas. Se usa comúnmente en el tratamiento de aguas para el consumo humano y para otros para fines industriales (**Conquímica, 2014**).

De acuerdo con el análisis del sulfato de aluminio en la tabla 5 se consideró al coagulante extraído como un sulfato de aluminio tipo B de acuerdo con las características estipuladas en la NTC 531 (**ICONTEC, 1993**).

Tabla 5 Caracterización del sulfato de aluminio obtenido

Propiedades	Método	Valor de la muestra	Requisito Químico Tipo A	Requisito Químico Tipo B
Al ₂ O ₃ %	NTE 1907	7,58	8 ⁽¹⁾	7,3 ⁽¹⁾
Basicidad %	NTE 1906	6,54	0,025 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾
M. Insoluble %	NTE 1905	0,07	0,1 ⁽²⁾	0,1 ⁽²⁾
Fe ₂ O ₃ %	NTE 1908	0,72	0,4 ⁽²⁾	1,2
Densidad g*cm ⁻³	Cuerpo Vibrante	1,03 ⁽³⁾	1,3	1,3
pH	Potencio métrico	1,63	1,3 ⁽³⁾	1,3 ⁽³⁾

Nota: ⁽¹⁾mínimo ⁽²⁾máximo ⁽³⁾característica comercial variable.

El aluminio que se extrae de los lodos es 15 veces más diluido que los de venta comercial y una dosis de 10 mg L⁻¹ de coagulante comercial remueve hasta el 90% de turbidez en el agua, en contraste con una dosis igual de aluminio reciclado este solo remueve del 70 al 80% de turbidez (Cornwell & Susan, 1979). El pH al que es sometido el lodo para la recuperación del aluminio hace que la eficiencia del coagulante disminuya (Sandoval, Martín, Piña, & Montellano, 2009). Entonces del pH del coagulante extraído se puede predecir que las concentraciones convencionales no serán suficientes para la clarificación del agua, razón por la cual los ensayos posteriores para la determinación de la eficiencia del coagulante se realizaron con concentraciones de 30 mg L⁻¹ y superiores.

De acuerdo con la comparación del pH del sulfato de aluminio reciclado con los parámetros de la ficha de la empresa Conquímica (2014), se aprecia que el producto obtenido de la acidificación fue menos ácido que el que se comercializa, sin embargo, la ficha técnica enuncia que este parámetro no es un requisito mínimo, sino, más bien depende de la calidad de la materia prima y las condiciones de la extracción.

La coloración del alumbre obtenido fue igual al comercial. Después de la extracción presentó partículas oscuras (materia en suspensión), mientras que la apariencia del sulfato de aluminio comercial es totalmente homogéneo. Razón por la cual el coagulante se filtró para la eliminación de estas partículas provenientes del lodo.

4.1.4.- Balance de materia del proceso.

De acuerdo con los registros de planta “Casigana” la cantidad de lodo seco producido es de aproximadamente 90,28 L al día, cuando la planta trata un caudal de $115 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua cruda con una turbiedad de 25 NTU aplicando una dosis de 25 ppm de alúmina.

El tratamiento a2b1 se replicó una base 1 kg de lodo para la realización del balance de materia para la determinación del porcentaje de aluminio recuperado del proceso, dio como resultado un volumen de lodo residual de 240 mL y un volumen de sobrenadante de 777,5 mL recuperando un 72,44% del aluminio en el lodo.

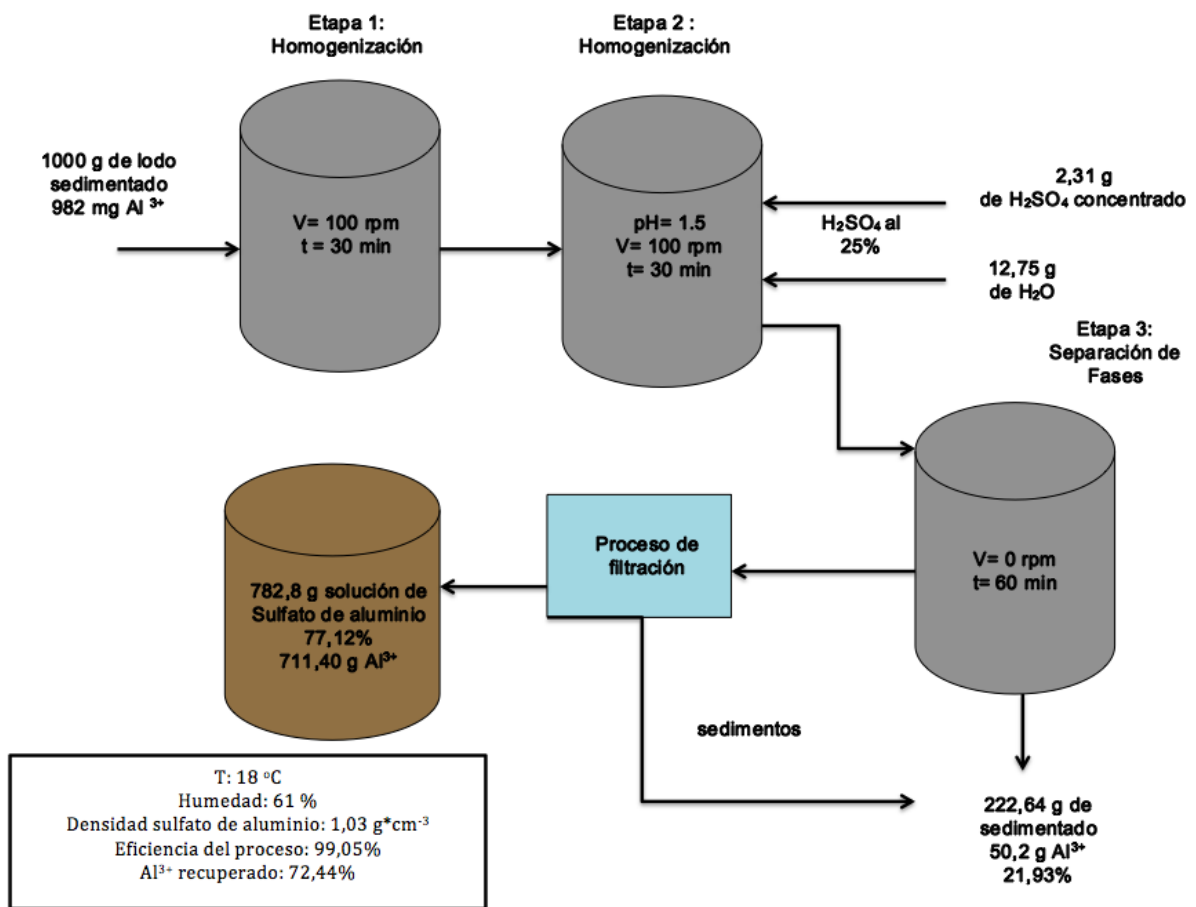


Figura 4 Balance de materia del proceso de producción de sulfato de aluminio a partir del lodo.

