



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES
DE GASES DE COMBUSTIÓN, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DOS POLIELECTROLITOS
FLOCULANTES, REALIZADA A NIVEL DE LABORATORIO**

Manuel Armando Fletes Ordoñez

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, junio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES
DE GASES DE COMBUSTIÓN, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DOS POLIELECTROLITOS
FLOCULANTES, REALIZADA A NIVEL DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL ARMANDO FLETES ORDOÑEZ
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES DE GASES DE COMBUSTIÓN, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DOS POLIELECTROLITOS FLOCULANTES, REALIZADA A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de agosto 2018.

Manuel Armando Fletes Ordoñez

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por acompañarme y bendecirme a lo largo de mi vida; darme fortaleza, paciencia y sabiduría durante esta etapa tan importante, para alcanzar mi meta de ser un profesional.
- Mis padres** Manuel Fletes y Geraldine de Fletes, por su apoyo incondicional, sus consejos y por alentarme a seguir siempre adelante. Por estar siempre presentes brindándome su amor, cariño y alegría.
- Mis hermanas** Ligia y Ana Lucia Fletes, por brindarme su apoyo y animarme en todo momento.
- Mi familia** Por estar siempre presentes y compartir cada uno de los momentos importantes en mi vida, por su apoyo constante, consejos y oraciones.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas y darme la oportunidad de formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por compartir todos sus conocimientos para mi crecimiento personal y profesional.
JARSA S.A.	Por permitirme desarrollar mi trabajo de investigación, brindándome todas las herramientas necesarias para lograrlo.
Asesor	Jorge Mario Estrada, por su ayuda y apoyo en la realización de mi informe final.
Mis amigos	Alejandro Borrayo, Quique González, Francisco García, Pablo Canto, Iván Girón, Delmy Tzum, Lisbeth Flores, Ernesto Carrillo, Astrid Cano, Teresita Campos, Tatiana Godínez, Jazmín Cardona, Jorge Marín por su compañía y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Bagazo	3
2.1.1. Calor específico del bagazo	4
2.1.2. Humedad en el bagazo	4
2.1.3. Porosidad del bagazo	4
2.1.4. Tamaño y forma de las partículas	5
2.1.5. Temperatura de ignición	6
2.2. Combustión	6
2.2.1. Combustión completa	6
2.2.2. Combustión incompleta	6
2.3. Residuos de la combustión	7
2.3.1. Mecanismo de formación de cenizas	7
2.3.2. Composición química de las cenizas	9
2.3.3. Clasificación de la ceniza	10
2.3.4. Calidad y cantidad de sólidos	10

2.4.	Sistemas de limpieza de gases	10
2.4.1.	Sistemas de limpieza de gases por vía seca	11
2.4.2.	Sistemas de limpieza de gases por vía húmeda	11
2.4.2.1.	Lavadores de gases	13
2.5.	Partículas en suspensión	14
2.5.1.	Afinidad de las partículas coloidales por el agua	14
2.5.2.	Carga eléctrica y doble capa	14
2.6.	Coagulación	15
2.6.1.	Factores que influyen en la coagulación	16
2.6.1.1.	Influencia de la temperatura	16
2.6.1.2.	Influencia del pH	16
2.6.1.3.	Influencia de las sales disueltas.....	17
2.6.1.4.	Influencia de la dosis del coagulante ...	17
2.6.1.5.	Influencia de la turbidez	18
2.7.	Floculación	18
2.7.1.	Tipos de floculación	18
2.7.2.	Floculantes	19
2.7.2.1.	Catiónicos.....	19
2.7.2.2.	Aniónicos	19
2.7.2.3.	Neutros	19
2.7.3.	Tipos de floculantes según su naturaleza química.....	20
2.7.3.1.	Floculantes inorgánicos	20
2.7.3.2.	Floculantes orgánicos naturales	20
2.7.3.3.	Floculantes orgánicos sintéticos	21
2.8.	Síntesis del copolímero de acrilamida y ácido acrílico.....	22
2.9.	Síntesis del copolímero de acrilamida y monómero cuaternario	23
2.10.	Sistemas duales	24

2.11.	Propiedades de los flóculos	25
2.11.1.	Tamaño y distribución del tamaño de los flóculos ...	27
2.11.1.1.	Índice de Willcomb	27
2.11.2.	Forma de los flóculos	28
2.11.2.1.	Factor de forma	28
2.11.2.2.	Redondez.....	28
2.11.2.3.	Relación de aspecto.....	28
2.11.2.4.	Radio de giro reducido	29
2.11.3.	Porosidad y permeabilidad del flóculo	29
2.11.4.	Estabilidad y resistencia de los flóculos	29
2.12.	Índice de filtrabilidad	30
2.13.	Prueba de jarras	30
3.	MARCO METODOLÓGICO	33
3.1.	Variables	33
3.1.1.	Variables dependientes.....	33
3.1.2.	Variables independientes.....	33
3.2.	Delimitación de campo de estudio	33
3.3.	Recursos humanos disponibles	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.4.1.	Equipo personal	34
3.4.2.	Cristalería y equipo	35
3.4.3.	Reactivos	35
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	35
3.5.1.	Técnica cualitativa	36
3.5.2.	Técnica cuantitativa	36
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	37
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38

3.8.	Análisis estadístico.....	38
3.8.1.	Número de repeticiones.....	39
3.8.2.	Media aritmética	39
3.8.3.	Varianza	40
3.8.4.	Desviación estándar	40
3.9.	Plan de análisis de los resultados	41
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables	41
3.9.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos.....	41
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	57
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICES	71
	ANEXOS	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mecanismo de formación de cenizas	8
2.	Sistema de captura de cenizas	12
3.	Lavador de gas	13
4.	Doble capa de una partícula coloidal.....	15
5.	Síntesis de copolímero de acrilamida y ácido acrílico	23
6.	Síntesis de copolímero de acrilamida y monómero cuaternario.....	24
7.	Sistema de floculación dual.....	25
8.	Factores que afectan las características de los flóculos	26
9.	Equipo de prueba de jarras	31
10.	Índice de Willcomb al adicionar floculante aniónico.....	44
11.	Tiempo de sedimentación al adicionar floculante aniónico.....	45
12.	Turbidez al adicionar floculante aniónico.....	46
13.	Resistencia del flóculo al adicionar floculante aniónico	47
14.	Índice de filtrabilidad al adicionar floculante aniónico	48
15.	Efecto sinérgico del tamaño del flóculo al utilizar las dosis adecuadas... ..	50
16.	Efecto sinérgico del tiempo de sedimentación al utilizar las dosis adecuadas	51
17.	Efecto sinérgico de la turbidez al utilizar las dosis adecuadas	52
18.	Efecto sinérgico de la resistencia del flóculo al utilizar las dosis adecuadas	53
19.	Efecto sinérgico de la filtrabilidad al utilizar las dosis adecuadas	54

TABLAS

I.	Composición del bagazo	3
II.	Tamaño de partícula y porcentaje de cenizas.....	5
III.	Propiedades generales de las cenizas	7
IV.	Composición química típica de las cenizas	9
V.	Principales características de floculantes poliméricos sintéticos.....	22
VI.	Índice de Willcomb	27
VII.	Índice de filtrabilidad.....	30
VIII.	Parámetros iniciales	37
IX.	Dosis óptima del floculante aniónico.....	38
X.	Índice de Willcomb al adicionar floculante aniónico	43
XI.	Tiempo de sedimentación al adicionar floculante aniónico	44
XII.	Turbidez al adicionar floculante aniónico.....	45
XIII.	Resistencia del flóculo al adicionar floculante aniónico.....	46
XIV.	Índice de filtrabilidad al adicionar floculante aniónico.....	47
XV.	Dosis adecuada del floculante aniónico de baja, mediana y alta carga	49
XVI.	Efecto sinérgico del tamaño del flóculo al utilizar las dosis adecuadas.....	50
XVII.	Efecto sinérgico del tiempo de sedimentación al utilizar las dosis adecuadas.....	51
XVIII.	Efecto sinérgico de la turbidez al utilizar las dosis adecuadas.....	52
XIX.	Efecto sinérgico de la resistencia del flóculo al utilizar las dosis adecuadas.....	53
XX.	Efecto sinérgico de la filtrabilidad al utilizar las dosis adecuadas	54
XXI.	Efecto sinérgico al utilizar las dosis adecuadas de los floculantes aniónicos.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S	Desviación estándar
°C	Grados Celcius
X_i	i-esimo valor de un conjunto de datos
X	Media aritmética
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
min	Minuto
n	Número de datos
N	Número de repeticiones
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
S²	Varianza

GLOSARIO

Agua cruda	Es el nombre que recibe el agua que no ha recibido tratamiento de ningún tipo y que generalmente se encuentra en fuentes y reservas naturales.
Bagazo	Residuo fibroso que queda de la caña de azúcar después de extraído su jugo.
Caldera	Máquina o dispositivo, generalmente metálico, que se utiliza en la industria para generar vapor.
Ceniza volante	Son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión.
Copolímero	Es una macromolécula compuesta por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos.
Floculación	Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Flóculo	Conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico.
Gases de combustión	Gases que salen de la chimenea de un horno después de la combustión. Pueden contener óxido de nitrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, óxidos de azufre, partículas y otros contaminantes.
Polielectrolitos	Son polímeros cuyos monómeros soportan un grupo electrolito, el cual al disociarse en agua queda como un polímero cargado. Existen de naturaleza policatiónica y polianiónica.
Scrubber	Se le conoce como lavador de gases. Es un dispositivo de control de la contaminación del aire que puede usarse para eliminar partículas y gases de corrientes de escape industriales.
Sistema dual	Los sistemas duales consisten en la combinación de dos tipos de polímero de diferente carga iónica (catiónico y aniónico), para lograr un efecto sinérgico en la floculación.
Sólidos en suspensión	Son un conjunto de partículas microscópicas, que pueden ser sólidas o líquidas, la cuales se encuentran suspendidas en un medio.

RESUMEN

El presente informe de graduación tiene contemplada la evaluación, a escala laboratorio, de un sistema dual de floculantes polielectrolitos de naturaleza catiónica y aniónica, en muestras de ceniza provenientes de un lavador de gas a partir de una prueba de jarras.

Primero se realizó un análisis previo a las muestras de cenizas con respecto al pH y el porcentaje de ceniza, a manera de verificar que las muestras tuvieran las mismas condiciones. Siendo estas pH entre 8 – 9 y porcentaje de ceniza del 3 %.

Luego, se procedió a determinar la dosis efectiva del floculante aniónico para el sistema dual en función de la turbidez, el tiempo de sedimentación, el tamaño del flóculo, la resistencia del flóculo y su índice de filtrabilidad. Se varió la dosificación del aniónico entre 1 – 6 ppm, mientras que la del catiónico se mantuvo a una concentración constante de 2,5 ppm. Asimismo, se cambió el tipo de floculante aniónico por uno de baja, mediana y alta carga.

Por último, se evaluó el efecto que presenta la adición del floculante aniónico sobre el catiónico a partir de los análisis anteriormente descritos.

Con los resultados obtenidos se determinó que la dosis efectiva para los tres floculantes aniónicos es de 1 ppm. En el caso del efecto sinérgico, los mejores resultados los obtuvo el floculante de mediana carga al presentar una mejora de 167 % en la turbidez, 25 % en el tamaño del flóculo, 16 % en la resistencia del flóculo y 48 % en el índice de filtrabilidad; únicamente para el

tiempo de sedimentación el efecto no presentó mejoría, al ser 40 % menos efectivo que al utilizar únicamente el floculante catiónico. Por lo tanto, se determinó que, si existe un efecto sinérgico al utilizar un sistema dual para las muestras de ceniza, pero que no se presenta en todas las propiedades.

OBJETIVOS

General

Evaluar un sistema de captura de cenizas volantes provenientes de gases de combustión.

Específicos

1. Determinar la dosis adecuada del floculante aniónico de baja, mediana y alta densidad de carga, al mantener una concentración fija de floculante catiónico, en función de la turbidez, tiempo de sedimentación, tamaño de flóculo, resistencia del flóculo formado e índice de filtrabilidad.
2. Cuantificar el efecto sinérgico del floculante aniónico sobre el catiónico, a partir de las propiedades del agua anteriormente descritas.
3. Verificar si hay una mejora en las propiedades del agua obtenida al adicionar un floculante aniónico al sistema ya existente.

Hipótesis

Hipótesis nula:

Con un nivel de significancia del 5 % se puede asegurar que no existe diferencia significativa en la turbidez, el tamaño del flóculo, resistencia del flóculo e índice de filtrabilidad del agua, al variar la dosis del floculante aniónico en un sistema dual de floculantes catiónico y aniónico.

Con un nivel de significancia del 5 % se puede asegurar que no existe diferencia significativa en la turbidez, el tamaño del flóculo, resistencia del flóculo e índice de filtrabilidad del agua, al variar la carga del floculante aniónico.

Hipótesis alternativa:

Con un nivel de significancia del 5 % se puede asegurar que existe diferencia significativa en la turbidez, el tamaño del flóculo, resistencia del flóculo e índice de filtrabilidad del agua, al variar la dosis del floculante aniónico en un sistema dual de floculantes de naturaleza catiónico y aniónico.

Con un nivel de significancia del 5 % se puede asegurar que existe diferencia significativa en la turbidez, el tamaño del flóculo, resistencia del flóculo e índice de filtrabilidad del agua, al variar la carga del floculante aniónico.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la actividad industrial, esta es utilizada para diversos usos, como: agente para limpiar, calentar, enfriar, producir vapor y como materia prima. El incremento del valor del agua se ha magnificado en los últimos años, la disponibilidad del agua cada vez es menor, por lo que se debe de aprovechar al máximo este recurso. La identificación y evaluación de los diversos consumos de agua, la introducción de técnicas y equipos ahorradores de agua, la información y participación de los trabajadores en las buenas prácticas del uso del agua, son responsabilidades que las industrias deben tener sobre la gestión del agua.

En la actualidad, las industrias nacionales e internacionales se encuentran inmersas en proyectos de mejora u optimización de procesos, con el fin de lograr óptimos niveles de eficiencia y efectividad al menor costo posible, que les permita ser competitivos, rentables y que se diferencien de su competencia por su calidad de procesos.

Para ello, el ingenio azucarero busca el evaluar su sistema de captura de ceniza a partir del uso de un sistema dual de floculantes polielectrolitos, que ayude a mejorar las propiedades del flóculo, cumpliendo con los requerimientos necesarios en cuanto a tamaño, resistencia y filtrabilidad. Con dicho sistema se espera el poder separar la mayor cantidad de ceniza del agua, y de esta manera el aprovechamiento de cada una de las partes, la ceniza como abono y el agua como líquido aspersionador para el lavador de gas.

1. ANTECEDENTES

Alrededor del mundo se han realizado investigaciones sobre temas relacionados con el uso de sistemas de floculación dual para el tratamiento de aguas y para aplicaciones en procesos industriales. A continuación, se mencionan algunas investigaciones y trabajos que detallan sobre el uso de este tipo de sistema.

En el año 2008, Luis Miguel Sánchez, Ángeles Blanco, Elena Fuente y Carlos Negro; presentaron la investigación titulada *Evaluación de un sistema de floculación dual como una nueva alternativa para la fabricación de fibra-cemento*, donde determinaron que el sistema dual mejoró el tamaño y el proceso de retención de los flóculos, no obstante, las partículas coloidales fueron menos estables.

En el año 2009, Xiang Yu P, presentó una investigación titulada *Floculación mejorada mediante la aplicación de floculantes dobles*, donde evaluó el uso simultáneo de dos polímeros, sulfato de poliestireno y poliacrilamida catiónica, los cuales mejoraron la floculación de suspensiones de alúmina.

En el año 2015, Ozkan, Oner, Onen y Duzyol; presentaron la investigación titulada *Floculación de la suspensión de carbón con sistemas de polímero mono / dual y contribución de los iones Ca (II) / Mg (II)*, donde determinaron que con el sistema dual de floculantes se alcanzan altos rendimientos de floculación a bajas concentraciones.

En el año 2016, María Rasteiro, Fernando García, David Hunkeler e Ineide Pinheiro; presentaron la investigación titulada *Evaluación del rendimiento de sistemas duales de polielectrolitos sobre la capacidad de refloculación de los agregados de carbonato de calcio en medio turbulento*, donde señalaron que el sistema dual mejora el proceso refloculación.

En el mismo año, Ligia Ulín; presentó su trabajo de graduación titulado *Evaluación del rendimiento del almidón de yuca (Manihot esculenta) modificado con hidróxido de sodio en mezclas con diferentes coagulantes inorgánicos, en comparación con la poliamina N-50*, donde determinó que las mezclas de almidón de yuca con diversos coagulantes ayudan a remover la turbiedad y color, sin embargo, no se evaluó el efecto con polímeros sintéticos.

En enero del 2017, Ying Zhu, Xiaoli Tan y Qi Liu; presentaron la investigación titulada *Floculantes poliméricos dobles para tratar y deshidratar los residuos finos maduros de las operaciones de arenas petrolíferas*, donde evaluaron el uso de dos polímeros, los cuales mejoraron el rendimiento de filtrado y deshidratación de residuos finos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Bagazo

El bagazo es un residuo fibroso del proceso de extracción de la caña de azúcar. Este está constituido por agua, fibra, sólidos solubles y cenizas.

Tabla I. **Composición del bagazo**

Elemento	Porcentaje
Carbono	23 %
Oxígeno	22 %
Hidrógeno	3 %
Cenizas	2 %
Agua	50 %

Fuente: GARCÉS, Rosa. y MARTÍNEZ, Sandra. *Estudio del poder calorífico del bagazo de la caña de azúcar*. p. 20.

El bagazo presenta elementos y compuestos clasificados como: materia mineral y materia vegetal. Entre los constituyentes minerales se encuentra el silicio, magnesio, calcio, sodio, potasio, óxidos de azufre, hierro, entre otros. Por su parte los constituyentes vegetales son hojas secas, hojas verdes, cogollos, chulquines y cepas.

2.1.1. Calor específico del bagazo

Los ingenios azucareros utilizan el bagazo de la caña de azúcar como combustible para la generación de energía dado el gran poder calorífico que presenta. Es por ello, que su calor específico es considerado como una de sus propiedades más importantes, la cual depende principalmente de la humedad, el contenido de azúcar, el contenido de cenizas y la variedad de la caña.

El poder calorífico del bagazo cuando este presenta un 50 % de humedad se encuentra alrededor de los 3 000 Btu (19,200 KJ/Kg).

2.1.2. Humedad en el bagazo

La humedad es la propiedad más importante que afecta el poder calorífico del bagazo, retardando la cinética de las reacciones. El agua contenida en el bagazo existe de dos formas, como agua libre y agua ligada. La primera es la que predomina mayormente y se libera con gran facilidad. En cambio, el agua ligada requiere de una mayor intensidad de calentamiento para su eliminación, e incluso puede seguir presente a temperaturas que carbonizan al bagazo.

2.1.3. Porosidad del bagazo

La porosidad en un material es la relación entre el volumen de todos los poros y el volumen total. Los materiales porosos durante un proceso de combustión permiten la difusión y liberación de los productos formados, exhibiendo un comportamiento de volatilización. Por el contrario, los materiales poco porosos retardan los procesos de difusión y liberación, aumentando los tiempos de residencia de los productos y dificultando las reacciones con el oxígeno.

A partir de diversas investigaciones se ha determinado que conforme el tamaño de las partículas se reduce, se incrementa su densidad y el contenido de cenizas en las mismas.

Tabla I. **Tamaño de partícula y porcentaje de cenizas**

Tamaño partícula	Humedad bagazo	Cenizas
mm	%	%
d > 4.75	34	1.3
0.85 < d < 4.75	44	1.6
0.45 < d < 0.85	15	2.3
0.25 < d < 0.45	4	13
d < 0.25	3	27.7

Fuente: ALDERETES, Carlos. *Calderas a bagazo*. p. 39.

2.1.4. Tamaño y forma de las partículas

El tamaño de las partículas de bagazo oscila entre 1 – 5 mm hasta un máximo de 25 mm de longitud, un ancho entre 0,3 a 10 mm y un espesor entre 0,1 a 5 mm. La morfología y la granulometría del bagazo son complejas, porque varía desde partículas muy finas hasta partículas grandes y partículas de forma irregular. Las fibras pueden ser asemejadas a partículas cilíndricas.

2.1.5. Temperatura de ignición

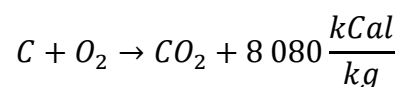
Es la temperatura a partir de la cual el calor generado por la propia combustión puede autosustentar el proceso de quemado sin la ayuda de una fuente externa. El valor de esta temperatura depende del contenido de compuestos volátiles, cenizas, humedad, concentración de oxígeno y otras condiciones propias del sistema de combustión.

2.2. Combustión

La combustión es una reacción química exotérmica de oxidación en la que los elementos combustibles (C, H, S, entre otros), reaccionan con oxígeno para producir los gases de combustión y cenizas. En el caso de los ingenios azucareros, los agentes reaccionantes son el bagazo y el aire de combustión y los productos son los gases de combustión y cenizas.

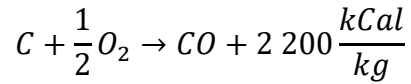
2.2.1. Combustión completa

La combustión completa del carbono con oxígeno forma dióxido de carbono y libera calor. La reacción se expresa mediante la siguiente ecuación:



2.2.2. Combustión incompleta

Una combustión es incompleta cuando los gases producidos por la reacción todavía son capaces de ser oxidados en una segunda o tercera reacción.



2.3. Residuos de la combustión

El residuo en la combustión del bagazo y cualquier material son las cenizas, estas contienen todos los componentes inorgánicos del combustible mezclados con escorias y partículas de bagazo o del material no quemado.

Tabla II. **Propiedades generales de las cenizas**

Densidad relativa cenizas secas (kg/m ³)	Densidad relativa cenizas húmedas (kg/m ³)	Ph	Calor específico Kcal/kg °C	Color
570 – 650	730 – 850	11,5 – 12	0,2 – 0,3	Blanco a grisáceo oscuro

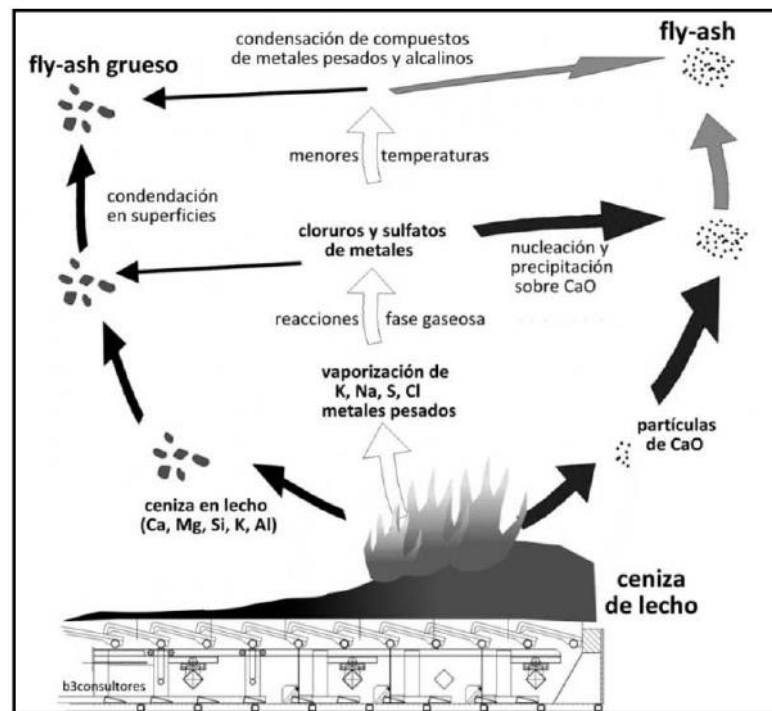
Fuente: ALDERETES, Carlos. *Calderas a bagazo*. p. 47.

2.3.1. Mecanismo de formación de cenizas

Durante el proceso de combustión del bagazo se forman dos tipos de cenizas dependiendo de la procedencia de los compuestos inorgánicos. Las cenizas inherentes están constituidas a partir de las sales distribuidas de manera homogénea en la biomasa del bagazo. La ceniza foránea está compuesta por partículas minerales de la tierra que se han introducido durante la cosecha y el transporte de la caña.

Una fracción de las cenizas inherentes pasa a formar parte de la fase gaseosa junto a los gases de combustión, debido a características del combustible y la atmósfera alrededor de la partícula.

Figura 1. **Mecanismo de formación de cenizas**



Fuente: MELISSARI, Blas. *Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa*. p. 71.

“La densidad y el tamaño de las partículas nucleadas, la tecnología usada y la velocidad de los gases de combustión, son factores que pueden llegar a arrastrar a las cenizas precipitadas hacia la fase gaseosa, formando lo que se denomina ceniza tipo fly-ash (ceniza volante).”¹

¹ MELISSARI, Blas *Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa*. p. 71.

2.3.2. Composición química de las cenizas

“La composición de la ceniza varía dependiendo del tipo de biomasa. Por lo general, las cenizas están compuestas mayoritariamente por óxido de sílice (SiO_2) y óxido de calcio (CaO), y en menor cantidad por otros óxidos como los de potasio, aluminio, magnesio y fósforo.”²

Tabla III. Composición química típica de las cenizas

	chip madera	corteza	cereales
ceniza total	< 2%	3% - 8%	5% - 10%
Composición ceniza, %			
SiO₂	25	25	35-60
Al₂O₃	5	7	2
Fe₂O₃	2	4	2
CaO	45	40	7
MgO	5	7	3
K₂O	5	5	20-30
P₂O₅	4	2	6
Contenido de metales pesados en cenizas, en ppm			
Pb	25	25	10
Cd	5	5	1
Zn	400	600	250
V	40	60	5
Cr	50	150	15
Ni	60	100	4

Fuente: MELISSARI, Blas. *Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa*. p. 72.

² MELISSARI, Blas *Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa*. p. 72.

2.3.3. Clasificación de la ceniza

Se distinguen dos tipos de ceniza:

- Cenizas secas de fondo: corresponden a las acumuladas y recogidas en el hogar de las calderas.
- Cenizas secas volantes: son más livianas, arrastradas por los gases y recolectadas en los diferentes sistemas de captación de partículas.

2.3.4. Calidad y cantidad de sólidos

Los sólidos residuales de la combustión comprenden ceniza, gran cantidad de material no quemado y residuos minerales del suelo como arena y arcilla.

La cantidad de ceniza esperada está relacionada a la capacidad de generación de vapor de la caldera; la cantidad de bagazo mal quemado depende de la eficiencia de la caldera, la cual depende del tipo y de las condiciones operacionales del equipo y los sólidos minerales dependen de los procesos de cosecha, transporte y lavado de la caña.

“La calidad de los residuos sólidos varían respecto las diferentes características de la caña; asimismo de la densidad y granulometría de las partículas, las cuales afectan significativamente el comportamiento en los procesos de separación.”³

2.4. Sistemas de limpieza de gases

³ VAZ, Cláudio., STAMILE, Sérgio. y DA SILVA, José. *Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de calderas*. p. 2.

Los sistemas de limpieza de gases son equipos que controlan la cantidad de partículas sólidas expulsadas al medio ambiente. Estos sistemas de limpieza de gases pueden ser del tipo vía seca o vía húmeda.

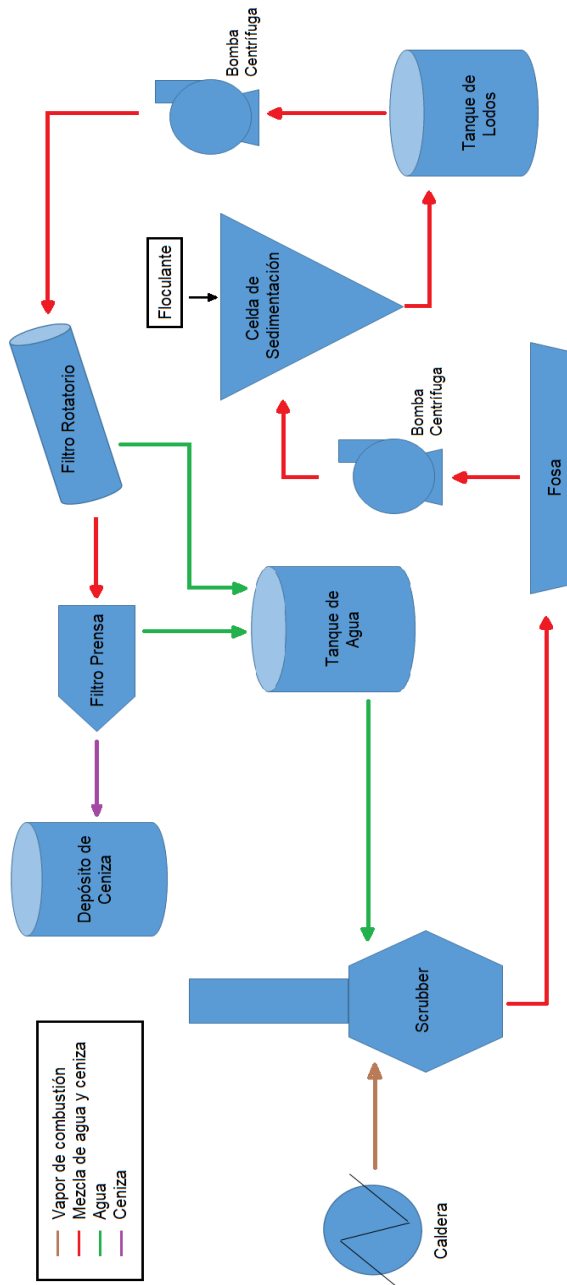
2.4.1. Sistemas de limpieza de gases por vía seca

Los sistemas de limpieza de gases por vía seca presentan la ventaja utilizar un tratamiento que evite la producción de aguas residuales, pero exhibe la desventaja de aumentar el volumen de residuos sólidos, porque en la eliminación de gases ácidos se dosifica hidróxido de calcio en polvo para neutralizar este tipo de gases. Los sistemas de separación por vía seca son adecuados cuando los residuos sólidos no deben estar en contacto con un líquido, porque la presencia de sustancias líquidas llevaría a una rápida obstrucción de los medios filtrantes, como es el caso de los detergentes por la formación de espuma. Entre los equipos de limpieza por vía seca se encuentran los ciclones, los electrofiltros y los filtros de mangas.

2.4.2. Sistemas de limpieza de gases por vía húmeda

En los sistemas de limpieza de gases por vía húmeda se utiliza un líquido, ya sea agua u otra solución acuosa, para arrastrar las partículas y contaminantes de los gases. Estos sistemas pueden neutralizar gases ácidos al aplicar agua con un producto alcalino. Entre los equipos de limpieza por vía húmeda se encuentran las torres de lavado y los lavadores Venturi.

Figura 2. Sistema de captura de cenizas



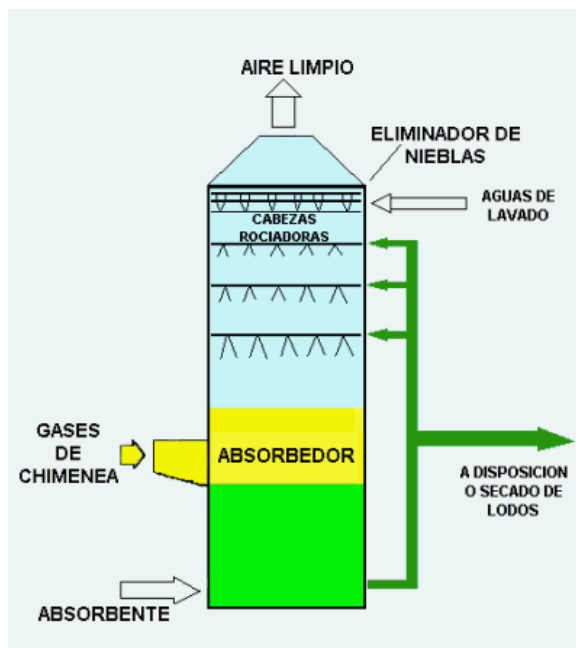
Fuente: elaboración propia, empleando Creatly.

2.4.2.1. Lavadores de gases

Los lavadores de gases tipo de vía húmeda son sistemas utilizados ampliamente para la eliminación de polvos, nieblas, vapores y olores, así como para la neutralización de gases tóxicos; a partir de un medio líquido que atrapa la mayor cantidad de estas partículas volantes presentes en los gases de combustión, evitando que estas sean expulsadas al medio ambiente.

El líquido lavador puede ser agua, aceite, una solución alcalina o agua ozonizada dependiendo de los contaminantes a eliminar.

Figura 3. Lavador de gas



Fuente: COLOCH, Lester. *Propuestas para el montaje de una planta de tratamiento de cenizas contenidas en el agua proveniente de lavadores de gases de combustión de calderas en central agro industrial guatemalteca S.A.* p. 28.

2.5. Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión son un conjunto de partículas microscópicas que pueden ser sólidas o líquidas, las cuales permanecen suspendidas en un medio, ya sea líquido o gaseoso. Las partículas en suspensión tienen un tamaño y una composición variable, y muchas de ellas son perjudiciales para la salud y para el medio ambiente. Entre estas partículas se encuentran las cenizas, el hollín, el polvo, la niebla, las nubes, el humo, entre otros.

2.5.1. Afinidad de las partículas coloidales por el agua

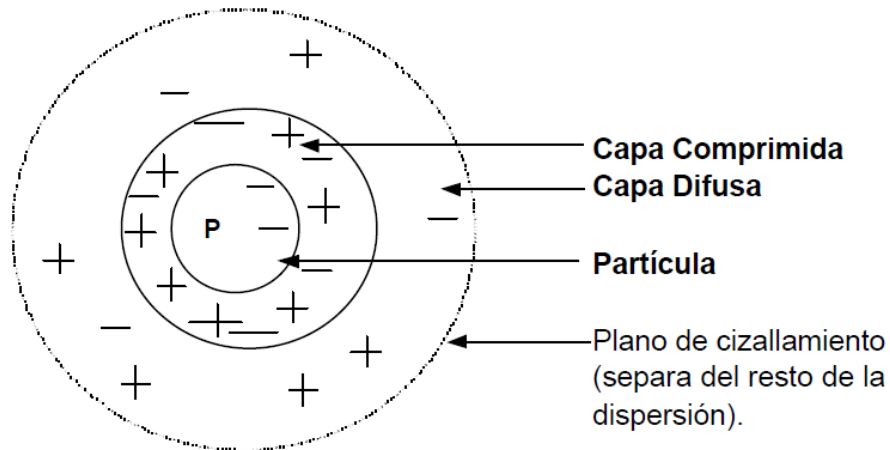
Las partículas coloidales pueden presentar afinidad o no afinidad por el agua, es decir que pueden ser hidrofílicas o hidrofóbicas, respectivamente.

Los coloides hidrofílicos poseen afinidad por el agua, por lo tanto, se dispersan y son rodeadas por moléculas de agua, evitando de esta manera que las partículas choquen entre ellas e incrementen su tamaño, es decir que son estables en este medio. Los coloides hidrofóbicos no poseen afinidad por el agua, lo que hace que se separen de ella, por lo que requieren de algún medio químico y físico para estabilizarse.

2.5.2. Carga eléctrica y doble capa

Las partículas coloidales son las causantes del color y la turbidez de las aguas superficiales, por lo que los procesos de tratamiento del agua están orientados a la remoción de estas. Las partículas coloidales presentan una carga eléctrica negativa sobre su superficie, las cuales atraen los iones positivos del agua causando una fuerte adherencia entre estos.

Figura 4. **Doble capa de una partícula coloidal**



Fuente: CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. p. 8.

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula forman la capa adherida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa. Esto origina un gradiente de potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

2.6. El potencial Z, es una medida de la carga superficial de las partículas en suspensión y guarda una estrecha relación con la estabilidad coloidal de las suspensiones. Mientras mayores sean las dimensiones de la doble capa eléctrica, mayor será la estabilidad de la suspensión y será mayor el valor del potencial Z.

Z.Coagulación

La coagulación es un proceso en el que las partículas coloidales son desestabilizadas por acción química, al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas por la adición de coagulantes.

2.6.1. Factores que influyen en la coagulación

Durante la coagulación es importante tener en cuenta que la variación de alguno de los siguientes factores puede afectar el rendimiento del proceso:

El tipo de coagulante a utilizar, la temperatura, el pH, la turbidez, las sales disueltas, las condiciones de la mezcla, los tipos de mezcla y el color.

La dependencia entre cada uno de estos factores permite predecir cuales son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua.

2.6.1.1. Influencia de la temperatura

El variar la temperatura del agua afecta directamente la energía cinética de las partículas en suspensión, ocasionando que el proceso de coagulación se lleve a cabo de manera más lenta.

El elevar la temperatura del agua desfavorece el proceso de desestabilización de las partículas; mientras que el disminuirla provoca el aumento de la viscosidad del agua, dificultando la sedimentación del flóculo.

2.6.1.2. Influencia del pH

La medición del pH durante el proceso de coagulación es de suma importancia, debido a que cada tipo de muestra exhibe un rango de pH óptimo dada la naturaleza de los iones y la alcalinidad del agua. La velocidad de coagulación se ve afectada debido a ello.

El tipo de coagulante a utilizar dependerá fuertemente del rango de pH y de la naturaleza del agua a tratar. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante, incrementando la dosis requerida.

2.6.1.3. Influencia de las sales disueltas

Las sales contenidas dentro del agua modifican los siguientes parámetros durante la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

2.6.1.4. Influencia de la dosis del coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar durante la coagulación afecta directamente la eficiencia del proceso.