Un beneficio adicional que presenta el proceso de extracción de sulfato de aluminio es la reducción del volumen del contenido de aluminio y agua en los lodos. La humedad de los lodos esta estrechamente relacionada con el contenido de aluminio que estos poseen, debido a que las partículas que se extraen del agua cruda con policloruro de aluminio sedimentan en forma de especies monoméricas, y poliméricas que atrapan el agua en sus estructuras y se mantienen en forma de lodos con un alto porcentaje de agua (**Baes & Mesmer, 1976**).

Los procesos de desaguado de los lodos de las plantas de tratamiento sirven para retirar el agua y obtener materia ha ser dispuesta: la torta como precipitado y un sobrenadante con altas concentraciones de contaminantes residuales (**Limón, 2013**). El proceso de acidificación proporcionaría un método para reducir el volumen de los lodos generados en planta de tratamiento puesto que los lodos con aluminio tienen baja capacidad de deshidratación con tratamientos de desagüe convencionales. La

reducción del volumen del lodo inicial tras la acidificación (Figura 5) es de 77,74%. Este tipo de sedimentos son más manejables ya que poseen una baja concentración de aluminio por tanto mayor capacidad de deshidratación. Una vez deshidratados los lodos, la planta puede disponer de estos sedimentos como un sólido para rellenos sanitarios con el beneficio adicional de obtener un producto como es el sulfato de aluminio.

4.1.5.- Eficiencia del Coagulante recuperado

La eficiencia del coagulante se evaluó de acuerdo a la turbiedad residual, después de la aplicación de una concentración de coagulante contrastada con la turbiedad inicial de muestras de agua con caolín a distintas concentraciones de caolín.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el sulfato de aluminio fue capaz de reducir el 99% de la turbidez del agua con turbiedad baja (50 NTU), en concentraciones mínimas de 30 ppm se mantuvo estable hasta las concentraciones más altas de 80 ppm. El coagulante fue capaz de reducir el 96% de la turbidez del agua medianamente turbia (100 NTU) en concentraciones superiores a las 50 ppm y redujó la turbiedad del agua altamente turbia (200 NTU) a concentraciones superiores a 60 ppm en un 95%, como se muestra en la figura 4. Estos resultados fueron determinados de acuerdo a la caracterización del canal Ambato-Huchi-Pelileo expuestos por **Tirado (2013)** del agua que llega a la planta de tratamiento “Casigana”, donde se mencionó que el agua del efluente está ligeramente contaminada en la época seca del año y medianamente contaminada en la época lluviosa con un promedio de turbiedad de 112,74 NTU y de 27, 25 NTU.

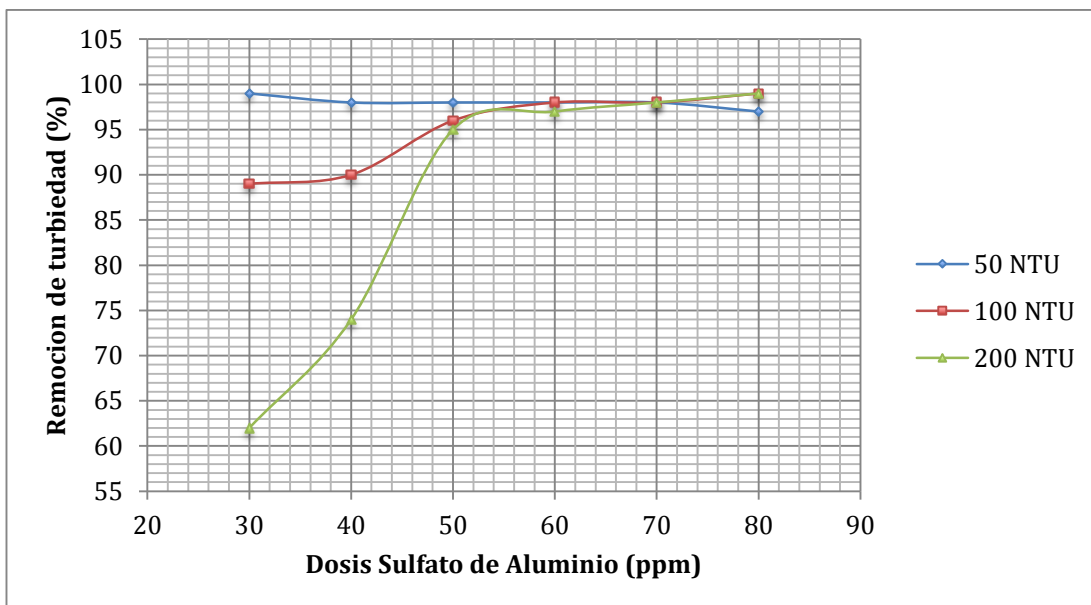


Figura 5 Eficiencia del sulfato de aluminio para la remoción de la turbiedad en el agua ligeramente turbia (50 NTU), medianamente turbia (100NTU) y altamente turbia (200 NTU) de acuerdo con la dosis de coagulante aplicado en ppm.

De acuerdo con los resultados de la eficiencia del coagulante para la remoción de la turbiedad, se determinó las concentraciones a probar en el ensayo de jarras para tratar el agua cruda que llega a la planta “Casigana”. **Villegas et al. (2005)** afirman que la eficiencia del coagulante reciclado de lodos se reduce a un 70%, esto se debe no solo al proceso de reciclado sino también a las características fisicoquímicas del agua, razón por la cual la concentración de coagulante aplicado al agua puede aumentar al probar el coagulante con agua cruda y no bajo condiciones experimentales.

4.1.6.- Caracterización del agua que trata la planta “Casigana”

Los ensayos de clarificación del agua cruda con el sulfato de aluminio iniciaron el 7 de Diciembre del 2016 aplicados al agua proveniente del canal Ambato-Huachi-Pelileo, canal que trata la planta “Casigana” ubicada en el punto 78° 38’ 33” O 1° 16’ 34” S. Donde el agua es colectada por la planta para su tratamiento. Se determinó el pH, alcalinidad y temperatura del agua cruda del tanque de recolección que ingresa a la planta puesto que son los factores principales que afectan a los procesos de coagulación para la clarificación del agua y por lo tanto deben ser tomados en cuenta para la determinación de la eficacia del sulfato de aluminio como clarificador.