- Si la dosificación del coagulante es poca: la carga de la partícula no se neutraliza totalmente, ocasionando una escasa formación de microflóculos y elevando la turbidez residual del medio.
- Si la dosificación del coagulante es alta: la carga de la partícula se invierte, formando gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto, la turbidez residual es igualmente elevada.

2.6.1.5. Influencia de la turbidez

La turbidez es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido, esta se encuentra en función del número, tamaño y la forma de estas. Este parámetro se mide partir de la incidencia de un rayo de luz al medio, que por el efecto Tyndall, muestra la dispersión de las partículas.

2.7. Floculación

La floculación es el proceso de aglomeración de las partículas desestabilizadas formando microflóculos y posteriormente aglomerados voluminosos llamados flóculos.

2.7.1. Tipos de floculación

- Floculación Pericinética: “Se produce por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.”⁴
- Floculación Ortocinética: “Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua. Luego de que esta es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para ello se produce primero la floculación pericinética y posteriormente la floculación ortocinética.”⁵

⁴ DÍAZ, José. *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas*. p. 24.

⁵ *Ibíd.*

2.7.2. Floculantes

Los floculantes por lo general son polímeros o polielectrolitos de moléculas orgánicas solubles en agua con pesos moleculares muy elevados, formadas por bloques denominados monómeros y repetidos en cadenas largas.

2.7.2.1. Catiónicos

Los floculantes catiónicos están cargados positivamente y por lo tanto atrapan o coagulan moléculas que tengan carga negativa. Los polímeros catiónicos pueden utilizarse como agentes coagulantes para la neutralización de cargas, para la formación de puentes o para ambas. El rango óptimo de pH para la aplicación de estos polímeros suele estar entre 4 y 8 valores de pH.

2.7.2.2. Aniónicos

Los floculantes aniónicos están cargados negativamente. Al agregarlos en un medio a tratar, los grupos activos se enlazan electrostáticamente a las partículas con carga positiva. Este tipo de polímeros son los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales por coagulación-floculación y suelen aplicarse a un pH básico, generalmente entre 6 y 10.

2.7.2.3. Neutros

Este tipo de polímeros presentan un comportamiento eléctricamente neutro, por lo que son capaces de adsorber tanto las partículas positivas como las negativas y son especialmente eficaces a un pH inferior a 6, algunos también pueden trabajar efectivamente a pH entre 6 y 10.

2.7.3. Tipos de floculantes según su naturaleza química

Según la naturaleza química de los floculantes estos se pueden clasificar en inorgánicos y orgánicos. Estos últimos se subdividen en orgánicos naturales (polisacáridos) o sintéticos (polímeros) que tienen grupos activos distribuidos a lo largo de su cadena.

2.7.3.1. Floculantes inorgánicos

Son sales solubles en agua y formadas normalmente por cationes polivalentes, siendo las más utilizadas las sales de hierro, de aluminio y la sílice.

2.7.3.2. Floculantes orgánicos naturales

Este tipo de floculantes son compuestos orgánicos de origen biológico, derivados principalmente del almidón y la celulosa, extractos vegetales, alginatos (extractos de algas), ciertas gomas, guar y quitosán.

“Los polielectrolitos naturales pueden tener propiedades catiónicas como el quitosán y el almidón; aniónicas como los polisacáridos sulfatados y sus derivados; y no iónicas como ciertos derivados del almidón y de la celulosa, galactomanosa, y gelatinas.”⁶

⁶ CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. p. 35.

2.7.3.3. Floculantes orgánicos sintéticos

Los polielectrolitos, son cadenas repetidas y largas de unidades monoméricas que se utilizan para el tratamiento de aguas. Pueden contener uno o varios tipos de monómero y estar enlazadas en una configuración lineal o ramificada. Cada uno de estos polímeros puede diferir en el peso molecular al variar el número de total de subunidades. Los grupos funcionales están localizados periódicamente a lo largo de la cadena y pueden poseer una carga negativa, positiva o neutra.

La característica más importante de los polielectrolitos es su densidad de carga, esta hace referencia a la concentración de cargas positivas o negativas por unidad de peso del polímero o como porcentaje del contenido de monómeros ionizados en este.

La densidad de carga se encuentra en función del tipo de polímero, la cantidad de polímero en el producto, la concentración del producto y del pH de la disolución.

Otros factores que afectan el funcionamiento del polielectrolito son el peso molecular, la naturaleza polar de los enlaces no iónicos en la molécula, el tamaño y la geometría molecular. Según el peso molecular se pueden clasificar como polímeros de bajo, mediano, alto y muy alto peso molecular.

Tabla IV. **Principales características de floculantes poliméricos sintéticos**

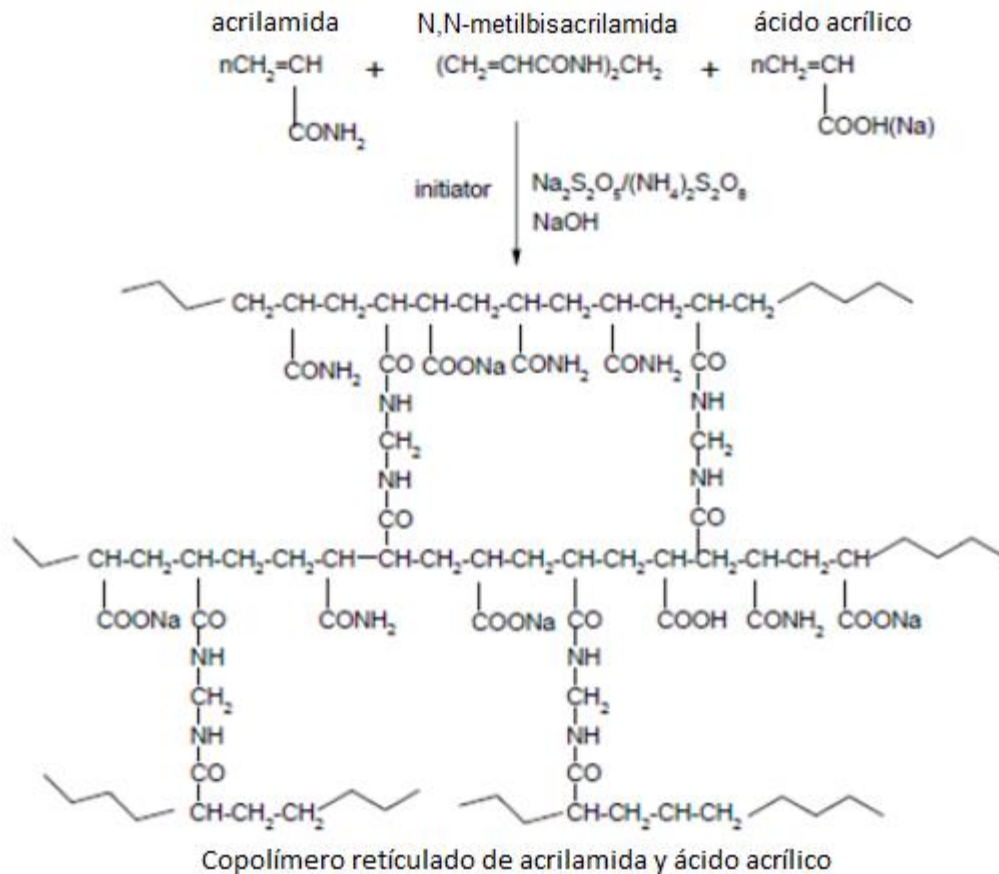
Características	Categorización	
Naturaleza de las cargas	Anfotérico / Aniónico / Catiónico / No iónico	
Peso molecular	Bajo	1 – 3 millones
	Medio	3 – 6 millones
	Estándar	6 – 10 millones
	Alto	10 – 15 millones
	Muy alto	Mayor de 15 millones
Densidad de carga	Bajo	1 – 10 %
	Medio	10 – 40 %
	Alto	40 – 80 %
	Muy alto	80 – 100 %

Fuente: LEE, Chai., ROBINSON, John. y CHONG, Mei. *A review on application of flocculants in wastewater treatment*. p. 8.

2.8. Síntesis del copolímero de acrilamida y ácido acrílico

La síntesis del copolímero empieza por la polimerización de radicales libres de los monómeros de acrilamida y ácido acrílico, añadiendo a estos un agente de sintetización siendo el N,N-metilbisacrilamida (MBA). Dada que la cinética de reacción del copolímero es lenta, se le añade un agente catalítico como la metabisulfita sódica o el persulfato de potasio. Posteriormente, la mezcla se calienta a 45 °C durante 4 horas para permitir la polimerización y el hidrogel. Luego, el copolímero de hidrogel obtenido se rompe en tamaños pequeños y se sumerge en agua desionizada para eliminar los monómeros residuales. Por último, las muestras de copolímero se secan al vacío en un horno a 60 – 80 °C hasta que el peso de la muestra permanezca constante, obteniéndose así un polvo blanco de copolímero de acrilamida y ácido acrílico.

Figura 5. **Síntesis de copolímero de acrilamida y ácido acrílico**

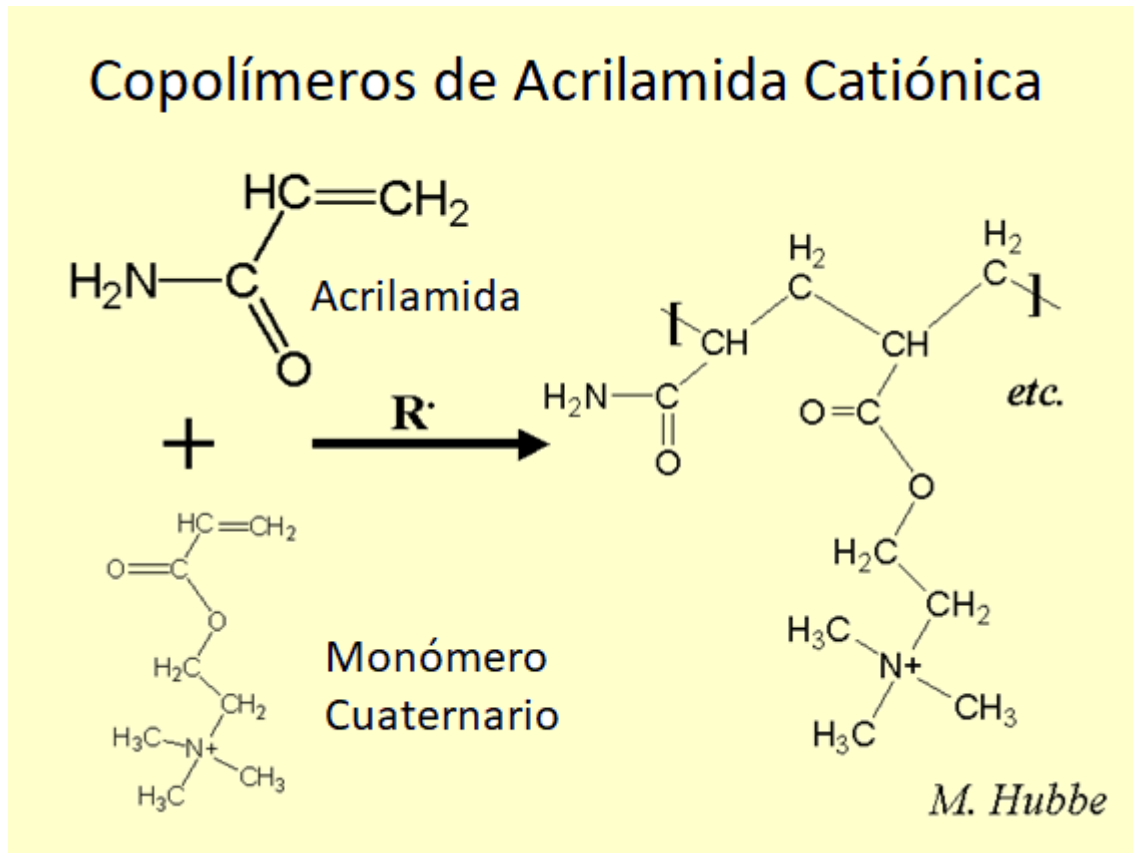


Fuente: ZHANG, Yudong. *Preparation of copolymers of acrylic acid and acrylamide*. p. 45.

2.9. Síntesis del copolímero de acrilamida y monómero cuaternario

El copolímero de acrilamida y monómero cuaternario se sintetiza a partir de la polimerización de radicales libres de los monómeros de acrilamida y los del monómero cuaternario. La mezcla se realiza en un medio de persulfato de postio y se calienta a 50 °C para permitir la polimerización de los monómeros, de este modo se obtiene el copolímero.

Figura 6. **Síntesis de copolímero de acrilamida y monómero cuaternario**

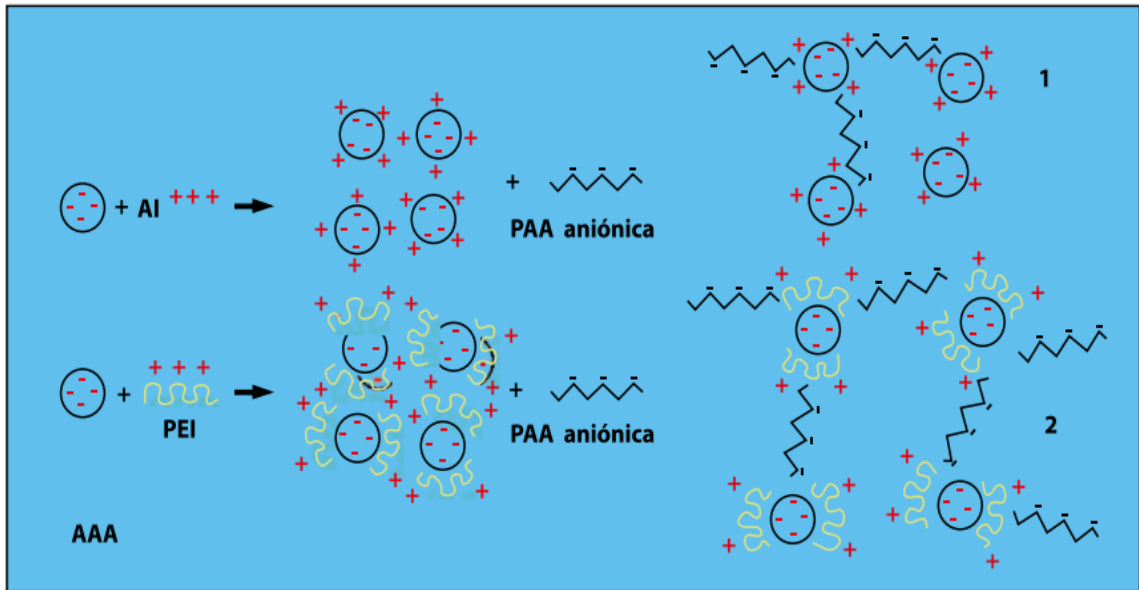


Fuente: HUBBE, Martin. *Copolímeros de acrilamida*. p. 23.

2.10. Sistemas duales

Los sistemas duales consisten en la combinación de dos tipos de polímero de diferente carga iónica (catiónico y aniónico), para lograr un efecto sinérgico en la floculación.

Figura 7. Sistema de floculación dual

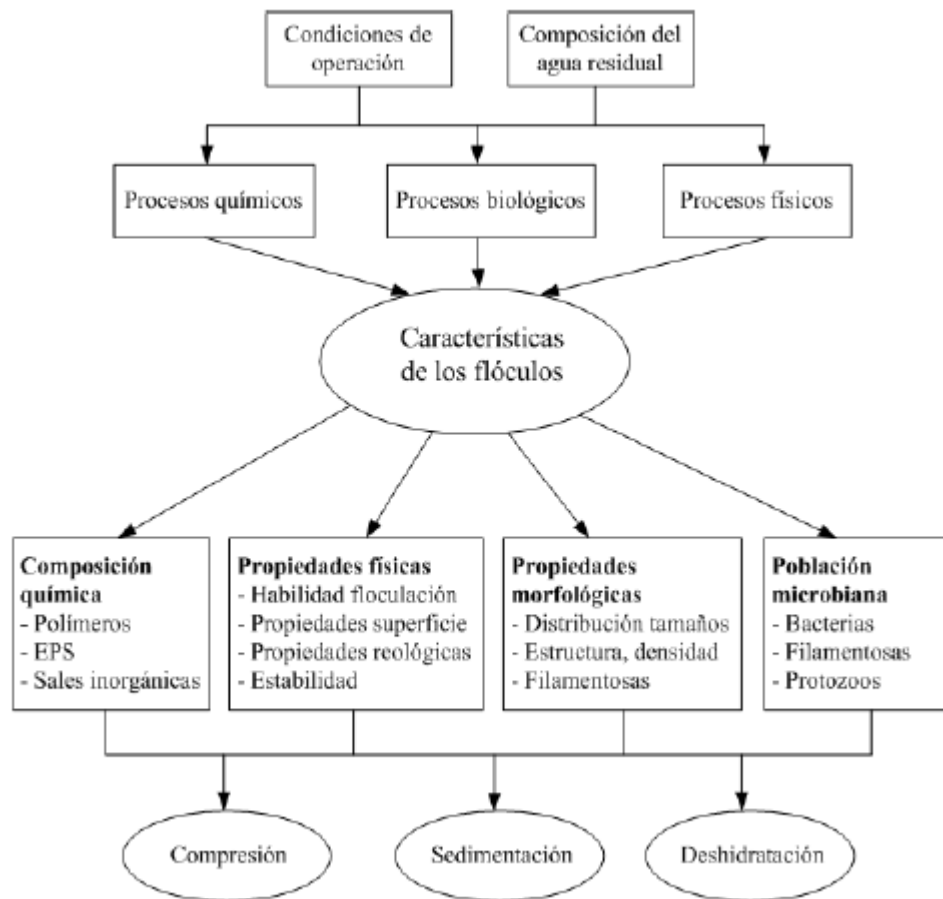


Fuente: Universidad de Los Andes. *Química del papel*. p. 56.

2.11. Propiedades de los flóculos

En un tratamiento de lodos activados las propiedades de los flóculos pueden variar debido a las diferencias entre las condiciones de operación y la composición del agua residual. Las características de los flóculos pueden afectar de forma directa o indirecta a la sedimentación, compactación o capacidad de deshidratación de los lodos activados.

Figura 8. Factores que afectan las características de los flocúlos



Fuente: ASENSI DASI, Enrique Javier. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. p. 23.

2.11.1. Tamaño y distribución del tamaño de los flóculos

“El tamaño de los flóculos se mide utilizando un diámetro equivalente, el cual permite que el flóculo que se pretende medir pueda asemejarse con una esfera. La ventaja de utilizar el diámetro equivalente para este tipo de partículas es que permite realizar comparaciones de tamaños de flóculos con formas irregulares.”⁷

2.11.1.1. Índice de Willcomb

El índice de Willcomb es un método visual para clasificar el tamaño de los flóculos.

Tabla V. Índice de Willcomb

Nº DE ÍNDICE	
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de Aglutinamiento
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Flóculo que deposita fácil pero no completamente
10	Bueno. Flóculo que deposita fácil y completamente

Fuente: LEE, Chai., ROBINSON, John. y CHONG, Mei. *A review on application of flocculants in wastewater treatment.* p.16.

⁷ ASENSI, Enrique. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados.* p. 24.

2.11.2. Forma de los flóculos

“La forma de los flóculos se caracteriza a partir del uso de indicadores de forma, como por ejemplo: el factor de forma (FF), la redondez (RD), la relación de aspecto (RA), el radio de giro reducido (RGR), entre otros. Estos indicadores son números adimensionales que se obtienen al combinar distintas medidas del tamaño de los flóculos.”⁸

2.11.2.1. Factor de forma

El factor de forma (FF) se utiliza para definir la regularidad de un objeto. El factor de forma tiene un valor de 1 para un círculo, 0,785 para un cuadrado y valores más pequeños para partículas más irregulares.

2.11.2.2. Redondez

“La redondez (RD) está depende fuertemente de la elongación del objeto, por lo que se mide a través de la longitud del objeto. La redondez varía entre 0 y 1, un círculo tiene un RD de uno.”⁹

2.11.2.3. Relación de aspecto

“La relación de aspecto (RA) indica la extensión de un objeto, mientras más alargado sea, mayor será el valor de este parámetro. Un círculo tiene una RA de uno.”¹⁰

⁸ ASENSI, Enrique. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. p. 29.

⁹ *Ibíd.* p. 30.

¹⁰ *Ibíd.*

2.11.2.4. Radio de giro reducido

“El radio de giro reducido (RGR) sirve para diferenciar objetos, si estos presentan un RGR mayor a uno y un área proyectada mayor a un criterio establecido se pueden considerar a las partículas estudiadas como filamentosas.”¹¹

2.11.3. Porosidad y permeabilidad del flóculo

Se pueden distinguir tres tipos de agua atrapada en el flóculo en función de las fuerzas de enlace: agua intersticial (agua atrapada en la matriz del flóculo), agua vecinal (agua atrapada por las fuerzas superficiales) y agua de hidratación (agua retenida por enlaces químicos).

Los flóculos que contienen gran cantidad de agua presentan pobre propiedades de sedimentación y de deshidratación del lodo.

2.11.4. Estabilidad y resistencia de los flóculos

Durante los procesos de tratamiento, los flóculos del fango pueden fragmentarse en flóculos más pequeños debido a las fuerzas de corte que tienen lugar durante la aireación, bombeo, mezclado y deshidratación del lodo. Como consecuencia de esto, se generan una gran cantidad de pequeños flóculos. La concentración de los sólidos suspendidos aumenta en el efluente debido a que disminuye el rendimiento en la separación de los flóculos del agua.

¹¹ ASENSI, Enrique. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. p. 31.

“La resistencia de un flóculo se define como la energía necesaria para romper el flóculo bajo la acción de tensión, de compresión o de fuerzas cortantes.”¹² La resistencia del flóculo se puede medir mediante el factor de resistencia comparando el diámetro medio equivalente de los flóculos antes y después de ser sometidos a un aumento de las fuerzas cortantes.

2.12. Índice de filtrabilidad

Este índice se utiliza para determinar la capacidad de filtración de una muestra de agua o cualquier líquido, en comparación con un blanco.

Tabla VI. Índice de filtrabilidad

Valor del índice	Filtrabilidad
<15	Fácil de filtrar
15 – 30	Moderado de filtrar
>30	Difícil de filtrar

Fuente: SCHNEIDER, Ilona. *Filtrability of wine*. p. 1.

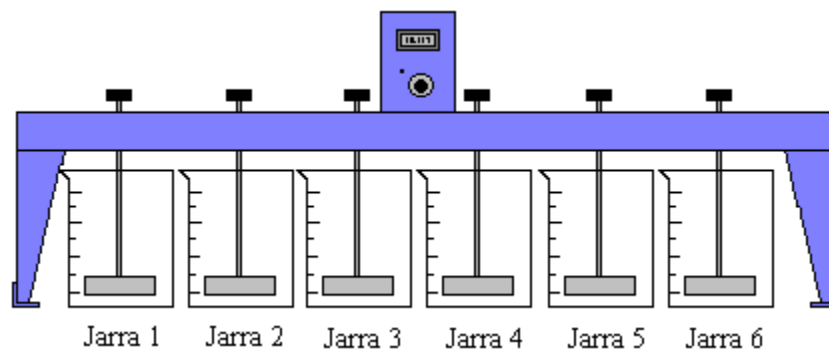
2.13. Prueba de jarras

La prueba de jarras es un procedimiento usado para evaluar el tratamiento de aguas residuales y de esta manera reducir el contenido de materiales coloidales, sólidos en suspensión, sólidos disueltos y otras materias no sedimentables.

¹² ASENSI, Enrique. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. p. 43.

También es utilizado para determinar los reactivos, dosis a aplicar y condiciones requeridas para obtener un resultado óptimo. Entre las condiciones requeridas se encuentra el pH, temperatura del agua y el orden de adición de los reactivos.

Figura 9. **Equipo de prueba de jarras**



Fuente: Norma Colombiana INCOTEC. Agua potable. *Determinación de hierro*. p. 102.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se clasifico a las variables de trabajo en dos tipos:

3.1.1. Variables dependientes

- Turbidez
- Tiempo de sedimentación
- Tamaño de flóculo
- Resistencia del flóculo
- Filtrabilidad

3.1.2. Variables independientes

- Dosis de floculante aniónico
- Carga del floculante aniónico

3.2. Delimitación de campo de estudio

En la actualidad se ha comprobado que en la planta de captura de ceniza del ingenio azucarero se está utilizando una dosis de floculante catiónico de 2,5 ppm, por lo que se tomará este valor como fijo para el estudio del presente trabajo de graduación.

El trabajo de investigación se delimitará en evaluar un sistema dual de floculantes polielectrolitos de naturaleza aniónica y catiónica, para optimizar el proceso de separación de ceniza volante y de esta manera reutilizar el agua en el lavador de gases. La evaluación consiste en mejorar las propiedades del flóculo a partir de la adición de un floculante aniónico a diferentes densidades de carga (baja, mediana y alta), buscando que en el sistema se logre un menor porcentaje de turbidez; asimismo se busca alcanzar un mayor tamaño, resistencia del flóculo y filtrabilidad. El estudio se realizará a escala laboratorio, haciendo uso del equipo de prueba de jarras, conos de sedimentación Imhoff, un potenciómetro, un turbidímetro, un agitador y una malla mesh 100; con el fin de simular las mismas condiciones que se encuentran en el ingenio azucarero y definir con mayor exactitud si es conveniente el dosificar un segundo floculante en dicho sistema de captura de cenizas volantes.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Manuel Armando Fletes Ordoñez

Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales disponibles

Se clasifican en:

3.4.1. Equipo personal

- Bata
- Cofia
- Guantes de látex
- Lentes de seguridad

3.4.2. Cristalería y equipo

- Equipo de prueba de jarras
- Tubos de sedimentación Imhoff
- Turbidímetro
- Probetas de 100 ml
- *Beackers* de 500 ml
- Malla *mesh* 100
- Papel filtro
- Agitador
- Cronómetro
- Pipetas de 10mL
- Balanza analítica
- Potenciómetro

3.4.3. Reactivos

- Floculante catiónico
- Floculante aniónico de baja, mediana y alta densidad de carga

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se utilizará de ambas técnicas para el desarrollo de la investigación, a continuación, se describe cada una.

3.5.1. Técnica cualitativa

Se utilizará la técnica de investigación cualitativa para determinar el tamaño del flóculo, a partir del índice de Willcomb con la observación visual de la formación del flóculo.

3.5.2. Técnica cuantitativa

Se utilizará la técnica cuantitativa para determinar: la turbidez, a partir de su medición con un turbidímetro marca Hanna instruments, modelo HI93703, rango 0 – 1 000 NTU, resolución de 0,01 (0 a 50 NTU) y de 1 (50 a 1 000 NTU), exactitud $\pm 0,5$ % NTU (0 a 50 NTU) y ± 5 % NTU (50 a 1 000 NTU).

El índice de filtrabilidad, a partir de la razón entre el tiempo que tarde en filtrarse el agua con los lodos activos y el tiempo en que tarde en filtrarse agua potable en un tamiz Retsch de 125 μm de poro con superficie de tela metálica y diámetro de marco de 200 mm.

La resistencia del flóculo, a partir de la razón entre la cantidad del floculo que se filtró y no atravesó el filtro, después de someter los flóculos a un agitador (marca Barnant, serie 10, rango 0 – 4 000 rpm) a 3 000 rpm durante un tiempo de 5 segundos, y el total de la ceniza de la muestra, medidas en una balanza marca Radwag, modelo WTC 200, rango 0 – 200 g, resolución 0,001, exactitud $\pm 0,05$ % g.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se recolectarán muestras de ceniza a la salida del lavador de gas del ingenio azucarero, las muestras se dividirán en 4 grupos para analizar los siguientes parámetros.

Se medirán los parámetros iniciales de temperatura, pH, conductividad y porcentaje de ceniza al primer grupo de muestras, sin haber añadido un floculante previamente.

Tabla VII. **Parámetros iniciales**

Muestra	Temperatura (°C)	pH	Porcentaje de ceniza (%)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Fuente: elaboración propia.

Al segundo grupo de muestras, se les dosificará una concentración fija de floculante catiónico, luego se dosificará floculante aniónico de baja carga a diferentes concentraciones, se medirán los parámetros de turbidez, tamaño de flóculo, resistencia del flóculo y el índice de filtrabilidad.

Para el tercer y cuarto grupo de muestras, se realizará lo mismo, únicamente variando la carga del floculante aniónico por uno de mediana y alta.

Tabla VIII. **Dosis óptima del floculante aniónico**

Tipo de Floculante	Dosis floc. An. (ppm)	Dosis floc. Cat. (ppm)	Turbidez (NTU)	Índice de Willcomb	Tiempo de filtración (s)	Peso de ceniza (g)	Peso de ceniza filtrada (g)
An.	1						
	2						
	3						
	4						

Fuente: elaboración propia.

3.7. **Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Toda la información recolectada en la experimentación será tabulada en una base de datos en el programa EXCEL®, esto con el fin de facilitar el procesamiento de datos. La base de datos contará con los siguientes parámetros: tipo de floculante, concentración del mismo a dosificar, turbidez, índice de Willcomb, tiempo de sedimentación, tiempo de filtración y peso de ceniza filtrada.

3.8. **Análisis estadístico**

Con el propósito de buscar la precisión y confiabilidad de los resultados para alcanzar los objetivos de la investigación propuesta y que estos cumplan con un intervalo significativo de confianza, tratando de disminuir los posibles errores; se presentan las medidas que serán utilizadas para los resultados obtenidos en la experimentación.

3.8.1. Número de repeticiones

Para estimar la cantidad de repeticiones a evaluar durante la experimentación, con base a un criterio de confiabilidad del 90 % y un error del 25 %; se utilizará la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Z^2 * P * Q}{E^2}$$

Donde:

Z = Confiabilidad

P = Probabilidad de éxito (0,90)

Q = Probabilidad de fracaso (0,1)

E = Error

Sustituyendo los valores en la ecuación, se obtiene:

$$N = \frac{(1,65)^2 * (0,90) * (0,10)}{(0,25)^2} = 3,38 \approx 3$$

Se obtuvo un número de repeticiones de 3,38. Por lo tanto, este se aproxima al entero más cercano, indicando que se realizarán 3 repeticiones para cada muestra.

3.8.2. Media aritmética

Se utilizará la media aritmética para determinar el valor promedio de los diferentes datos. A partir de estos valores se rea

La media aritmética para un conjunto finito de datos se expresa como la suma de todos los valores dividida entre el número de valores.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

Donde:

\bar{X} = Media aritmética

a_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos

n = Número de datos

3.8.3. Varianza

La varianza permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su media.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Donde:

S^2 = Varianza

\bar{X} = Media aritmética

X_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos

n = Número de datos

3.8.4. Desviación estándar

La desviación estándar permite determinar el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media; para ello basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{S^2}$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{X} = Media aritmética

X_i = i -ésimo valor de un conjunto de datos

n = Número de datos

S^2 = Varianza

3.9. Plan de análisis de los resultados

A continuación, se describen los métodos y modelos para el análisis de datos y los programas a utilizar para dicho estudio.

3.9.1. Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables

Para las variables cuantitativas se utilizará un análisis ligado a la interpretación de la media aritmética, varianza y desviación estándar. Asimismo, se utilizará el análisis de varianza para aprobar o rechazar la hipótesis nula, determinando cual sistema el mono o el dual es más eficiente.

3.9.2. Programas a utilizar para el análisis de datos

- Microsoft Excel 2013: se utilizará para la tabulación y manejo de datos, también para la realización de los cálculos y la elaboración de gráficos.
- Microsoft Word 2013: se utilizará para el procesamiento de texto y ordenamiento de la información.

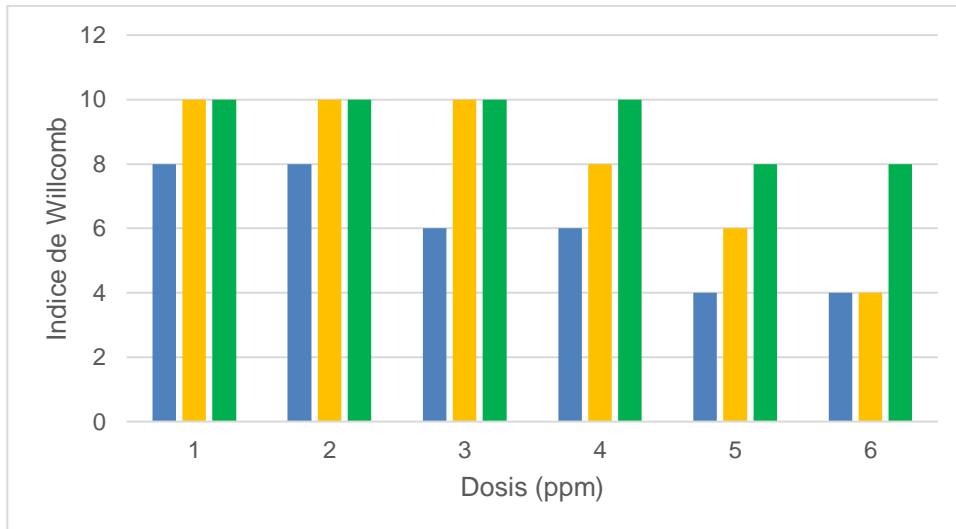
4. RESULTADOS

Tabla IX. Índice de Willcomb al adicionar floculante aniónico

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Índice de Willcomb		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	8	10	10
	2	8	10	10
	3	6	10	10
	4	6	8	10
	5	4	6	8
	6	4	4	8

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 6.

Figura 10. Índice de Willcomb al adicionar floculante aniónico



Color	Floculante	Intervalo de validez
Blue	Aniónico de baja carga	[1 – 6]ppm
Yellow	Aniónico de mediana carga	
Green	Aniónico de alta carga	

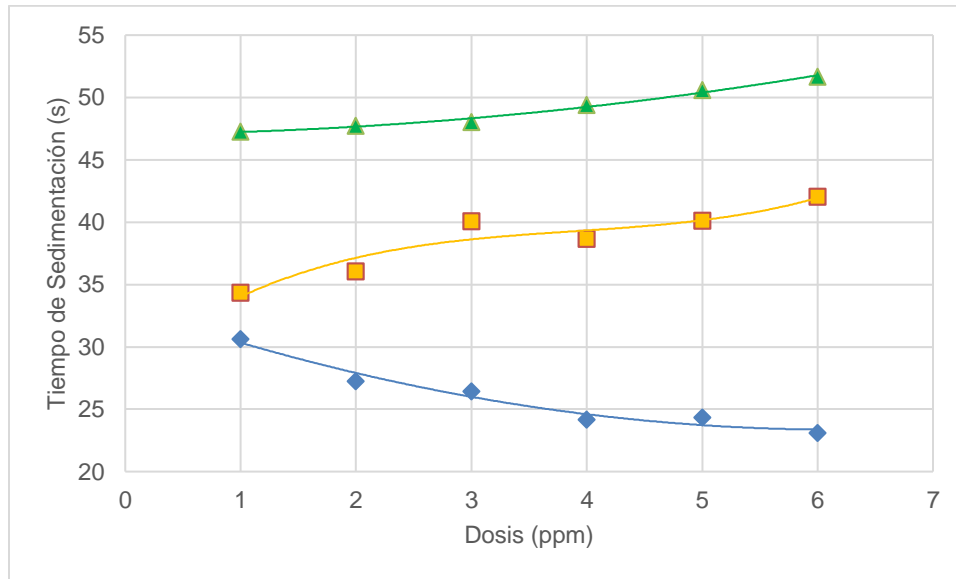
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 6.

Tabla X. Tiempo de sedimentación al adicionar floculante aniónico

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Tiempo de sedimentación (s)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	30,63	34,33	47,27
	2	27,26	36,04	47,73
	3	26,44	40,06	48,01
	4	24,18	38,66	49,38
	5	24,34	40,12	50,59
	6	23,08	42,02	51,65

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 7.

Figura 11. **Tiempo de sedimentación al adicionar floculante aniónico**



Color	Floculante aniónico	Modelo matemático	R ²	S
	Baja carga	$y = 0,2586x^2 - 3,2037x + 33,28$	0,9647	2,51
	Media carga	$y = 0,1452x^3 - 1,6858x^2 + 7,1309x + 28,436$	0,907	2,61
	Alta carga	$y = 0,1312x^2 - 0,0041x + 47,135$	0,9863	1,59

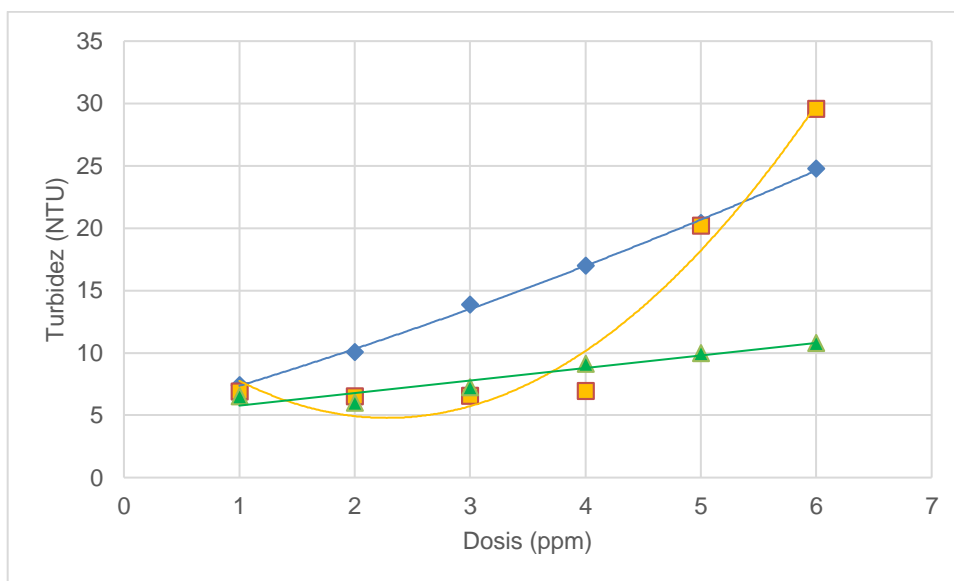
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 7.