Tabla 6. Caracterización del agua que trata la planta "Casigana"

Parámetro	Unidad	Periodo de estudio ¹	Época seca ²	Época lluviosa ²
Turbiedad	NTU	10,73	27,25	112,74
Color	UTC	25,83	34,62	179,32
Temperatura	°C	12,10-15,50	17,20-20,86	16,60-19,10
Alcalinidad	mg L ⁻¹	130,32	126,53	126,25
pH	-	8,06	8,55	8,25

Nota: ¹ valor promedio del parámetro expuesto durante los 30 días de estudio que duro la caracterización del agua, ² valor promedio del parámetro expuesto durante la época del año descrita, obtenido a partir de los registros del último año del laboratorio de producción "Casigana" .

El pH en todos los casos tiende a la neutralidad razón por la cual el este factor no representa un problema evidente ya que de acuerdo con **Romero (2002)** los procesos de coagulación son eficientes en aguas con un pH neutral y presenta problemas cuando el agua tiene carácter ácido.

La temperatura durante los 30 días de investigación osciló entre 12,10 y 15,50 °C (Tabla 6) y de acuerdo con la literatura (**Romero, 2002**) las bajas temperaturas pudieron provocar una coagulación y floculación más lenta cuando se utilizó el sulfato de aluminio y el tiempo de floculación debe ser superior, sin embargo, dicha característica fue compartida con el coagulante utilizado actualmente en la planta de tratamiento "Casigana" (policloruro de aluminio), entonces la infraestructura y los ensayos de jarras estaban ajustados de acuerdo con los tiempos óptimos de tratamiento del agua bajo estas temperaturas. Las temperaturas registradas dentro de la época lluviosa tienen similitud con las registradas durante el periodo de estudio, sin embargo, durante la época seca estas aumentaron lo que ayudaría una coagulación más rápida y la dosis de sulfato de aluminio podría bajar.

La alcalinidad influye con los componentes de los químicos que se adicionan al agua (coagulantes) ya que reaccionan especialmente con la alcalinidad y forman precipitados voluminosos, constituidos principalmente por los hidróxidos metálicos correspondiente al metal del coagulante, una alcalinidad alta permitirá una mejor coagulación y por tanto una menor dosis de coagulante (**Chulluncuy, 2000**). En concordancia con este análisis y de acuerdo con **Wurts & Durborow (1992)** las

alcalinidades que se reportaron están entre 75 y 150 mg L⁻¹ y fueron consideradas como medias, la dosis de sulfato de aluminio aplicada al agua durante todo el año no se vería afectada por este parámetro puesto que el agua de la planta se mantuvo dentro de estos rangos.

El objetivo de un ensayo de jarras es el de determinar las variables físicas y químicas que influyen en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, y determinar la eficiencia de remoción del color y la turbiedad en el agua (clarificación) (**Chulluncuy, 2000**). De acuerdo con la caracterización del agua cruda que ingresó a la planta de tratamiento “Casigana” durante la época seca, por su baja turbiedad y color (Tabla 6) las concentraciones que se probarían en el ensayo de jarras serían de 30-50 ppm de sulfato de aluminio puesto que estas redujeron un 99% de la turbiedad en aguas con una turbiedad de 50 NTU. Las concentraciones que se probarían durante la época lluviosa serían de 60-80 ppm de sulfato de aluminio puesto que estas concentraciones redujeron en un 99% la turbiedad de aguas altamente turbias de 200 NTU, debido a que, los factores que afectan a la coagulación fueron bastante estables a lo largo del año, estos no afectarían la dosificación del sulfato de aluminio reciclado.

De acuerdo con la tabla 6 la turbiedad del agua durante el periodo de estudio presentó un promedio de 10,73 NTU y un color de 25,83 UTC, pudiendo considerar a este como un efluente ligeramente turbio. Razón por la cual las concentraciones probadas en el ensayo de jarras fueron de 30, 40 y 50 ppm de acuerdo con la caracterización del agua que se realizó a diario del agua cruda y esta no supera los 50 NTU de turbiedad.

4.1.7.- Ensayos de clarificación del agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos después de la prueba de jarras, al ensayar las concentraciones establecidas expuestas en la figura 6 las concentraciones de 40 y 50 ppm fueron capaces de reducir la turbiedad del agua cruda para cumplir con los límites estipulados en la NTE 1 108:2011 de agua potable para turbiedad 5 NTU (INEN, 2014), la concentración de 30 ppm fue insuficiente para reducir la turbiedad del agua por debajo de los 5 NTU (figura 5), puesto que, en los ensayos: 3,5,7,10,11,12,14 y 29 la turbiedad residual en el agua superó el límite permitido por la cual esta dosis fue descartada para el análisis de varianza para la determinación de la dosis óptima.

Los resultados de color (figura 7) muestran resultados favorables para todas las concentraciones del sulfato de aluminio puesto que el agua tratada no supera el límite de 15 UTC que especifica la NTE 1 108:2011 (INEN, 2014).

Los resultados en las figuras 5 y 6 para color y turbidez del agua tratada en los ensayos de jarras, demostraron la eficiencia de este coagulante en concentraciones superiores a 40 ppm teniendo en cuenta que el agua del canal tratado (Ambato-Huachi-Pelileo) esta “ligeramente contaminada” (Tirado, 2013).

Para determinar el mejor tratamiento aplicado al agua cruda se determinó el porcentaje de remoción de turbiedad que cumplieron con los límites permitidos, las concentraciones de 40 y 50 ppm fueron comparados para determinar si existió una diferencia significativa entre estos tratamientos en la remoción de turbiedad, con el objetivo de utilizar una dosis mínima que dé iguales resultados en la remoción de turbidez en el agua. El resultado de este análisis mostró que no existe una diferencia significativa en la reducción de la turbidez cuando se aplica más de 40 ppm, a un α de 0,05 (Anexo 2), por lo cual, se puede afirmar que una concentración de 40 ppm de sulfato de aluminio fue suficiente para el tratamiento de agua cruda del canal Ambato-Huachi-Pelileo cumpliendo con los límites estipulados en la norma INEN 1 108:2011 de requisitos del agua potable.