Tabla XI. **Turbidez al adicionar floculante aniónico**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Turbidez (NTU)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	7,41	6,88	6,53
	2	10,06	6,51	6,01
	3	13,88	6,55	7,25
	4	16,98	6,96	9,13
	5	20,40	20,19	9,97
	6	24,76	29,58	10,81

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 8.

Figura 12. **Turbidez al adicionar floculante aniónico**



Color	Floculante aniónico	Modelo matemático	R ²	S
	Baja carga	$y = 0,1242x^2 + 2,5848x + 4,6497$	0,9986	5,91
	Media carga	$y = 1,8129x^2 - 8,2642x + 14,205$	0,9624	8,98
	Alta carga	$y = 0,0936x^2 + 0,3495x + 5,641$	0,9337	1,79

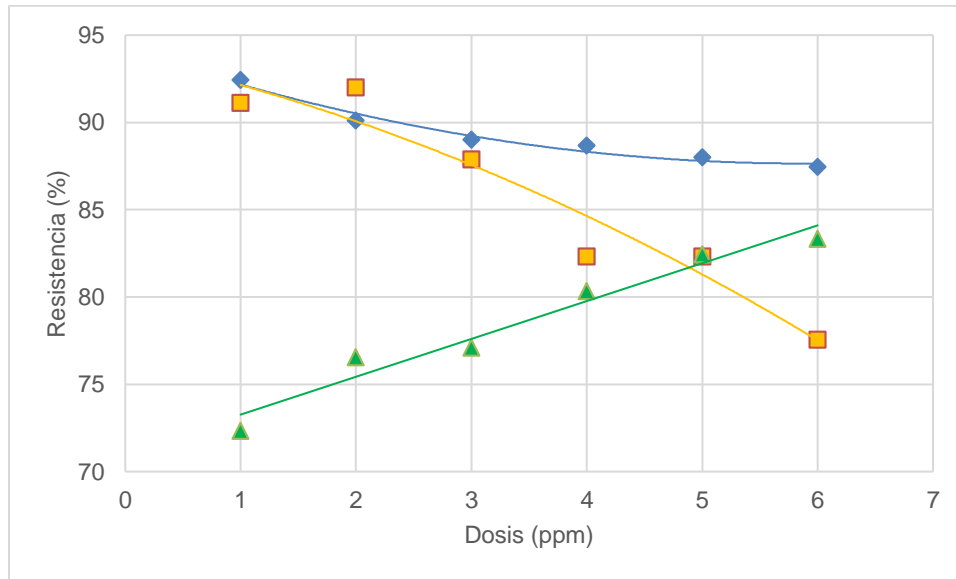
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 8.

Tabla XII. **Resistencia del floculo al adicionar floculante aniónico**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Resistencia (%)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	92,44	91,11	72,33
	2	90,11	92,00	76,56
	3	89,00	87,89	77,11
	4	88,67	82,33	80,33
	5	88,00	82,33	82,44
	6	87,44	77,56	83,33

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 9 y 10

Figura 13. Resistencia del floculo al adicionar floculante aniónico



Color	Floculante aniónico	Modelo matemático	R ²	S
Blue	Baja carga	$y = 0,1905x^2 - 2,2381x + 94,222$	0,9699	1,64
Orange	Media carga	$y = -0,2123x^2 - 1,4377x + 93,789$	0,9304	5,21
Green	Alta carga	$y = 2,1683x + 71,096$	0,9588	3,78

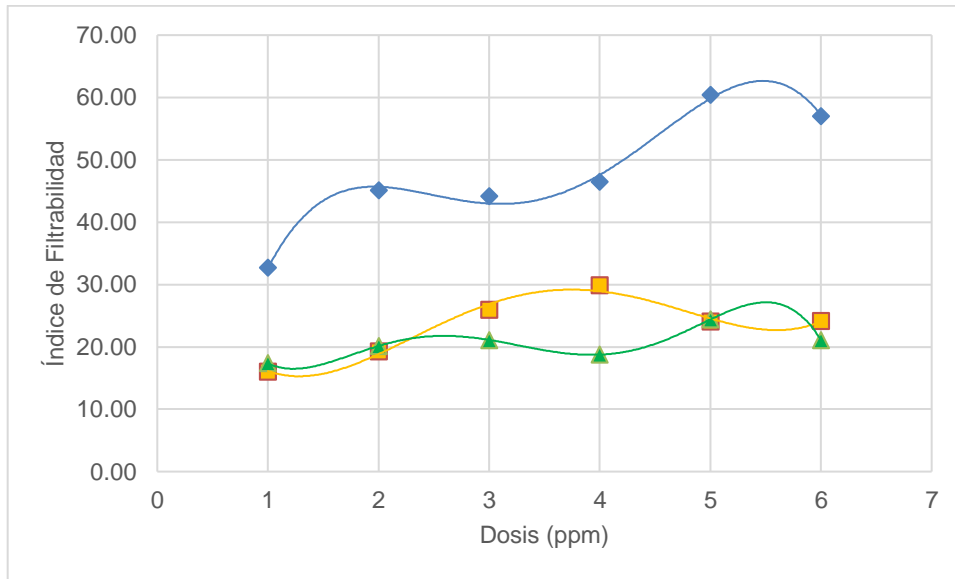
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 9 y 10.

Tabla XIII. Índice de filtrabilidad al adicionar floculante aniónico

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Índice de filtrabilidad		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	32,70	16,05	17,36
	2	45,11	19,31	20,13
	3	44,12	25,91	21,11
	4	46,45	29,88	18,75
	5	60,39	24,07	24,39
	6	57,03	24,19	21,07

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 11 y 12.

Figura 14. Índice de filtrabilidad al adicionar floculante aniónico



Color	Floculante aniónico	Modelo matemático	R ²	S
	Baja carga	$y = -0,9566x^4 + 13,442x^3 - 64,684x^2 + 127,48x - 42,489$	0,9933	9,07
	Media carga	$y = 0,4513x^4 - 6,3967x^3 + 29,767x^2 - 48,604x + 40,93$	0,9809	4,47
	Alta carga	$y = -0,3455x^5 + 5,7228x^4 - 35,028x^3 + 97,292x^2 - 119,02x + 68,847$	1	2,19

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 11 y 12.

Tabla XIV. **Dosis adecuada del floculante aniónico de baja, mediana y alta carga**

	Dosis (ppm)		
	Baja carga	Mediana carga	Alta carga
Tamaño del flóculo	1	1	1
Tiempo de sedimentación	6	1	1
Turbidez	1	2	2
Resistencia del flóculo	1	2	6
Índice de filtrabilidad	1	1	1
Mejor dosis	1	1	1

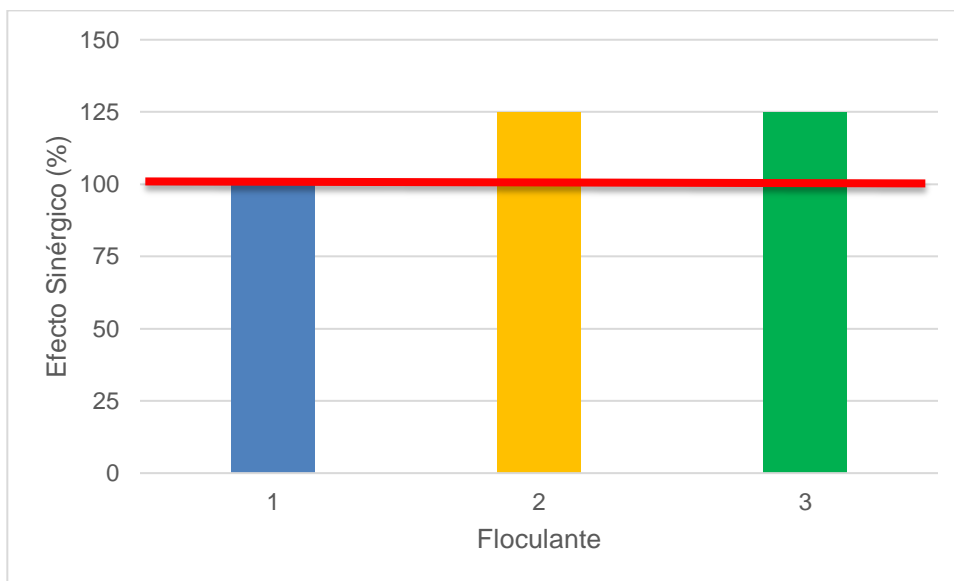
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Efecto sinérgico del tamaño del flóculo al utilizar las dosis adecuadas**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Efecto sinérgico (%)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	100	125	125

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 13.

Figura 15. **Efecto sinérgico del tamaño del flóculo al utilizar las dosis adecuadas**



Color	Floculante
Rojo	Catiónico
Azul	Catiónico y aniónico de baja carga
Amarillo	Catiónico y aniónico de mediana carga
Verde	Catiónico y aniónico de alta carga

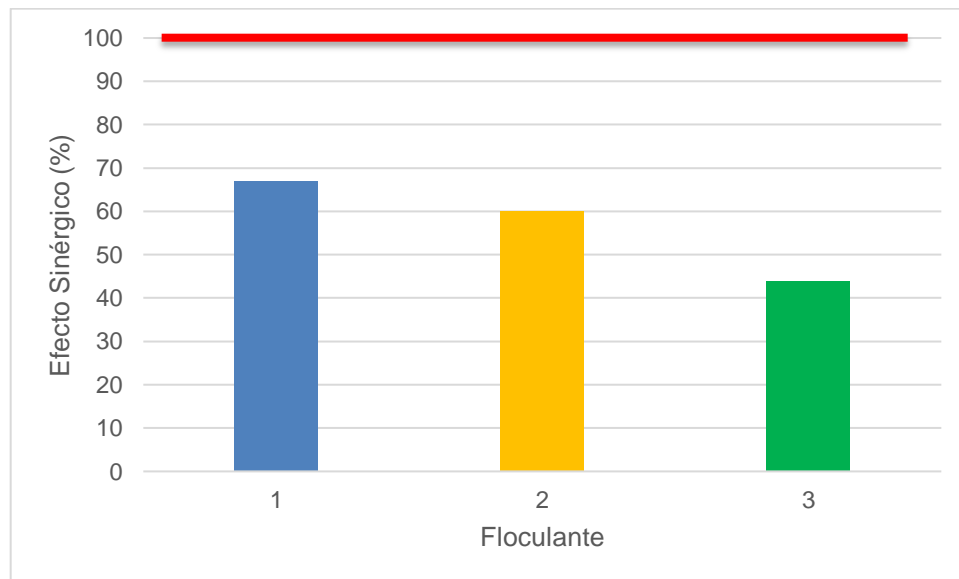
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 13.

Tabla XVI. **Efecto sinérgico del tiempo de sedimentación al utilizar las dosis adecuadas**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Efecto sinérgico (%)		
		Baja carga	Mediana Carga	Alta carga
2,5	1	67	60	44

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 14.

Figura 16. **Efecto sinérgico del tiempo de sedimentación al utilizar las dosis adecuadas**



Color	Floculante
	Catiónico
	Catiónico y aniónico de baja carga
	Catiónico y aniónico de mediana carga
	Catiónico y aniónico de alta carga

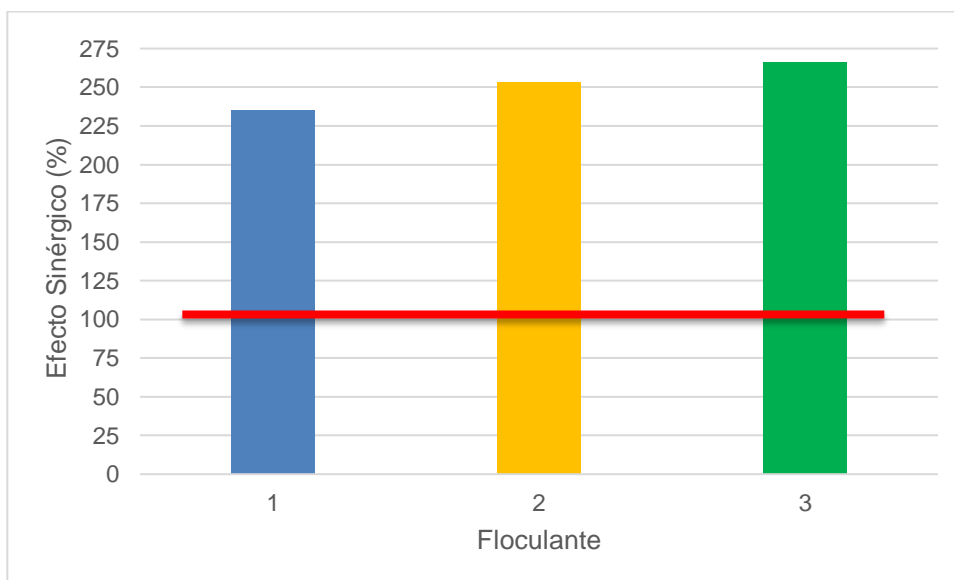
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 14.

Tabla XVII. **Efecto sinérgico de la turbidez al utilizar las dosis adecuadas**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Efecto sinérgico (%)		
		Baja Carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	235	253	266

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 15.

Figura 17. **Efecto sinérgico de la turbidez al utilizar las dosis adecuadas**



Color	Floculante
Rojo	Catiónico
Azul	Catiónico y aniónico de baja carga
Amarillo	Catiónico y aniónico de mediana carga
Verde	Catiónico y aniónico de alta carga

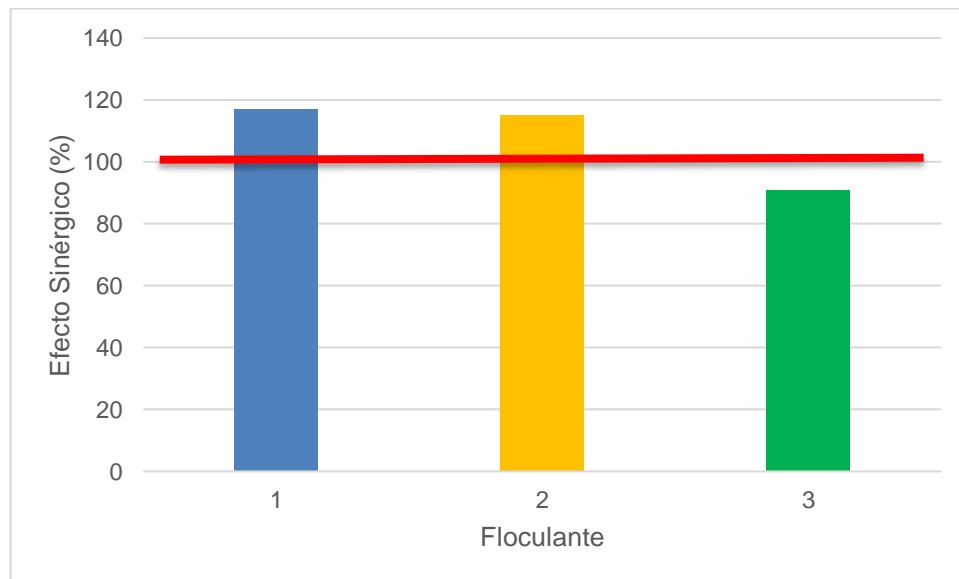
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 15.

Tabla XVIII. **Efecto sinérgico de la resistencia del floculo al utilizar las dosis adecuadas**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Efecto sinérgico (%)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	117	115	91

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 16.

Figura 18. **Efecto sinérgico de la resistencia del floculo al utilizar las dosis adecuadas**



Color	Floculante
Rojo	Catiónico
Azul	Catiónico y aniónico de baja carga
Amarillo	Catiónico y aniónico de mediana carga
Verde	Catiónico y aniónico de alta carga

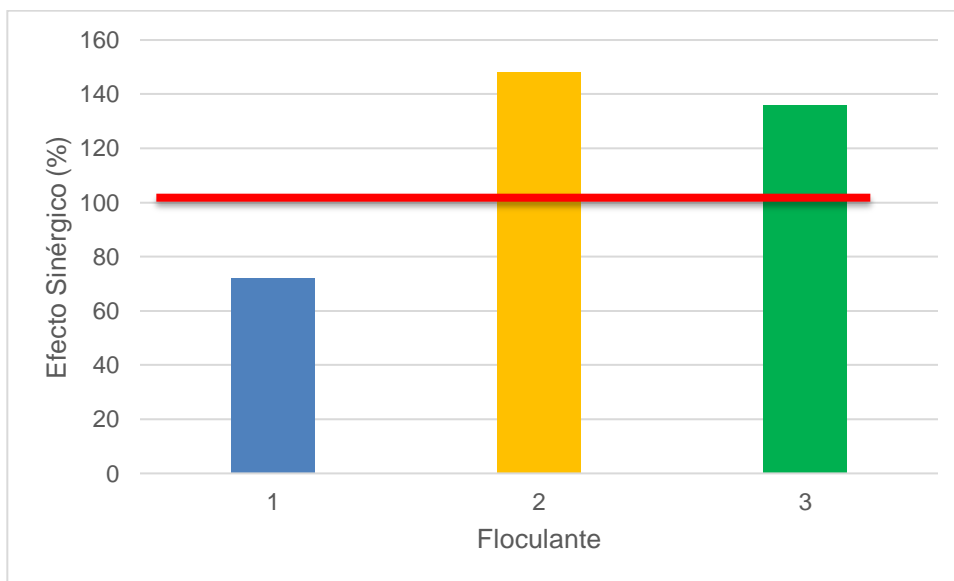
Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 16.

Tabla XIX. **Efecto sinérgico de la filtrabilidad al utilizar las dosis adecuadas**

Dosis catiónico (ppm)	Dosis aniónico (ppm)	Efecto Sinérgico (%)		
		Baja carga	Mediana carga	Alta carga
2,5	1	72	148	136

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 17.

Figura 19. **Efecto sinérgico de la filtrabilidad al utilizar las dosis adecuadas**



Color	Floculante
	Catiónico
	Catiónico y aniónico de baja carga
	Catiónico y aniónico de mediana carga
	Catiónico y aniónico de alta carga

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 17.