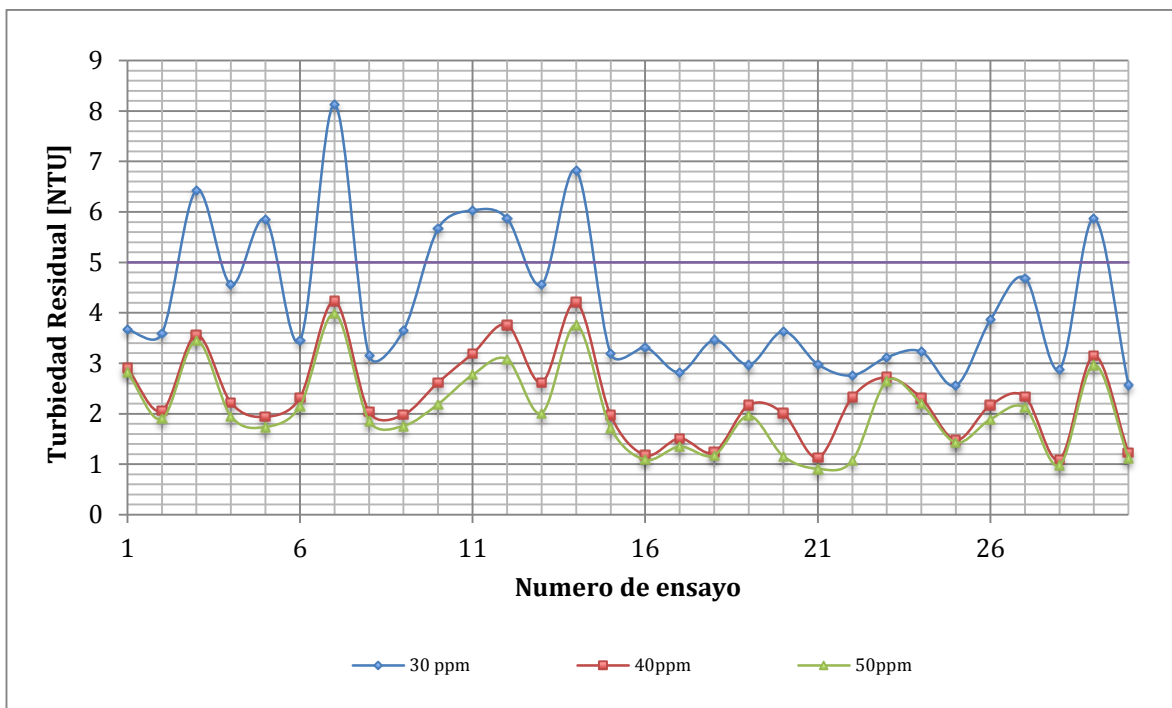


Figura 6 Turbiedad residual del agua de la planta “Casigana” tras la aplicación del sulfato de aluminio reciclado.

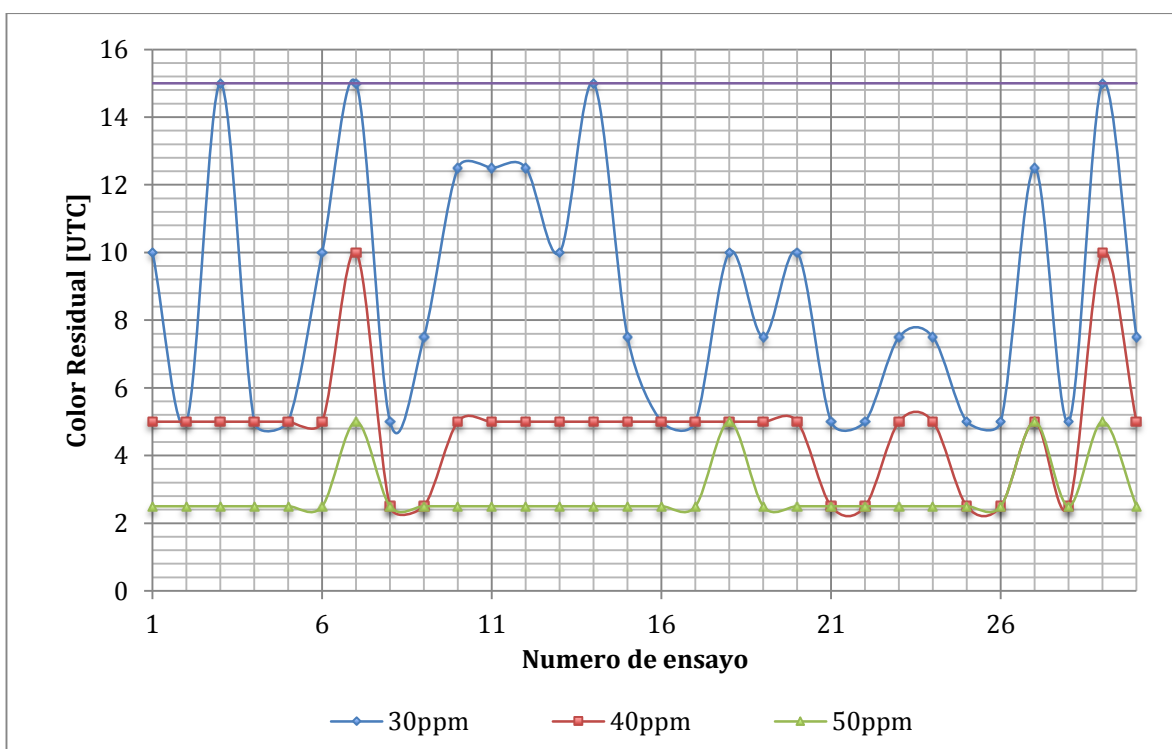


Figura 7 Color aparente residual del agua de la planta “Casigana” tras la aplicación del sulfato de aluminio reciclado.

4.1.8.- Estimación de costos de producción.

El costo para la producción de 763 L de sulfato de aluminio a partir de 1000 L de lodo de acuerdo con el mejor tratamiento experimental, se expone en la tabla 7 donde se han tomado en cuenta el costo de los reactivos e insumos utilizados para la obtención del coagulante.

Tabla 7 Costo de materiales e insumos para la producción de sulfato de aluminio a partir de 1000 L de lodo.

Descripción	Unidad	Costo por unidad (USD)	Cantidad	Total (USD)
Lodo residual	L	ND ¹	1000	0
Ácido sulfúrico 96%	L	31,68	4,375	138,60
Agua destilada	L	0,68	13,13	8,93
Energía eléctrica	kW*h	0,09	22,50 ²	2,03
			Total	149,56

Nota: ¹ Se considera que el lodo residual no tiene costo debido a que es un desecho de la empresa. ² Costo aproximado de energía que utilizan 2 motores de mezcla y una bomba para la separación de fases

La empresa gasta un aproximado de 1,38 USD por litro de coagulante (policloruro de aluminio) o 0,72 USD por Kg de este. La producción de un litro del coagulante a partir del lodo costaría 0,15 USD, sin embargo habría que tener en cuenta que la producción de este coagulante estaría limitada por la cantidad de lodo que se obtenga. Durante el periodo de estudio se generó una media de 90,28 L (Tabla 2) de lodo en la planta del cual se recuperaría 65,35 L, si tenemos en cuenta que la planta opera con una media de 400 L de coagulante al día y el coagulante recuperado no remueve en las mismas dosis la turbiedad del agua ya que 10 ppm de policloruro de aluminio remueven 10 NTU de turbiedad, mientras que el coagulante reciclado reduce 10 NTU de turbiedad por 16 ppm de agregadas

Por tales condiciones la cantidad de sulfato de aluminio que se produciría a partir del lodo generado dentro de la planta, es insuficiente para tratar en su totalidad el caudal de agua cruda que llega a dicha planta, razón por la cual este podría ser utilizado como una alternativa cuando se obtenga el volumen suficiente para abastecer a la planta, en combinación con coagulante comercial dentro de la planta de tratamiento o ser almacenado como coagulante de reserva.

4.2.- Verificación de Hipótesis

Después de realizar el estudio y la interpretación de resultados, se obtuvo 72,44 % de recuperación de aluminio de los lodos generados en la planta de tratamiento “Casigana” como sulfato de aluminio. Después de verificar que este compuesto fue eficaz para reducir la turbidez y el color del agua del canal que trata la planta en concentraciones superiores a 40 ppm, para cumplir con los límites establecidos por la INEN 1 108:2011 se aceptó la hipótesis alternativa (Ha).

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1.- Conclusiones

El presente trabajo de investigación comprobó que el lodo generado de la planta de tratamiento “Casigana” puede ser aprovechado para la obtención de sulfato de aluminio como coagulante para sus procesos de clarificación.

De acuerdo con los parámetros físico-químicos de los lodos (Tabla 3), se determinó que los lodos presentaron características que permitieron su utilización como materia prima, para la obtención de sulfato de aluminio, principalmente por su alta concentración de aluminio ($982 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Se determinó que el mejor tratamiento para la recuperación más alta de aluminio (72,44 %) fue la reacción realizada a pH 1,5 durante 30 minutos (Tabla 4), obteniéndose una solución con concentración $908,8 \text{ mg L}^{-1}$. De acuerdo con el análisis estadístico existieron diferencias significativas entre todos los niveles del factor experimental pH y no existió diferencia significativa cuando el tiempo es mayor a 30 minutos.

Tras el análisis de las características físico-químicas del agua cruda del efluente de la planta de potabilización y la eficacia del coagulante, se determinó que las concentraciones de coagulante a probar en el ensayo de jarras serían de: 30-50 ppm para aguas ligeramente turbias, y superiores a 60 ppm para aguas mediana y altamente turbias.

Mediante el ensayo de jarras se estableció que la dosis que remueve el color y la turbidez del agua cruda para el cumplimiento de la norma INEN 1 108:2011, fue de 40 ppm.

5.2.- Recomendaciones

De aplicarse el proyecto se debe tomar las debidas precauciones con el uso de acido sulfúrico concentrado y seleccionar reactores que tengan una capacidad de soportar condiciones acidas por debajo de pH 2.

Se recomienda realizar un análisis de los sedimentos que se obtienen como residuo del proceso, para determinar el tiempo de secado una vez que se reduce su contenido de aluminio, posterior al proceso de acidificación.

Se recomienda hacer ensayos donde se utilice una combinación de los dos coagulantes policloruro de aluminio y sulfato de aluminio recuperado para determinar la eficacia de estos en conjunto.

Si se desea utilizar el sulfato de aluminio en efluentes distintos a los de la planta de tratamiento “Casigana”, se debería determinar las características físico químicas del agua cruda para fijar un rango adecuado en la dosis del coagulante en base a la eficiencia del coagulante expuesta en la figura 6.

MATERIAL DE REFERENCIA

- AEFA. (1997). *Clasificación del pH*. Recuperado el 2017, de AEFA: <https://aefa-agronutrientes.org>
- APHA. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21 ed.). Washington DC, USA: American Public Health Association.
- Baes, C., & Mesmer, R. (1976). *The Hydrolysis of Cations*. Recuperado el 2016, de <http://www.iaea.org/>
- Barrenechea, A. (2004). *Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua*.
- Bernier, R., & Alfaro, M. (2006). *biblioteca.inia*. Recuperado el 2016, de <http://biblioteca.inia.cl/>
- Berón, F. (1997). *Incidencia de los pre-tratamientos en medios gruesos en el tratamiento del agua químicamente coagulada*. Recuperado el 2016, de Bases.Bireme: <http://bases.bireme.br/>
- Bishop, M., Rolan, A., Bailey, T., & Cornwell, D. (1987). Testing of Alum Recovery for Solids Reduction and Reuse. *American Water Works Association* .
- Castrillón, D., & Giraldo, M. (2012). *Determinación de las Dosis Optimas del Coagulante Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B en Función De la Turbiedad y el Color para la Potabilización del Agua en la Planta de Tratamiento de Villa Santana*. Recuperado el 2016, de <http://sired.udenar.edu.co/>
- Chu, W. (1999). *Lead metal removal by recycled alum sludge*. Recuperado el 2016, de <http://www.sciencedirect.com/>

- Chulluncuy, N. (2000). *Tratamiento de Agua Coagulación y Floculación. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima SEDAPAL*. Recuperado el 2017, de www.sedapal.com.pe
- Cogollo, J. (2003). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclорuro de aluminio*. Recuperado el 2016, de *Revistas.unal*: <http://revistas.unal.edu.co/>
- Conquímica. (2014). *Ficha técnica de sulfato de aluminio tipo B líquido. Actualización 5*. Recuperado el 2017, de <http://www.conquimica.com/>
- Cornwell, D., & Susan, J. (1979). *Characteristics of Acid-Treated Alum Sludges*. Obtenido de American Water Works Association: www.awwa.org
- EPA. (1996). Method 3050b acid digestion of sediments, sludges, and soils. USA.
- Gregory, J., & Duan, J. (2001). *Hydrolyzing metal salts as coagulants*. Recuperado el 2017, de <https://www.researchgate.net>
- ICONTEC. (1995). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. NTE 531:1995 Productos Químicos para uso Industrial. Sulfato De Aluminio. Colombia.
- INEN. (1992a). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 1903:1992 Productos Químicos Industriales . Sulfato de Aluminio. Requisitos. Ecuador.
- INEN. (1992b). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 1905:1992 Productos Químicos Industriales . Sulfato de Aluminio. Determinación de materias insolubles en agua. Ecuador.
- INEN. (1992c). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 1906:1992 Productos Químicos Industriales. Sulfato de Aluminio. Determinación de la Basicidad y Acidez Libre. Ecuador.