Tabla XX. **Efecto sinérgico al utilizar las dosis adecuadas de los floculantes aniónicos**

	Efecto sinérgico (%)		
	Baja carga	Mediana carga	Alta carga
Tamaño de flóculo	100	125	125
Tiempo de sedimentación	67	60	44
Turbidez	235	253	266
Resistencia del flóculo	117	115	91
Índice de filtrabilidad	72	148	136

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó un análisis, nivel laboratorio, de un sistema de floculación dual de polielectrolitos de carga opuesta, catiónica y aniónica, para muestras de cenizas provenientes de un lavador de gases; a las cuales, se les varió el tipo del floculante aniónico por uno de carga baja, media y alta; y la dosis entre 1 a 6 ppm.

A las muestras se les realizó un análisis previo en el que se midió la temperatura, el pH y el porcentaje de cenizas. De esta manera se verificó que las muestras estuviesen a las mismas condiciones, siendo estas: temperatura entre 20 a 25 °C, pH entre 8 a 9 y porcentaje de ceniza del 3 %. Posteriormente, se prosiguió a ejecutar el análisis de los parámetros de interés, con la ayuda de la prueba de jarras.

Se utilizó el índice de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo; según se muestra en la figura 10, este desciende para las tres diferentes densidades de carga conforme se incrementa la dosis del floculante aniónico. Los mejores tamaños los presentaron los floculantes aniónicos de mediana y alta carga al obtener índices de 10, a concentraciones de 1, 2 y 3 ppm para el de mediana carga y 1, 2, 3 y 4 ppm para el de alta carga. En cambio, el floculante de baja carga presenta tamaños bajos con respecto a los otros dos floculantes, obteniendo como mejor tamaño un 8 a dosis de 1 y 2 ppm.

Con respecto al tiempo de sedimentación, figura 11, se muestra que conforme se incrementa la dosis de floculante aniónico de baja carga, desciende el tiempo de sedimentación. Caso contrario sucede con el de mediana y alta

carga, porque al incrementar la dosis del floculante aniónico también aumenta el tiempo de sedimentación. Presentando los menores tiempos es de baja carga, seguido por el de mediana y por último el de alta.

Esto se debe a que la sedimentación depende de varios factores como lo son: el tamaño y la porosidad del flóculo, la densidad de carga y peso molecular del floculante.

En este caso, los tres floculantes al presentar cadenas poliméricas poseen un peso molecular alto, lo que conlleva a un aumento en el tamaño de los flóculos, permitiendo que sedimenten de forma más rápida. Pero, como se dijo anteriormente, también depende de otros factores. Dado que la densidad de carga de la ceniza y de los floculantes es negativa, ocasiona que, al ir aumentando la carga, la ceniza se disperse en el sistema, retardando la formación del flóculo y por ende su sedimentación. Es por ello que el floculante de baja carga obtiene los menores tiempos, porque su carga es menor. La porosidad también juega un papel importante en este proceso, si durante la formación de los flóculos no se forman los suficientes poros, puede quedarse encerrada agua dentro de estos, provocando que disminuya su densidad, y a su vez afecta su tiempo de sedimentación.

Con relación a las mejores dosis, se encuentra de 6 ppm y un tiempo de 23,08 s para el de baja carga, y de 1 ppm para los floculantes de mediana y alta carga con tiempos de 34,33 s y 47,27 s, respectivamente.

A partir del método nefelométrico, se obtuvieron los resultados de la turbidez para las distintas muestras de ceniza. En la figura 12, se modelan las tendencias de la turbidez en función de la dosis de floculante aniónico de baja, mediana y alta carga. Se puede observar que los tres floculantes presentan una tendencia

ascendente, es decir, que conforme se aumenta la dosis también aumenta la turbidez.

Se evidenció la presencia de puntos de turbidez mínimos en dichas gráficas, siendo de 7,41 NTU para el floculante de baja carga a 1 ppm, de 6,50 NTU para el de mediana carga a 2 ppm y de 6,01 NTU para el de alta carga a 2 ppm.

Respecto a la figura 13, modela las tendencias de la resistencia del flóculo ante un esfuerzo cortante. Se observa que al incrementar la dosis del floculante de baja y mediana carga disminuye la resistencia del flóculo, siendo las mejores dosis de 1 ppm con un 92,44 % para el primero y de 2 ppm con un 92 % para el segundo. Caso contrario con el floculante de alta carga, siendo las mejores dosis de 6ppm con 83,33 %.

Esto se debe principalmente al mecanismo de floculación que siguió la ceniza al aglomerarse, ya sea por puentes electrolíticos, por parches o por una combinación entre ambos. Los flóculos formados por el mecanismo de puentes electrolíticos son más fuertes que los producidos por el mecanismo de parches. Por lo que los flóculos formados por la combinación de floculantes catiónico y aniónico de baja carga, pudieron presentar mayor cantidad de enlaces tipo puente que los de mediana y alta carga.

Con relación a los índices de filtrabilidad (figura 14), se observa que los floculantes aniónicos de mediana y alta carga presentan índices entre 15 y 30 perteneciendo al grupo de líquidos moderados de filtrar. Siendo de estos dos, el floculante de alta carga el que posee los menores índices. En cambio, el floculante de baja carga presenta índices mayores a 30 por lo tanto se encuentra en el grupo de líquidos difíciles de filtrar.

Esta diferencia se debe a dos características del floculo que afectan la filtrabilidad del medio, el tamaño y la porosidad. Los floculantes de mediana y alta carga al formar tamaños de floculos más grandes y tener una estructura porosa, poseen una alta permeabilidad al agua, lo que ayuda a que esta filtre de manera más rápida. En el caso del floculante de baja carga, este presenta índices más altos, porque el tamaño y la estructura porosa es menor que la de los otros dos floculantes.

La tabla XV muestra las mejores dosis obtenidas por los tres floculantes aniónicos en cada uno de los parámetros analizados. Con respecto al floculante de baja carga, la concentración de 1 ppm es la mejor para la mayor parte de los parámetros, excepto en el tiempo de sedimentación en el que es mejor la concentración de 6 ppm. Con el floculante de mediana carga, igualmente la concentración de 1 ppm fue la mejor, excepto para los parámetros de turbidez y resistencia a los cuales las mejores fueron de 2 ppm. Con el floculante de alta carga ocurrió lo mismo que en los dos casos anteriores, la mejor dosis es de 1 ppm, menos para los parámetros de turbidez y resistencia fueron de 2 y 6 ppm, respectivamente. Con lo cual, se puede observar que para los tres floculantes aniónico la concentración de 1 ppm es la mejor dosis de cada uno.

Posterior a los análisis, se compararon los resultados del tamaño, tiempo de sedimentación, turbidez, resistencia y filtrabilidad del sistema dual, floculante catiónico y aniónico, con el del sistema de floculación simple; evaluando si existe un efecto sinérgico de estos parámetros.

Como se aprecia en la figura 15, los floculantes de mediana y alta carga fueron los que obtuvieron un efecto superior al del sistema simple, mejorando el tamaño del floculo en un 25 %. Para el floculante de baja carga se obtuvo un resultado similar al del sistema de floculación simple.

La figura 16 muestra el efecto sinérgico del tiempo de sedimentación. Se observa que los tres floculantes aniónicos presentan un efecto inferior al del sistema simple. Comparando entre estos, el que tuvo mejor fue el floculante de baja carga, aunque con un 33 % menos de efectividad que el simple; seguido por el de mediana carga con 40 % y por último el de alta carga con 56 %.

En la figura 17, se observa el efecto sinérgico de la turbidez, y mejora significativamente al utilizar un sistema dual. Se evidencia que el floculante de baja carga obtuvo una mejora de 135 %, el de mediana de 153 % y el de alta de 166 %.

La figura 18 muestra el efecto sinérgico de la resistencia del flóculo, se observa que, de los tres floculantes, el único que no mejoró fue el floculante de alta carga, siendo un 9 % inferior con respecto al sistema simple. En cambio, los floculantes de baja y mediana carga si superaron a este, obteniendo una mejoría del 17 % y 15 %, respectivamente.

La figura 19 muestra el efecto sinérgico de la filtrabilidad, de lo cual se observa que el floculante de baja carga fue el único que no mejoró la filtrabilidad del medio, presentando un decremento del 28 % con respecto al sistema simple. En cambio, los floculantes de mediana y alta carga obtuvieron mejores resultados que el sistema simple, siendo de 48 % y 36 %, respectivamente.

Como se puede apreciar en la tabla XXI, se muestra el conjunto de resultados del efecto sinérgico para todos los análisis realizados. A partir de una comparación entre estos se puede observar que el floculante de mediana carga a 1 ppm es el mejor, porque en la mayoría de los parámetros se presenta una mejoría, aunque no siempre obtiene los mejores resultados, estos son muy cercanos al que sí los presenta.

CONCLUSIONES

1. La dosis adecuada para el floculante aniónicos de baja, mediana y alta carga es la misma, siendo de 1 ppm.
2. Existe un efecto sinérgico al añadir floculante aniónico al sistema simple, siendo este para el tamaño del flóculo al utilizar los floculantes aniónicos de mediana y alta carga del 25 % con un índice de Willcomb 10, para el floculante de baja carga es del 0 % con índice de Willcomb 8.
3. El efecto sinérgico para el floculante aniónico de baja carga con respecto a la turbidez es de 135 %, para el floculante de mediana carga es del 153 % y para el floculante de alta carga es de 166 %.
4. El efecto sinérgico para el floculante aniónico de baja carga con respecto a la resistencia del flóculo es de 17 %, para el floculante de mediana carga es del 15 % y para el floculante de alta carga presenta un decremento del 9 % respecto al sistema simple.
5. El efecto sinérgico para el floculante aniónico de alta carga con respecto a la filtrabilidad es de 36 %, para el floculante de mediana carga es del 48 % y para el floculante de alta carga presenta un decremento del 28 % respecto al sistema simple.

6. El tiempo de sedimentación es el único de los parámetros analizados que no superó el efecto que resulta de utilizar un sistema de floculación simple. Siendo el floculante de baja carga un 33 % menos eficaz que el simple, el de carga media de 40 % y el de alta carga de 56 %.

7. Se determinó que existe mejora en la mayoría los parámetros analizados al adicionar floculante aniónico al sistema existente, siendo el mejor de tres el floculante de mediana carga a 1 ppm.

RECOMENDACIONES

1. Dejar un día en reposo y bajo refrigeración las muestras de ceniza, para evitar que se degrade el agua.
2. Homogenizar las muestras de cenizas para determinar de manera más precisa y exacta los parámetros de interés.
3. Preparar las soluciones de los floculantes el mismo día en que se utilizarán para evitar la descomposición por hidrólisis de las mismas.
4. Dosificar el floculante aniónico después de haber dosificado el catiónico, para evitar la cancelación de las cargas de los mismos.
5. Realizar el experimento utilizando otros valores de concentración del floculante catiónico, para determinar si existe un efecto sinérgico superior en el sistema de floculación.
6. Realizar el experimento variando el pH de las muestras para determinar si existe mejoría en el sistema de floculación.

BIBLIOGRAFÍA

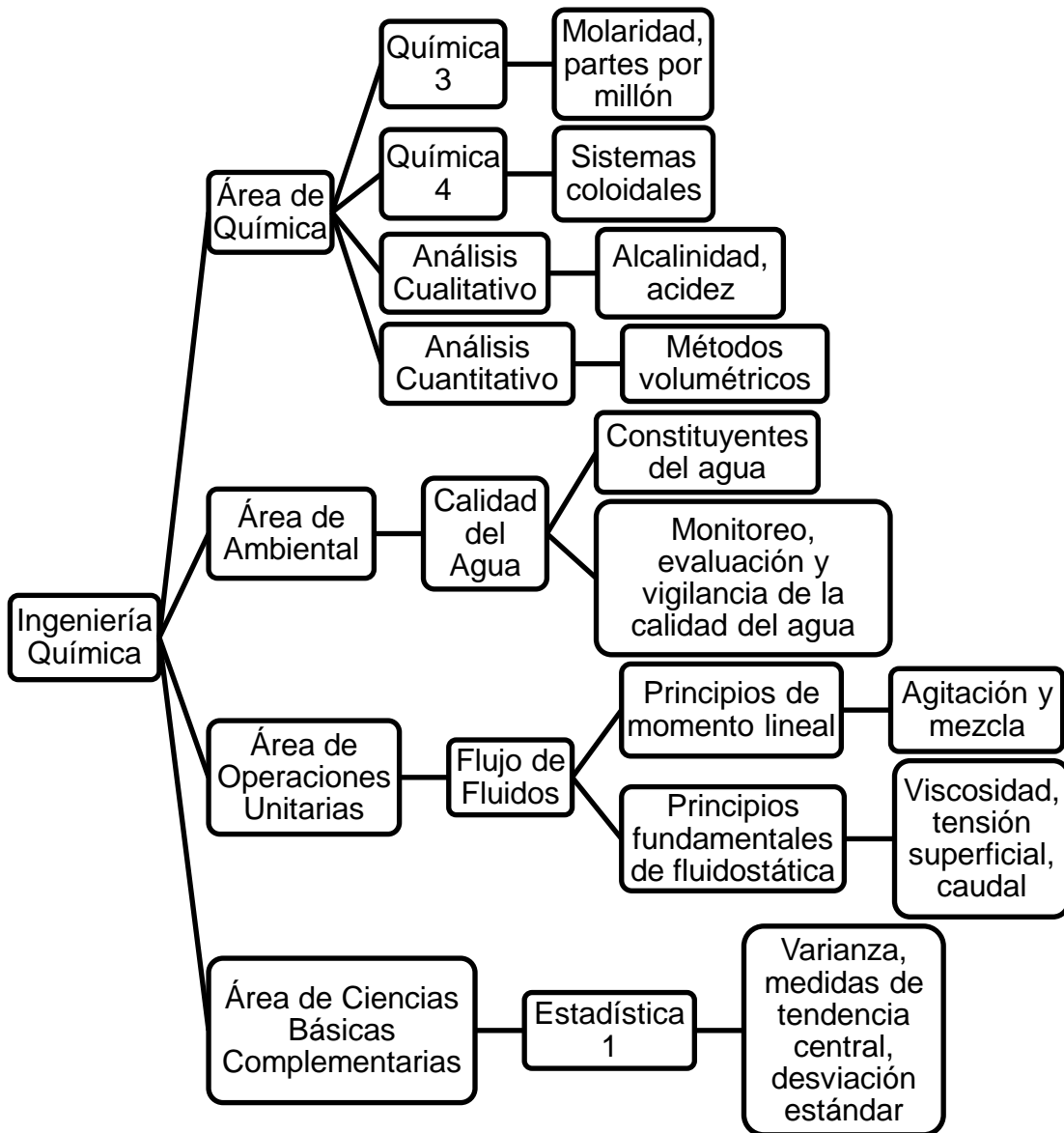
1. AGUILAR, Mario., SÁEZ, Javier., LLORÉNS, Manuel., SOLER, Alejandro. y ORTUÑO, José. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. 1a ed. España: Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones, 2002. 151 p.
2. ALDERETES, Carlos. *Calderas a bagazo – proyecto, operación y mantenimiento*. 1a ed. Argentina, 2016. 670 p. ISBN 0-08-021680-3.
3. ANÓNIMO. *Coagulantes, floculantes y agentes deshidratantes de lodos*. [en línea]. <<http://kiralyquinteroaguas.blogspot.com/>>. [Consulta: 13 de octubre de 2017].
4. ASENSI, Enrique. *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. Tesis doctoral. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2015. 406 p.
5. BLANCO, Ángeles. *Estudio de la floculación en la fabricación de papel*. Tesis de maestría. España: Universidad Complutense de Madrid, 1994. 124 p.

6. CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. [en línea].
<http://www.sedepal.com.pe/c/documen_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154>.
[Consulta: 7 de octubre de 2017].
7. COLOCH, Lesther. *Propuestas para el montaje de una planta de tratamiento de cenizas contenidas en el agua proveniente de lavadores de gases de combustión de calderas en central agro industrial guatemalteca S.A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 186 p.
8. DÍAZ, José. *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas*. Tesis de maestría. Honduras: Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, 2014. 172 p.
9. GARCÉS, Rosa. y MARTINEZ, Sandra. *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda*. [en línea].
<<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/825/66288G215ep.pdf;jsessionid=AEDA7F58EDDA4C616457E63DC598C346?sequence=1>>. [Consulta: 7 de octubre de 2017].
10. GOMELLA, Cyril. y GUERREE, Henri. *Tratamiento de aguas para abastecimiento público*. 1a ed. España: Editores Técnicos Asociados S.A., 1977. 134 p.

11. JARVIS, Paul., JEFFERSON, Benjamin., GREGORY, James. y PARSONS, Sean. *A review of floc strength and breakage*. [en línea]. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135405002794>>. [Consulta: 8 de octubre de 2017].
12. MELISSARI, Blas. *Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa*. [en línea]. <http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_sui_mpecto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf>. [Consulta: 7 de octubre de 2017].
13. SASIA, Pedro. *Polímeros de acrilamida y copolímeros derivados para el tratamiento de aguas*. [en línea]. <<http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/DIC/Sasia.PDF>>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].
14. VARGAS, Lidia. *Floculación*. [en línea]. <<http://www.ingenieroambiental.com/4014/seis.pdf>>. [Consulta: 7 de octubre de 2017].
15. VAZ, Cláudio., STAMILE, Sérgio. y DA SILVA, José. *Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de calderas*. [en línea]. <<http://www.atsguate.com/productos.pdf>>. [Consulta: 8 de octubre de 2017].
16. ZHANG, Yudong. *Preparation of copolymers of acrylic acid and acrylamide for copper (II) capture from aqueous solutions*. Tesis de maestría. Canadá: Universidad de Waterloo. 2009. 108 p.

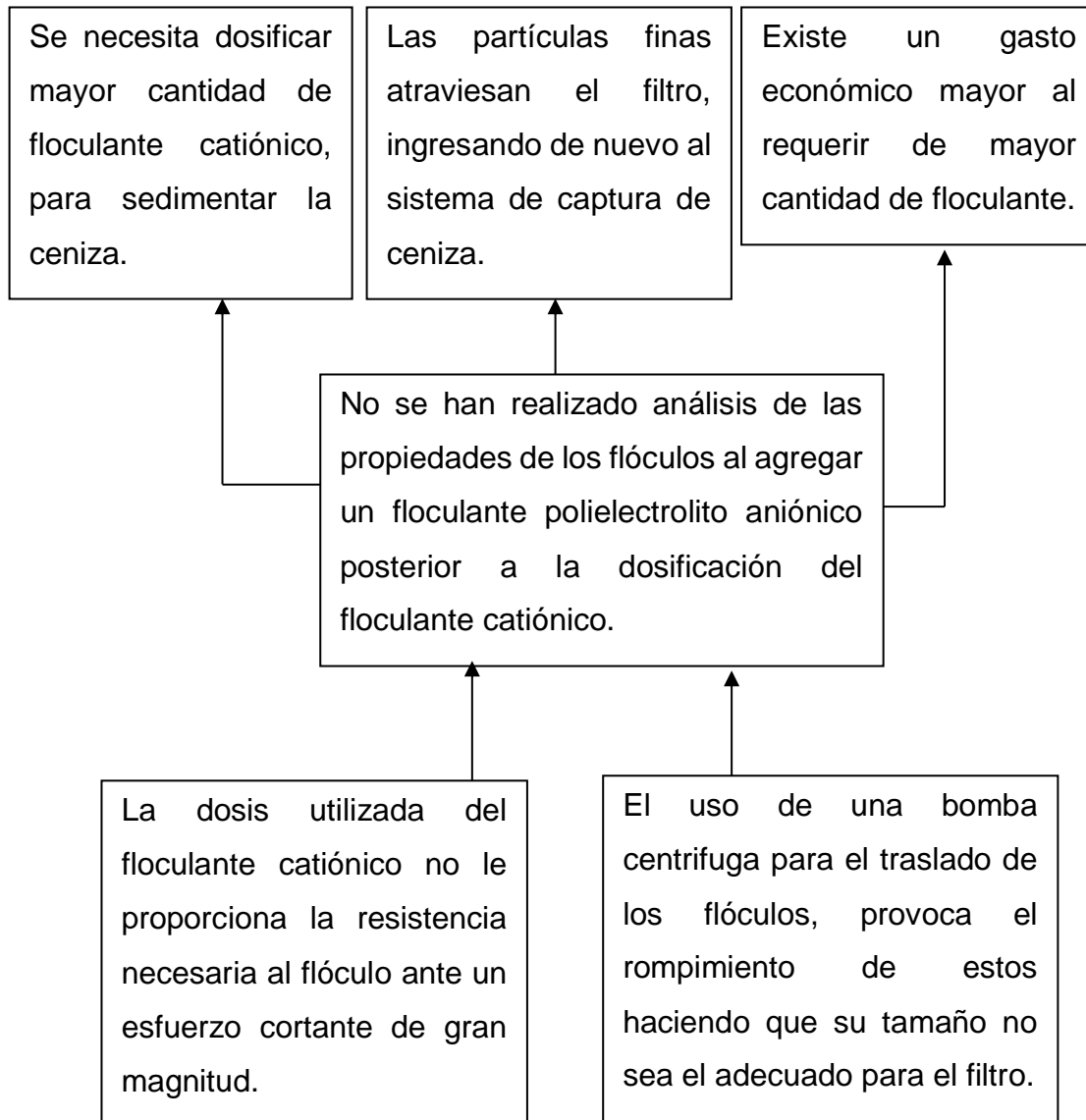
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



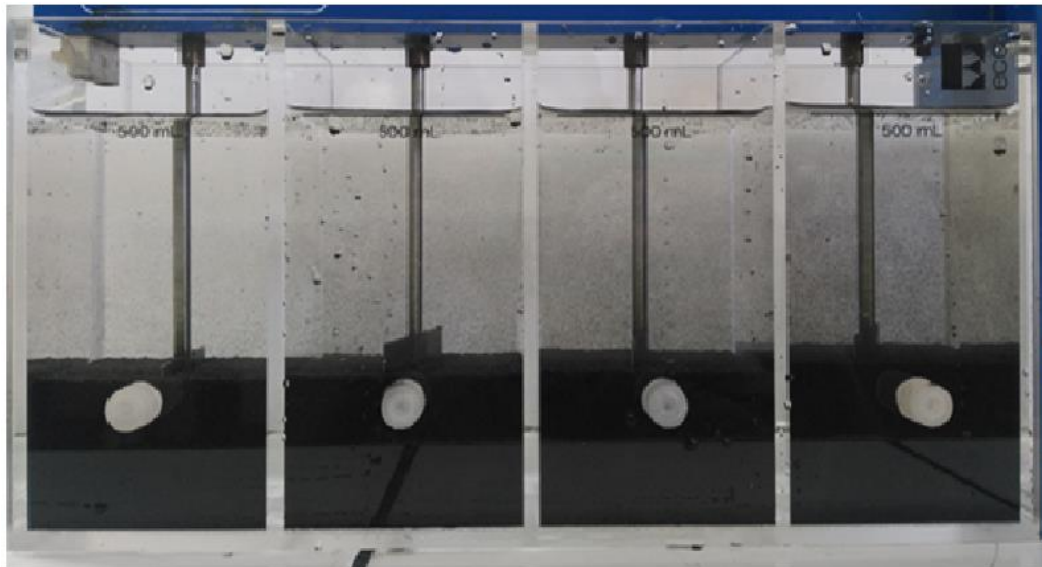
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Fotografías del sistema dual con el floculante aniónico de baja carga a diferentes dosis**

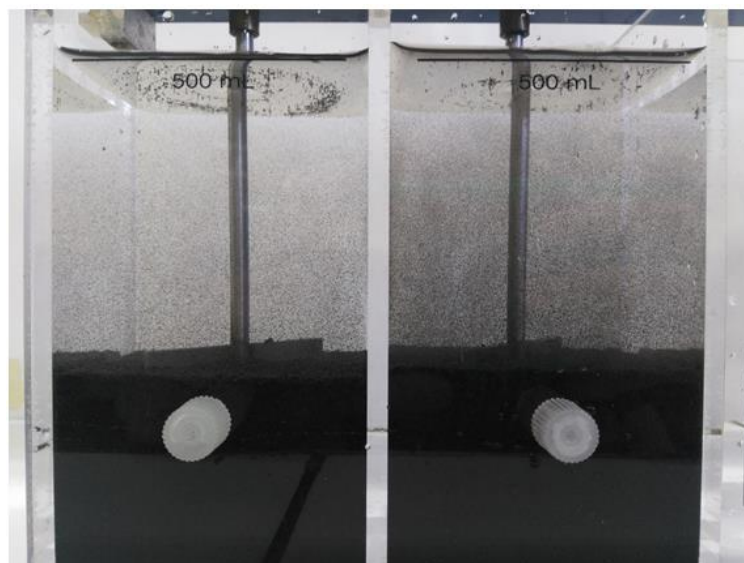


1ppm

2ppm

3ppm

4ppm

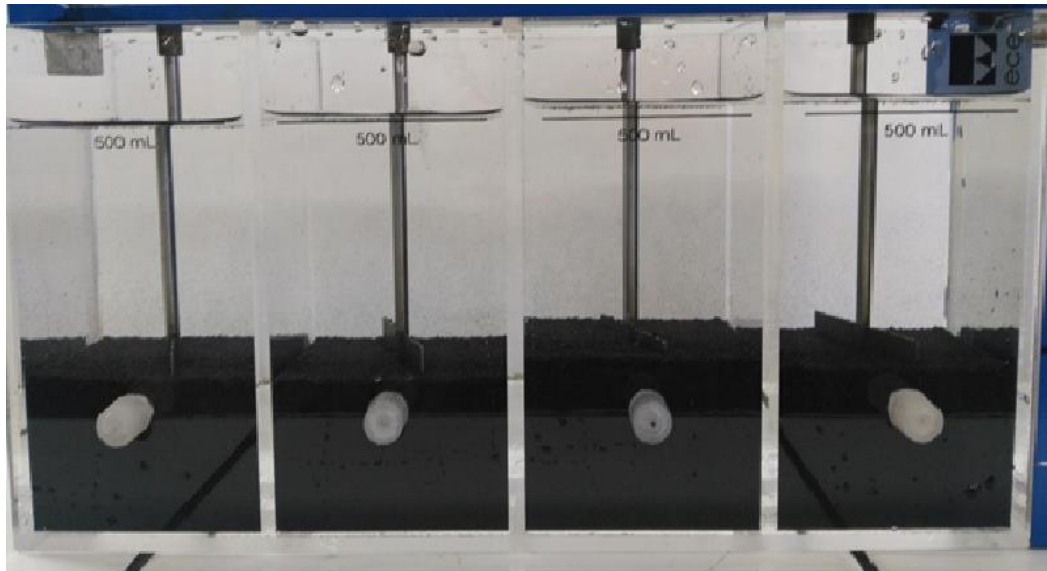


5ppm

6ppm

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Fotografías del sistema dual con el floculante aniónico de mediana carga a diferentes dosis**

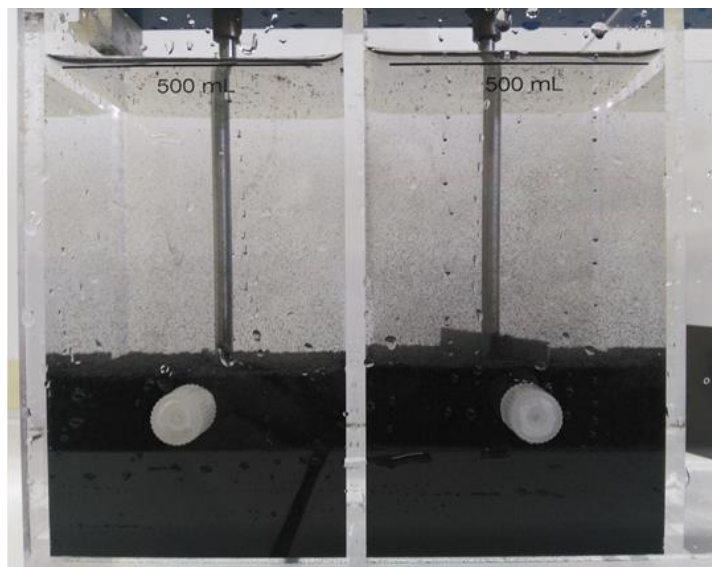


1ppm

2ppm

3ppm

4ppm

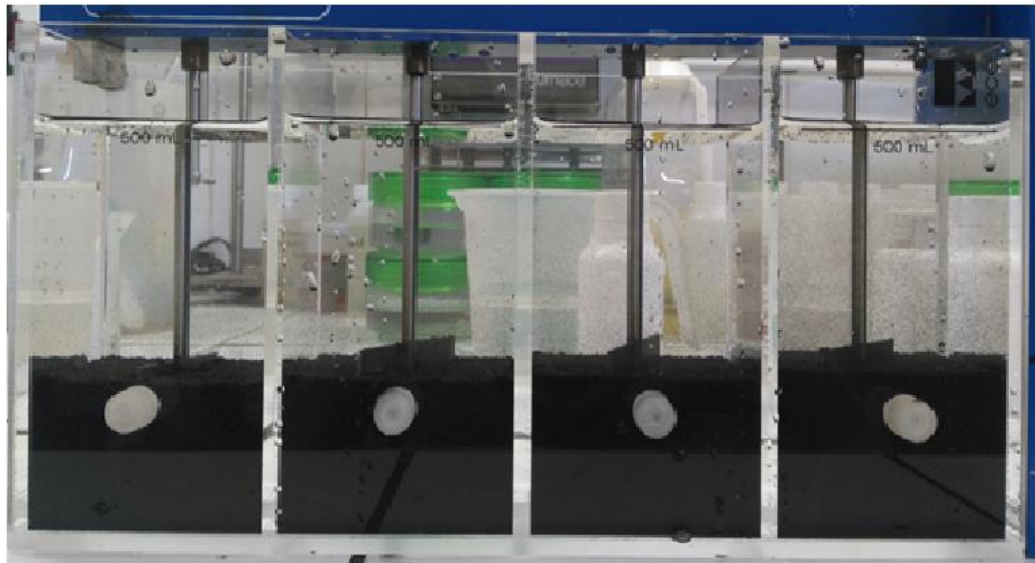


5ppm

6ppm

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fotografías del sistema dual con el floculante aniónico de alta carga a diferentes dosis**

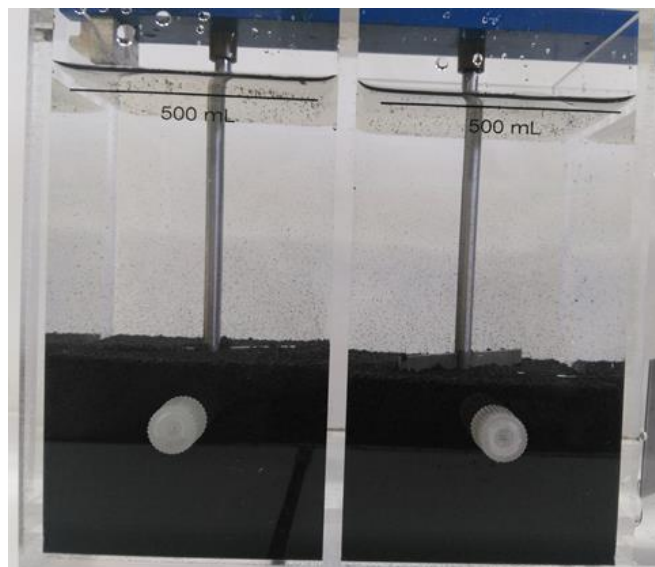


1ppm

2ppm

3ppm

4ppm



5ppm

6ppm

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Media de los tamaños de flóculo para cada dosis de los distintos floculantes aniónicos**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Índice de Willcomb			
		1	2	3	Media
Baja	1	8	8	8	8
	2	8	6	8	8
	3	6	6	8	6
	4	6	6	6	6
	5	4	6	4	4
	6	4	4	4	4
Mediana	1	10	10	10	10
	2	10	10	10	10
	3	10	10	8	10
	4	8	8	8	8
	5	6	6	6	6
	6	4	6	4	4
Alta	1	10	10	10	10
	2	10	10	10	10
	3	10	10	10	10
	4	8	10	10	10
	5	8	8	8	8
	6	8	8	8	8

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Media de los tiempos de sedimentación para cada dosis de los distintos floculantes aniónicos**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Tiempo de sedimentación (s)			
		1	2	3	Media
Baja	1	42,31	12,89	36,70	30,63
	2	36,72	10,79	34,28	27,26
	3	39,04	10,32	29,95	26,44
	4	32,57	11,54	28,43	24,18
	5	33,40	12,02	27,59	24,34
	6	35,19	11,25	22,81	23,08
Mediana	1	21,75	38,16	43,09	34,33
	2	30,39	37,52	40,22	36,04
	3	31,48	42,27	46,43	40,06
	4	33,45	37,93	44,61	38,66
	5	39,17	39,63	41,55	40,12
	6	41,87	36,24	47,96	42,02
Alta	1	48,64	41,42	51,75	47,27
	2	45,71	42,19	55,30	47,73
	3	50,15	45,56	48,33	48,01
	4	45,02	42,43	60,68	49,38
	5	46,69	45,21	59,88	50,59
	6	50,57	46,12	58,27	51,65

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Media de la turbidez para cada dosis de los distintos floculantes aniónicos**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Turbidez (NTU)			
		1	2	3	Media
Baja	1	6,99	10,76	4,47	7,41
	2	13,91	10,78	5,48	10,06
	3	15,76	12,50	13,38	13,88
	4	24,50	14,62	11,82	16,98
	5	19,09	24,28	17,82	20,40
	6	22,25	33,10	18,94	24,76
Mediana	1	10,75	4,95	4,94	6,88
	2	2,37	10,04	7,11	6,51
	3	2,82	6,04	10,79	6,55
	4	1,91	8,78	10,18	6,96
	5	15,33	10,85	34,40	20,19
	6	24,11	19,79	44,83	29,58
Alta	1	5,74	9,26	4,60	6,53
	2	3,08	9,86	5,09	6,01
	3	4,12	13,42	4,20	7,25
	4	6,75	15,72	4,92	9,13
	5	5,28	19,13	5,51	9,97
	6	4,79	18,22	9,43	10,81

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Media de los pesos finales para cada dosis de los distintos floculantes aniónicos**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	masa final (g)			
		1	2	3	Media
Baja	1	2,69	2,85	2,78	2,77
	2	2,48	2,80	2,83	2,70
	3	2,39	2,85	2,77	2,67
	4	2,59	2,73	2,66	2,66
	5	2,53	2,64	2,75	2,64
	6	2,52	2,58	2,77	2,62
Mediana	1	2,77	2,63	2,80	2,73
	2	2,71	2,72	2,85	2,76
	3	2,50	2,66	2,75	2,64
	4	2,27	2,42	2,72	2,47
	5	2,44	2,32	2,65	2,47
	6	2,09	2,46	2,43	2,33
Alta	1	2,13	2,20	2,18	2,17
	2	2,44	2,27	2,18	2,30
	3	2,57	2,22	2,15	2,31
	4	2,61	2,41	2,21	2,41
	5	2,78	2,32	2,32	2,47
	6	2,78	2,31	2,41	2,50

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Determinación del factor resistencia para cada floculante aniónico**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	masa final (g)	masa inicial (g)	factor de resistencia (%)
Baja	1	2,77	3	92,44
	2	2,70		90,11
	3	2,67		89,00
	4	2,66		88,67
	5	2,64		88,00
	6	2,62		87,44
Media	1	2,73	3	91,11
	2	2,76		92,00
	3	2,64		87,89
	4	2,47		82,33
	5	2,47		82,33
	6	2,33		77,56
Alta	1	2,17	3	72,33
	2	2,30		76,56
	3	2,31		77,11
	4	2,41		80,33
	5	2,47		82,44
	6	2,50		83,33

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Media de los tiempos de filtración para cada dosis de los distintos floculantes aniónicos**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Tiempo de filtración (s)			
		1	2	3	Media
Baja	1	80,83	104,48	130,62	105,31
	2	136,03	134,58	165,16	145,25
	3	118,64	142,58	165,02	142,08
	4	133,10	164,75	150,84	149,56
	5	175,97	225,84	181,58	194,46
	6	188,55	183,82	178,54	183,63
Mediana	1	57,38	47,10	50,61	51,69
	2	70,74	66,44	49,39	62,19
	3	97,72	61,25	91,36	83,44
	4	116,84	81,27	90,53	96,21
	5	73,74	83,12	75,72	77,52
	6	74,50	70,81	88,34	77,89
Alta	1	52,78	33,12	81,81	55,90
	2	72,22	55,70	66,58	64,83
	3	60,33	79,48	64,12	67,97
	4	52,64	70,20	58,28	60,37
	5	64,06	114,99	56,61	78,55
	6	62,86	81,65	59,08	67,86

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Determinación de los índices de filtrabilidad para cada floculante aniónico**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Tiempo de filtración (s)	Tiempo del blanco (s)	Índice de filtrabilidad
Baja	1	105,31	3,22	32,70
	2	145,25		45,11
	3	142,08		44,12
	4	149,56		46,45
	5	194,46		60,39
	6	183,63		57,03
Media	1	51,69	3,22	16,05
	2	62,19		19,31
	3	83,44		25,91
	4	96,21		29,88
	5	77,52		24,07
	6	77,89		24,19
Alta	1	55,90	3,22	17,36
	2	64,83		20,13
	3	67,97		21,11
	4	60,37		18,75
	5	78,55		24,39
	6	67,86		21,07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Efecto sinérgico del sistema dual respecto al tamaño de floculo**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Tamaño dual	Tamaño Catiónico	Efecto Sinérgico (%)
Baja	1	8	8	100
	2	8		100
	3	6		75
	4	6		75
	5	4		50
	6	4		50
Mediana	1	10	8	125
	2	10		125
	3	10		125
	4	8		100
	5	6		75
	6	4		50
Alta	1	10	8	125
	2	10		125
	3	10		125
	4	10		125
	5	8		100
	6	8		100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Efecto sinérgico del sistema dual respecto al tiempo de sedimentación**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Tiempo sedimentación dual (s)	Tiempo de sedimentación catiónico (s)	Efecto Sinérgico (%)
Baja	1	30,63	20,57	67
	2	27,26		75
	3	26,44		78
	4	24,18		85
	5	24,34		85
	6	23,08		89
Mediana	1	34,33	20,57	60
	2	36,04		57
	3	40,06		51
	4	38,66		53
	5	40,12		51
	6	42,02		49
Alta	1	47,27	20,57	44
	2	47,73		43
	3	48,01		43
	4	49,38		42
	5	50,59		41
	6	51,65		40