- INEN. (1992d). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 1907:1992 Productos Químicos Industriales. Sulfato de Aluminio. Determinación soluble total. Ecuador.
- INEN. (1992e). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 1908:1992 Productos Químicos Industriales . Sulfato de Aluminio. Determinación del Hierro soluble total. Ecuador.
- INEN. (2014). NTE INEN 1108:2014 agua potable requisitos. Ecuador.
- ISO. (1973). International Standard ISO 2211:1973 Liquid chemical products. Measurement of colour in Hazen units (platinum-cobalt scale).
- ISO. (1999). International Standard ISO 7027:1999 Water quality — Determination of turbidity.
- Jewell, W. M. (1903). U.S. Patent No. 718,465. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Jiménez, B., Martínez, M., & Vaca, M. (2002). *bvsde.paho*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>
- Limón, J. (2013). *Los Lodos de las Plantas de Tratamiento De Aguas Residuales, ¿Problema O Recurso?* Recuperado el 2017, de <http://www.ai.org.mx/>
- Martínez, M., Jiménez, B., & Vaca, M. (2002). *bvsde.paho.org*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>

- Núñez, J., & Peña, M. (2011). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización de la empresa aguas de Cartagena S.A y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante. Cartagena, Colombia.
- Pavón, T., Pacheco, V., & Cárdenas, L. (2004). *bvsde.paho*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>
- Restrepo, H. (2009). Evaluación del Proceso de Coagulación – Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Colombia.
- Romero, J. (2002). *Purificación del Agua*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería .
- Ruíz, F. (2011). Utilización de los lodos generados en el proceso de potabilización del agua de la planta de tratamiento “casigana”, como aditivo para suelos de cultivo. *Tesis Pregrado* . Ambato, Ecuador.
- Sandoval , L., Palacios, L., Domínguez, M., Sánchez, L., Santana, M., & Morán, M. (1998). *Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>
- Sandoval, L., Martín, A., Piña, M., & Montellano, L. (2009). *Estudio piloto para reducir el volumen de lodos de plantas potabilizadoras*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>: bvsde.paho
- SenGupta, P., Cumbal, L., & Shantanu , G. (1997). *Selective Alum Recovery from Water Treatment Residuals*. Recuperado el 2016, de [waterrf: http://www.waterrf.org/](http://www.waterrf.org/)
- Serna, L., & Lopez, S. (2011). *Actualización del manual del laboratorio de análisis de alimentos del programa de tecnología química de la universidad tecnológica de Pereira* . Recuperado el 2017, de <http://repositorio.utp.edu.co/>

- Sinha, S., Yoon, Y., Amy, G., & Yoon, G. (2004). *Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes*. Recuperado el 2016, de scielo: www.scielo.org.co
- Tirado, A. (2013). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la calidad de agua que accede a la planta de tratamiento Casigana EP-EMAPA-A y estrategias para evitar su contaminación. Ambato, Ecuador.
- Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I*. Recuperado el 2016, de <http://www.bvsde.paho.org/>
- Villegas, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2005). *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua*. Recuperado el 2017, de <http://www.redalyc.org/>
- Westerhoff, G. (1973). Alum Recycling: An Idea Whose Time Has Come? *Water & Wastes Engineering* .
- Wurts, W., & Durborow, R. (1992). *Interactions of pH, Carbon Dioxide, Alkalinity and Hardness in Fish Ponds*. Recuperado el 2017, de <http://www2.ca.uky.edu>
- Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Recuperado el 2016, de <http://www.cofes.org.ar/>
- Zouboulis, A., Traskas, G., & Samaras, P. (2008). *Synthesis and coagulation performance of composite poly-aluminum-ferric-silicate-chloride coagulants in water and wastewater treatment and their potentially use to alleviate the membrane fouling in MBRs*. Recuperado el 2016, de www.researchgate.net

ANEXOS

Anexo 1

Ilustraciones de la fase experimental

Recolección de muestras

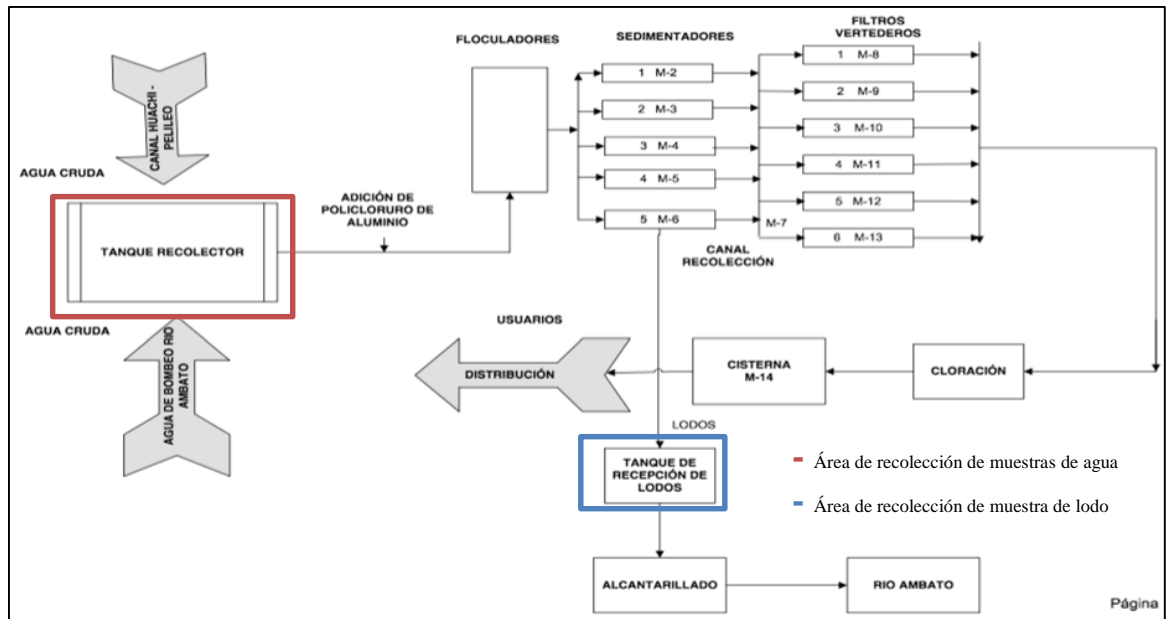


Figura 8 Diagrama de flujo de la planta "Casigana"

Fuente: (Ruíz, 2011)



Figura 9 Recolección de muestras

Nota: a. Lodo sedimentadores; b. Recolección de muestra de lodo; c. Agua cruda; d. Recolección de muestras de agua cruda