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Efecto sinérgico del sistema dual respecto a la turbidez**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Turbidez dual (NTU)	Turbidez catiónico (NTU)	Efecto Sinérgico (%)
Baja	1	7,41	17,38	235
	2	10,06		173
	3	13,88		125
	4	16,98		102
	5	20,40		85
	6	24,76		70
Mediana	1	6,88	17,38	253
	2	6,51		267
	3	6,55		265
	4	6,96		250
	5	20,19		86
	6	29,58		59
Alta	1	6,53	17,38	266
	2	6,01		289
	3	7,25		240
	4	9,13		190
	5	9,97		174
	6	10,81		161

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Efecto sinérgico del sistema dual respecto a la resistencia del floculo**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Resistencia dual (%)	Resistencia catiónico (%)	Efecto Sinérgico (%)
Baja	1	92,44	79,33	117
	2	90,11		114
	3	89,00		112
	4	88,67		112
	5	88,00		111
	6	87,44		110
Mediana	1	91,11	79,33	115
	2	92,00		116
	3	87,89		111
	4	82,33		104
	5	82,33		104
	6	77,56		98
Alta	1	72,33	79,33	91
	2	76,56		97
	3	77,11		97
	4	80,33		101
	5	82,44		104
	6	83,33		105

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Efecto sinérgico del sistema dual respecto a la filtrabilidad**

Floculante aniónico	Dosis (ppm)	Filtrabilidad dual	Filtrabilidad catiónico	Efecto Sinérgico (%)
Baja	1	32,70	23,69	72
	2	45,11		53
	3	44,12		54
	4	46,45		51
	5	60,39		39
	6	57,03		42
Mediana	1	16,05	23,69	148
	2	19,31		123
	3	25,91		91
	4	29,88		79
	5	24,07		98
	6	24,19		98
Alta	1	17,36	23,69	136
	2	20,13		118
	3	21,11		112
	4	18,75		126
	5	24,39		97
	6	21,07		112

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Análisis de varianza del tamaño del flóculo al variar la dosis y carga del floculante aniónico**

RESUMEN	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5	Dosis 6	Total
Baja carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	24,0000	22,0000	20,0000	18,0000	14,0000	12,0000	110,0000
Promedio	8,0000	7,3333	6,6667	6,0000	4,6667	4,0000	6,1111
Varianza	0,0000	1,3333	1,3333	0,0000	1,3333	0,0000	2,5752
Mediana carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	30,0000	30,0000	28,0000	24,0000	18,0000	14,0000	144,0000
Promedio	10,0000	10,0000	9,3333	8,0000	6,0000	4,6667	8,0000
Varianza	0,0000	0,0000	1,3333	0,0000	0,0000	1,3333	4,7059
Alta carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	30,0000	30,0000	30,0000	28,0000	24,0000	24,0000	166,0000
Promedio	10,0000	10,0000	10,0000	9,3333	8,0000	8,0000	9,2222
Varianza	0,0000	0,0000	0,0000	1,3333	0,0000	0,0000	1,0065
Total							
Cuenta	9	9	9	9	9	9	
Suma	84,0000	82,0000	78,0000	70,0000	56,0000	50,0000	
Promedio	9,3333	9,1111	8,6667	7,7778	6,2222	5,5556	
Varianza	1,0000	2,1111	3,0000	2,4444	2,4444	3,7778	
Origen de las variaciones	F	P	Fc				
Carga	99,5	2,1589E-15	3,2594				
Dosis	50	3,3042E-15	2,4772				
Interacción	3,1	0,00603577	2,1061				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: dado que F es mayor a F crítica, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; indicando que la variación de carga y dosis en el floculante aniónico tiene un efecto significativo sobre el tamaño del flóculo.

Apéndice 19. **Análisis de varianza del tiempo de sedimentación al variar la dosis y carga del aniónico**

RESUMEN	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5	Dosis 6	Total
Baja carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	91,9000	81,7900	79,3100	72,5400	73,0100	69,2500	467,8000
Promedio	30,6333	27,2633	26,4367	24,1800	24,3367	23,0833	25,9889
Varianza	243,9874	205,0164	215,4672	124,1121	122,2142	143,3369	130,6934
Mediana carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	103,0000	108,1300	120,1800	115,9900	120,3500	126,0700	693,7200
Promedio	34,3333	36,0433	40,0600	38,6633	40,1167	42,0233	38,5400
Varianza	124,8314	25,7926	59,5387	31,5397	1,5937	34,3572	39,8783
Alta carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	141,8100	143,2000	144,0400	148,1300	151,7800	154,9600	883,9200
Promedio	47,2700	47,7333	48,0133	49,3767	50,5933	51,6533	49,1067
Varianza	28,0849	46,0384	5,3422	97,5010	65,2292	37,7858	35,6255
Total							
Cuenta	9	9	9	9	9	9	
Suma	336,7100	333,1200	343,5300	336,6600	345,1400	350,2800	
Promedio	37,4122	37,0133	38,1700	37,4067	38,3489	38,9200	
Varianza	156,4542	148,3076	159,3875	183,2150	178,2820	212,3332	
Origen de las variaciones	F	P	Fc				
Carga	26,9240	0,0000	3,2594				
Dosis	0,0519	0,9982	2,4772				
Interacción	0,2888	0,9796	2,1061				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: debido a que F es mayor que F crítica para la carga y contrario para la dosis, se acepta la hipótesis alternativa para la primera y la hipótesis nula para la segunda; indicando que la variación de la carga del floculante aniónico tiene efecto significativo sobre el tiempo de sedimentación, pero que la dosis no.

Apéndice 20. **Análisis de varianza de la turbidez al variar la dosis y carga del floculante aniónico**

RESUMEN	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5	Dosis 6	Total
Baja carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	22,2200	30,1700	41,6400	50,9400	61,1900	74,2900	280,4500
Promedio	7,4067	10,0567	13,8800	16,9800	20,3967	24,7633	15,5806
Varianza	10,0212	18,1586	2,8444	44,3728	11,7134	54,8640	53,7078
Mediana carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	20,6400	19,5200	19,6500	20,8700	60,5800	88,7300	229,9900
Promedio	6,8800	6,5067	6,5500	6,9567	20,1933	29,5767	12,7772
Varianza	11,2327	14,9802	16,0753	19,5916	156,3896	179,1637	132,1641
Alta carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	19,6000	18,0300	21,7400	27,3900	29,9200	32,4400	149,1200
Promedio	6,5333	6,0100	7,2467	9,1300	9,9733	10,8133	8,2844
Varianza	5,9009	12,1269	28,5841	33,4083	62,8966	46,5264	25,6896
Total							
Cuenta	9	9	9	9	9	9	
Suma	62,4600	67,7200	83,0300	99,2000	151,6900	195,4600	
Promedio	6,9400	7,5244	9,2256	11,0222	16,8544	21,7178	
Varianza	6,9338	14,9695	24,1529	45,1948	84,3919	141,3677	
Origen de las variaciones	F	P	Fc				
Carga	6,0217	0,0055	3,2594				
Dosis	7,6466	0,0001	2,4772				
Interacción	1,4589	0,1952	2,1061				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: dado que el valor de F para la carga y la dosis es mayor que la F crítica, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; indicando que las medias difieren significativamente entre sí y que la variación de la carga y la dosis del floculante aniónico tiene efecto significativo sobre la turbidez.

Apéndice 21. **Análisis de varianza de la resistencia del flóculo al variar la dosis y carga del floculante aniónico**

RESUMEN	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5	Dosis 6	Total
Baja carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	8,3200	8,1100	8,0100	7,9800	7,9200	7,8700	48,2100
Promedio	2,7733	2,7033	2,6700	2,6600	2,6400	2,6233	2,6783
Varianza	0,0064	0,0376	0,0604	0,0049	0,0121	0,0170	0,0189
Mediana carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	8,2000	8,2800	7,9100	7,4100	7,4100	6,9800	46,1900
Promedio	2,7333	2,7600	2,6367	2,4700	2,4700	2,3267	2,5661
Varianza	0,0082	0,0061	0,0160	0,0525	0,0279	0,0422	0,0438
Alta carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	6,5100	6,8900	6,9400	7,2300	7,4200	7,5000	42,4900
Promedio	2,1700	2,2967	2,3133	2,4100	2,4733	2,5000	2,3606
Varianza	0,0013	0,0174	0,0506	0,0400	0,0705	0,0613	0,0420
Total							
Cuenta	9	9	9	9	9	9	
Suma	23,0300	23,2800	22,8600	22,6200	22,7500	22,3500	
Promedio	2,5589	2,5867	2,5400	2,5133	2,5278	2,4833	
Varianza	0,0894	0,0632	0,0609	0,0371	0,0347	0,0468	
Origen de las variaciones	F	P	Fc				
Carga	15,7965	1,18E-05	3,2594				
Dosis	0,3927	0,8506	2,4772				
Interacción	2,2175	0,0393	2,1061				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: debido a que F es mayor que F crítica para la carga y contrario para la dosis, se acepta la hipótesis alternativa para la primera y la hipótesis nula para la segunda; indicando que la variación de la carga del floculante aniónico tiene efecto significativo sobre la resistencia de los flóculos, pero que la dosis no.

Apéndice 22. **Análisis de varianza del índice de filtrabilidad al variar la dosis y carga del floculante aniónico**

RESUMEN	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5	Dosis 6	Total
Baja carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	98,1149	135,2888	132,3727	142,8292	181,1770	171,0901	860,8727
Promedio	32,7050	45,0963	44,1242	47,6097	60,3923	57,0300	47,8263
Varianza	59,8239	28,4376	51,8849	44,7523	71,9725	2,4184	117,4118
Mediana carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	48,1646	57,9410	77,7422	89,6398	72,2298	72,5621	418,2795
Promedio	16,0549	19,3137	25,9141	29,8799	24,0766	24,1874	23,2378
Varianza	2,6335	12,2972	36,6036	32,8432	2,3576	8,2376	32,3283
Alta carga							
Cuenta	3	3	3	3	3	3	18
Suma	52,0839	60,4037	63,3323	56,2484	73,1863	63,2267	368,4814
Promedio	17,3613	20,1346	21,1108	18,7495	24,3954	21,0756	20,4712
Varianza	57,8677	6,8010	9,9182	7,7519	97,3727	14,0934	27,9047
Total							
Cuenta	9	9	9	9	9	9	
Suma	198,3634	253,6335	273,4472	288,7174	326,5932	306,8789	
Promedio	22,0404	28,1815	30,3830	32,0797	36,2881	34,0977	
Varianza	94,3764	172,9469	135,1392	180,2302	369,7645	303,8180	
Origen de las variaciones	F	P	F				
Carga	134,0522	2,08E-17	3,2594				
Dosis	7,4425	7,00E-05	2,4772				
Interacción	2,5971	0,0174	2,1061				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: debido a que F es mayor que F crítica, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; indicando que la variación de la carga y dosis del floculante aniónico tiene efecto significativo sobre el índice de filtrabilidad.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de seguridad floculante catiónico

Solid Grade Cationic Polyelectrolyte			
Chemical Nature	Copolymer of acrylamide and quaternized cationic monomer		
Application Areas	Polyelectrolyte for the conditioning of a variety of municipal and industrial substrates prior to mechanical or static solid/liquid separation. This product is not compliant for use in potable water applications.		
Benefits	Highly effective across a wide range of applications including mechanical dewatering, thickening, flotation, and clarification. Operation over a wide pH range (4-9).		
Typical Properties	Product type: Powder Physical form: Off-white granular solid Cationic charge: Low Molecular weight: High Specific gravity: 0.75 Bulk density: 46.8 lb/ft ³ Ph 1% solution: 4-6		
Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C			
Concentration	0.25%	0.50%	1.0%
Viscosity	350	600	1,350

Fuente: empresa JARSA, S.A.

Anexo 2. **Hoja de seguridad floculante aniónico de mediana carga**

Potable Water Grade Anionic Polyelectrolyte																											
Chemical Nature	Copolymer of acrylamide and acrylic acid																										
Application Areas	<p>Polyelectrolyte used as a coagulant aid for clarification and filtration of potable water, and for the conditioning of substrates prior to thickening and dewatering.</p> <p>American Standard ANSI/NSF 60 compliant for coagulation and flocculation to a maximum concentration of 1.0mg/L.</p> <p>This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.</p>																										
Benefits	<ul style="list-style-type: none"> • Reduction of the inorganic coagulant dosage • Increased clarifier throughput • Reduction of sludge production • Reduction in overall treatment cost 																										
Typical Properties	<table border="0"> <tr> <td>Product type:</td> <td>Powder</td> </tr> <tr> <td>Physical form:</td> <td>Off-white granular solid</td> </tr> <tr> <td>Anionic charge:</td> <td>Medium-low</td> </tr> <tr> <td>Molecular weight:</td> <td>Very high</td> </tr> <tr> <td>Specific gravity:</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>Bulk density:</td> <td>46.8 lb/ft³</td> </tr> <tr> <td>Ph 1% solution:</td> <td>6-8</td> </tr> </table> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">Concentration</th> <th style="text-align: center;">0.25%</th> <th style="text-align: center;">0.50%</th> <th style="text-align: center;">1.0%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Viscosity</td> <td style="text-align: center;">650</td> <td style="text-align: center;">1,250</td> <td style="text-align: center;">2,000</td> </tr> </tbody> </table>	Product type:	Powder	Physical form:	Off-white granular solid	Anionic charge:	Medium-low	Molecular weight:	Very high	Specific gravity:	0.75	Bulk density:	46.8 lb/ft ³	Ph 1% solution:	6-8	Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C				Concentration	0.25%	0.50%	1.0%	Viscosity	650	1,250	2,000
Product type:	Powder																										
Physical form:	Off-white granular solid																										
Anionic charge:	Medium-low																										
Molecular weight:	Very high																										
Specific gravity:	0.75																										
Bulk density:	46.8 lb/ft ³																										
Ph 1% solution:	6-8																										
Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C																											
Concentration	0.25%	0.50%	1.0%																								
Viscosity	650	1,250	2,000																								

Fuente: empresa JARSA, S.A.

Anexo 3. Hoja de seguridad floculante aniónico de alta carga

Solid Grade Anionic Polyelectrolyte															
Chemical Nature	Copolymer of acrylamide and acrylic acid														
Application Areas	<p>Polyelectrolyte for the conditioning of a variety of municipal and industrial substrates prior to mechanical or static solid/liquid separation.</p> <p>This product is not compliant for use in potable water applications.</p> <p>This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.</p>														
Benefits	Highly effective across a wide range of applications including mechanical dewatering, thickening, flotation, and clarification. Operation over a wide pH range (4-9).														
Typical Properties	<table border="0"> <tr> <td>Product type:</td> <td>Powder</td> </tr> <tr> <td>Physical form:</td> <td>Off-white granular solid</td> </tr> <tr> <td>Anionic charge:</td> <td>Ultra high</td> </tr> <tr> <td>Molecular weight:</td> <td>High</td> </tr> <tr> <td>Specific gravity:</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>Bulk density:</td> <td>46.8 lb/ft³</td> </tr> <tr> <td>Ph 1% solution:</td> <td>6-8</td> </tr> </table>	Product type:	Powder	Physical form:	Off-white granular solid	Anionic charge:	Ultra high	Molecular weight:	High	Specific gravity:	0.75	Bulk density:	46.8 lb/ft ³	Ph 1% solution:	6-8
Product type:	Powder														
Physical form:	Off-white granular solid														
Anionic charge:	Ultra high														
Molecular weight:	High														
Specific gravity:	0.75														
Bulk density:	46.8 lb/ft ³														
Ph 1% solution:	6-8														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C</th> </tr> <tr> <th>Concentration</th> <th>0.25%</th> <th>0.50%</th> <th>1.0%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Viscosity</td> <td>200</td> <td>500</td> <td>1,100</td> </tr> </tbody> </table>		Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C				Concentration	0.25%	0.50%	1.0%	Viscosity	200	500	1,100		
Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C															
Concentration	0.25%	0.50%	1.0%												
Viscosity	200	500	1,100												

Fuente: empresa JARSA, S.A.

Anexo 4. **Hoja de seguridad floculante aniónico de baja carga**

Solid Grade Anionic Polyelectrolyte																											
Chemical Nature	Copolymer of acrylamide and acrylic acid																										
Application Areas	<p>Polyelectrolyte for the conditioning of a variety of municipal and industrial substrates prior to mechanical or static solid/liquid separation.</p> <p>This product is not compliant for use in potable water applications.</p> <p>This product is FDA approved. Contact a sales representative for more information.</p>																										
Benefits	Highly effective across a wide range of applications including mechanical dewatering, thickening, flotation, and clarification. Operation over a wide pH range (4-9).																										
Typical Properties	<table> <tbody> <tr> <td>Product type:</td> <td>Powder</td> </tr> <tr> <td>Physical form:</td> <td>Off-white granular solid</td> </tr> <tr> <td>Anionic charge:</td> <td>Very low</td> </tr> <tr> <td>Molecular weight:</td> <td>Very high</td> </tr> <tr> <td>Specific gravity:</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>Bulk density:</td> <td>46.8 lb/ft³</td> </tr> <tr> <td>Ph 1% solution:</td> <td>6-8</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">Concentration</th> <th style="text-align: center;">0.25%</th> <th style="text-align: center;">0.50%</th> <th style="text-align: center;">1.0%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Viscosity</td> <td style="text-align: center;">320</td> <td style="text-align: center;">650</td> <td style="text-align: center;">1,700</td> </tr> </tbody> </table>	Product type:	Powder	Physical form:	Off-white granular solid	Anionic charge:	Very low	Molecular weight:	Very high	Specific gravity:	0.75	Bulk density:	46.8 lb/ft ³	Ph 1% solution:	6-8	Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C				Concentration	0.25%	0.50%	1.0%	Viscosity	320	650	1,700
Product type:	Powder																										
Physical form:	Off-white granular solid																										
Anionic charge:	Very low																										
Molecular weight:	Very high																										
Specific gravity:	0.75																										
Bulk density:	46.8 lb/ft ³																										
Ph 1% solution:	6-8																										
Apparent Viscosity/(cP) @ 25 °C																											
Concentration	0.25%	0.50%	1.0%																								
Viscosity	320	650	1,700																								

Fuente: empresa JARSA, S.A.