Proceso de Acidificación y separación de fases

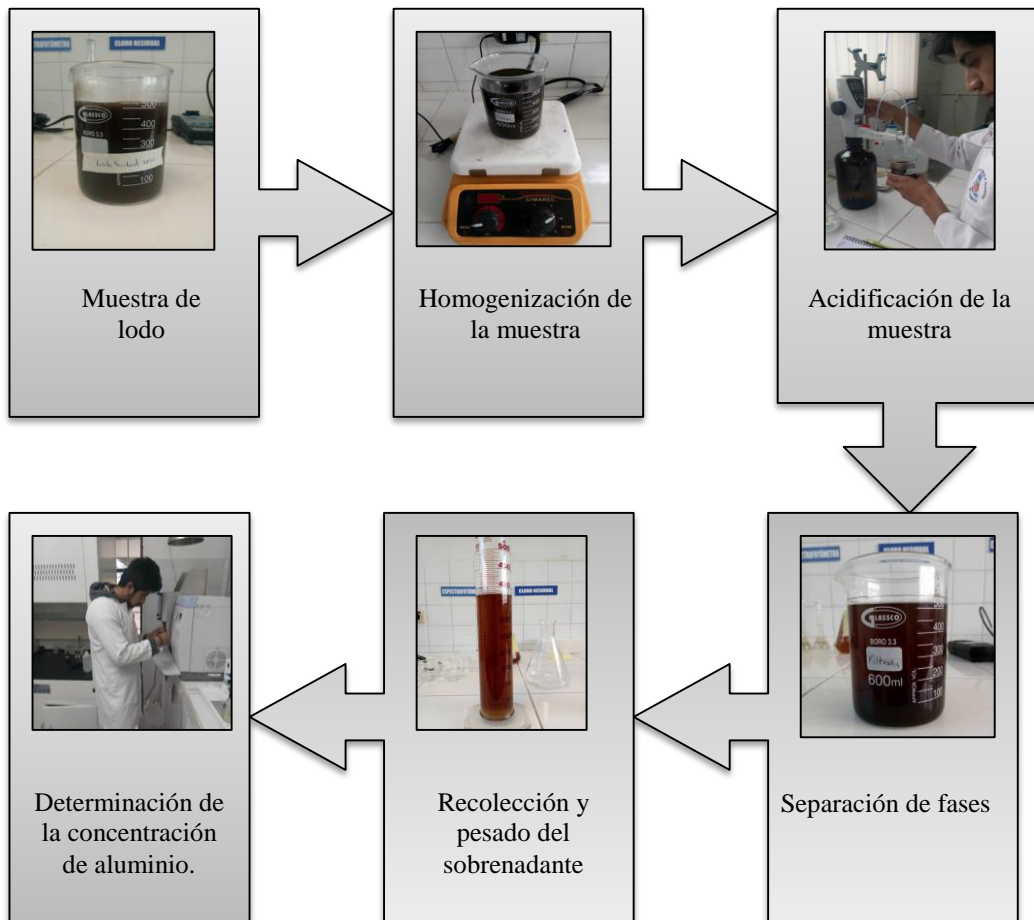


Figura 10 .Proceso de acidificación de lodo

Determinación de la eficiencia del coagulante

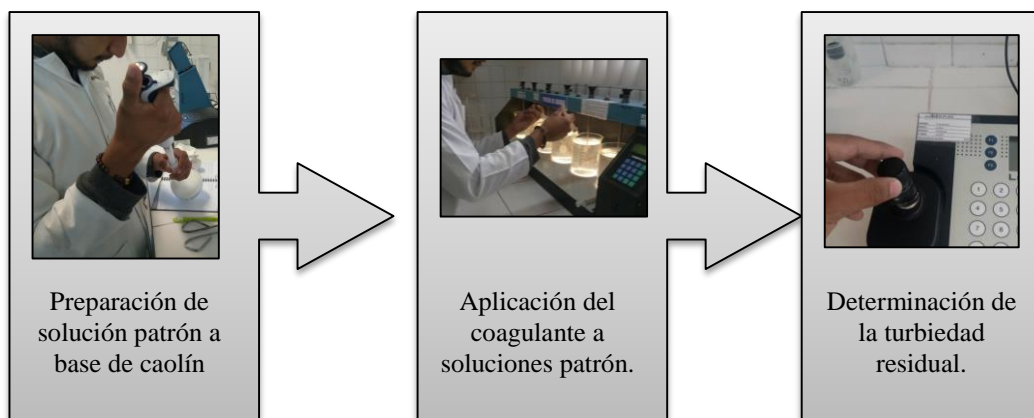


Figura 11. Proceso para la determinación de la eficiencia del coagulante

Anexo 2
Tablas de resultados

Tabla 8 Datos del proceso de acidificación de los lodos

pH	Tiempo de reacción (min)	mL de H ₂ SO ₄	ml sobrenadante	% reducción de lodo	Lectura por A.A. dilución 1/100	[Al] mg/L
3,5	5	2,6	185	37	4,073	407,3
3,5	30	2,6	255	51	4,157	415,7
3,5	90	2,6	265	53	4,158	415,8
2,5	5	5,2	240	48	4,934	493,4
2,5	30	5,2	305	61	5,109	510,9
2,5	90	5,2	310	62	5,280	528,0
1,5	5	8,7	295	59	8,478	847,8
1,5	30	8,7	385	77	9,094	909,4
1,5	90	8,7	385	77	9,003	900,3
3,5	5	2,6	180	36	4,063	406,3
3,5	30	2,6	250	50	4,153	415,3
3,5	90	2,6	255	51	4,152	415,2
2,5	5	5,2	255	51	4,934	493,4
2,5	30	5,2	315	63	5,105	510,5
2,5	90	5,2	315	63	5,278	527,8
1,5	5	8,7	295	59	8,486	848,6
1,5	30	8,7	380	76	9,082	908,2
1,5	90	8,7	385	77	9,001	900,1

Tabla 9 Análisis de Varianza para [Al] mg/L - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: pH	748294.00	2	374147.00	2368.36	0.0000
B: Tiempo de reacción (Min)	3697.01	2	1848.51	11.70	0.0015
C: Réplica	0.56	1	0.56	0.00	0.9531
Residuos	1895.72	12	157.97		
Total (Corregido)	753888.00	17			

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de [Al] mg/L en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre [Al] mg/L con un 95.0% de nivel de confianza.

Pruebas de Múltiple Rangos para [Al] mg/L por pH

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

pH	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3.5	6	412.6	5.13123	X
2.5	6	510.667	5.13123	X
1.5	6	885.733	5.13123	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1.5 - 2.5	*	375,07	19.413
1.5 - 3.5	*	473,13	19.413
2.5 - 3.5	*	98,07	19.413

Nota: * indica una diferencia significativa.

Análisis del Programa: En esta tabla se aplicó un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Pruebas de Múltiple Rangos para [Al] mg/L por tiempo de reacción (min)

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>tiempo de reacción (min)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
5	6	582,80	5,13	X
30	6	611,67	5,13	X
90	6	614,53	5,13	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
5 - 30	*	-28.8667	19.413
5 - 90	*	-31.7333	19.413
30 - 90		-2.86667	19.413

Nota: * indica una diferencia significativa.

Análisis del Programa: En esta tabla se aplicó un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 10 *Turbiedad residual de las muestras de agua y caolín*

Turbiedad [NTU]	Dosis aplicada de coagulante [ppm]					
	30	40	50	60	70	80
50	0,70	0,80	1,04	0,93	1,03	1,57
100	10,89	9,60	3,71	2,18	1,63	1,17
200	75,93	51,74	10,73	6,82	4,72	2,34

Tabla 11 *Caracterización del agua que trata la planta durante el periodo de investigación.*

Nº de ensayo	Turbiedad (NTU)	Color (UTC)	pH	Alcalinidad	Temperatura °C
1	9,99	20	7,9	117,60	12,90
2	7,46	25	8,03	121,20	12,60
3	19,06	40	8,08	134,90	14,20
4	7,22	25	6,4	122,60	15,50
5	7,94	25	8,32	133,40	13,30
6	11,30	25	8,32	124,00	13,90
7	26,70	30	8,21	129,80	12,80
8	7,30	20	8,34	128,20	12,70
9	7,06	25	8,34	139,80	14,60
10	16,20	30	8,23	139,00	13,10
11	18,00	35	8,04	126,20	14,10
12	17,20	30	8,26	120,60	13,90
13	14,40	30	8,19	126,20	13,70
14	21,10	40	8,21	122,80	13,80
15	10,60	35	8,05	121,40	13,70
16	6,30	25	8,16	132,80	12,10
17	6,67	30	8,28	136,80	13,80
18	10,80	25	8,21	135,00	13,70
19	6,80	25	8,16	132,80	12,10
20	11,1	15	7,79	130,20	14,60
21	4,22	15	8,30	128,20	14,80
22	4,75	25	8,02	133,00	15,30
23	6,52	20	7,71	142,00	15,20
24	6,25	25	7,98	128,20	14,50
25	4,18	25	8,36	150,00	14,60
26	7,01	20	8,04	138,10	14,10
27	15,36	20	8,01	134,00	14,80
28	4,57	20	8,05	124,00	14,20
29	20,83	25	7,98	122,20	13,90
30	5,06	25	8,08	134,80	13,70

Tabla 12 *Turbiedad residual del agua tratada.*

Dosis Sulfato de aluminio (ppm)	Turbiedad Final del agua (NTU)		
	30	40	50
1	3,67	2,9	2,83
2	3,59	2,06	1,9
3	6,43	3,56	3,45
4	4,56	2,22	1,95
5	5,85*	1,94	1,74
6	3,45	2,32	2,15
7	8,13*	4,23	3,99
8	3,16	2,04	1,86
9	3,65	1,98	1,76
10	5,67*	2,62	2,19
11	6,03*	3,19	2,77
12	5,87*	3,76	3,08
13	4,56	2,62	2,01
14	6,82	4,21	3,76
15	3,19	1,97	1,72
16	3,32	1,18	1,09
17	2,82	1,51	1,35
18	3,46	1,24	1,18
19	2,97	2,17	1,96
20	3,63	2,01	1,16
21	2,98	1,13	0,91
22	2,76	2,33	1,07
23	3,12	2,72	2,65
24	3,23	2,31	2,2
25	2,56	1,48	1,43
26	3,86	2,17	1,89
27	4,69	2,34	2,12
28	2,88	1,09	0,98
29	5,87*	3,15	2,97
30	2,57	1,23	1,12

Nota: * corresponden a turbiedades que superan el limite estipulado por la INEN 1 108:2011 de agua potable para color y turbiedad.

Tabla 13 *Color residual del agua tratada.*

Dosis Sulfato de aluminio (ppm)	Color final del agua (UTC)		
	30	40	50
1	10	5	2,5
2	5	5	2,5
3	15	5	2,5
4	5	5	2,5
5	5	5	2,5
6	10	5	2,5
7	15	10	5
8	5	2,5	2,5
9	7,5	2,5	2,5
10	12,5	5	2,5
11	12,5	5	2,5
12	12,5	5	2,5
13	10	5	2,5
14	15	5	2,5
15	7,5	5	2,5
16	5	5	2,5
17	5	5	2,5
18	10	5	5
19	7,5	5	2,5
20	10	5	2,5
21	5	2,5	2,5
22	5	2,5	2,5
23	7,5	5	2,5
24	7,5	5	2,5
25	5	2,5	2,5
26	5	2,5	2,5
27	12,5	5	5
28	5	2,5	2,5
29	15	10	5
30	7,5	5	2,5

Tabla 14 *Porcentaje de remoción de la turbiedad.*

Dosis Sulfato de aluminio (ppm)	% de remoción de turbiedad		
	30	40	50
1	63,26	70,97	71,67
2	51,88	72,39	74,53
3	66,26	81,32	81,90
4	36,84	69,25	72,99
5	26,32	75,57	78,09
6	69,47	79,47	80,97
7	69,55	84,16	85,06
8	56,71	72,05	74,52
9	48,30	71,95	75,07
10	65,00	83,83	86,48
11	66,50	82,28	84,61
12	65,87	78,14	82,09
13	68,33	81,81	86,04
14	67,68	80,05	82,18
15	69,91	81,42	83,77
16	47,30	81,27	82,70
17	57,72	77,36	79,76
18	67,96	88,52	89,07
19	56,32	68,09	71,18
20	67,30	81,89	89,55
21	29,38	73,22	78,44
22	41,89	50,95	77,47
23	52,15	58,28	59,36
24	48,32	63,04	64,80
25	38,76	64,59	65,79
26	44,94	69,04	73,04
27	69,47	84,77	86,20
28	36,98	76,15	78,56
29	71,82	84,88	85,74
30	49,21	75,69	77,87

Nota: En la tabla se muestran los porcentajes de remoción de la turbiedad calculado mediante la comparación de la turbiedad del agua cruda con la turbiedad residual

Tabla 15 *Análisis de varianza entre las concentraciones 30 y 40 ppm de sulfato de aluminio aplicadas al agua cruda de la planta “Casigana”.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Fuente
Entre Grupos	153,60	1	153,60	2,40	0.12	4,01
Dentro de Grupos	3705.13	58	63,88			
Total	3858.73	59				

La tabla de análisis de varianza muestra a sumatoria de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios y la razón F del análisis de datos y el valor crítico del mismo de la comparación entre las concentraciones de 40 y 50 ppm de sulfato de aluminio calculadas a través del programa STAT PLUS MAC.