



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

**DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE
POLICLORURO DE ALUMINIO $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO
 $[Ca(OH)_2]$ PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA
FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA**

Katherine Gabriela Aguilar Galindo

Asesorado por el Ing. Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas

Guatemala, agosto de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE
POLICLORURO DE ALUMINIO $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO
 $[Ca(OH)_2]$ PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA
FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KATHERINE GABRIELA AGUILAR GALINDO

ASESORADO POR EL ING. EMMANUEL DE JESÚS MONTUFAR CÁRDENAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2022

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 Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
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:

**DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE
POLICLORURO DE ALUMINIO $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO
 $[Ca(OH)_2]$ PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA
FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 3 de mayo de 2020.



Katherine Gabriela Aguilar Galindo

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 04 de marzo de 2022.
REF.EPS.DOC.99.03.2022.

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Ing. Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Katherine Gabriela Aguilar Galindo** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **201325650**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO [Ca(OH)₂] PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Sergio Alejandro Recinos
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química

c.c. Archivo
SAR/ra

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 04 de marzo de 2022.
REF.EPS.D.67.03.2022.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

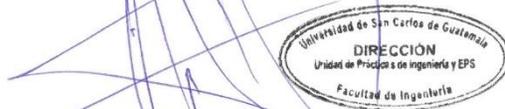
Estimado Ingeniero Álvarez Mejía.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO [Ca(OH)₂] PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Katherine Gabriela Aguilar Galindo, quien fue debidamente asesorada y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS

/ra

Guatemala, 18 de enero 2022

Ing. William Guillermo Álvarez Mejía
Director de escuela de ingeniería química
Facultad de ingeniería
USAC
Presente

Estimado Ingeniero Álvarez:

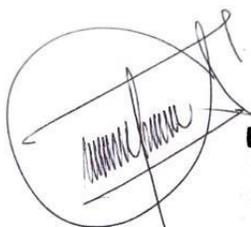
Por este medio, hago constar que yo, el ingeniero Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas, con colegiado número mil novecientos ochenta y seis (1986), doy como visto bueno el desarrollo del trabajo de investigación final de graduación de la alumna Katherine Gabriela Aguilar Galindo identificado con CUI 2713099460101, alumna a quien he podido apoyar como asesor de su ejercicio profesional supervisado.

Dado por concluido el desarrollo de la misma investigación y planteado soluciones inmediatas y efectivas para el beneficio de la institución donde se desarrolló la misma.

Doy por concluido de forma eficiente ante mi persona el desarrollo de su trabajo de investigación, como tema: **DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO $[Ca(OH)_2]$ PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA.**

Línea de investigación: procesos químicos industriales
Área: operaciones unitarias

Atentamente



Emmanuel J. Montufar C.
Ingeniero Químico
Col. 1986

Ing. Qco. Emmanuel de Jesús Montufar
Cárdenas
Colegiado No. 1986
Asesor de trabajo de
graduación



Guatemala, 24 de mayo de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.012.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **057-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Katherine Gabriela Aguilar Galindo**.
Identificado con número de carné: **2713099460101**.
Identificado con registro académico: **201325650**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final EPS (6 meses), Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO [Ca(OH)₂] PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ingrid Lorena Benítez P.
Ingeniera en Química
Máster en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente
Colegiado No. 1974
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.158.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO [Ca(OH)₂] PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA**, presentado por: **Katherine Gabriela Aguilar Galindo**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Mesa, M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto de 2022.

LNG.DECANATO.OI.570.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA COMBINACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] Y LECHADA DE HIDRÓXIDO DE CALCIO [Ca(OH)₂] PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO CON TINTA FLEXOGRÁFICA A BASE DE AGUA**, presentado por: **Katherine Gabriela Aguilar Galindo**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su gracia, amor y fidelidad en estos años por enseñarme que siempre es a su tiempo y no en el mío.

Mis padres

Rommel Aguilar, por enseñarme a no darme por vencida, a luchar por mis sueños y motivarme a ser mejor, por las noches de desvelo explicándome matemática, y por los sacrificios para que nunca me faltara nada. Esto es por ti. Zecibel Galindo, por tu ejemplo de que nunca es tarde para conseguir lo que se quiere. Tu amor y cuidados.

Mis hermanas

Keren y Ximena Aguilar, por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de ser profesional. Por darme los mejores años de mi juventud, aprendiendo y disfrutando.
Facultad de Ingeniería	Por enseñarme el verdadero valor de las cosas, que con perseverancia y esfuerzo puedo llegar muy lejos. Por ser una importante influencia en mi carrera, por ser el lugar en donde encontré grandes amigos.
Mis amigos de la Facultad	Alexander Milián y Byron Ortega, mis primeros amigos de la universidad, gracias porque hasta hoy sé que puedo contar con ustedes. Tiffany Martínez, Francisco Cárdenas, Carlos Mejía, Ennio López, hicieron que mis idas a la U fueran más fáciles, gracias por preocuparse por mí y por todos los momentos divertidos y de reflexión que vivimos, mientras íbamos de camino a la universidad. A todo el <i>team</i> de la cuarta, gracias por todas las risas y el apoyo.

Bryan Agustín y Mercedes Dardón

Juntos nos inspiramos a ser mejores. Gracias por estar en cada paso, por su amistad incondicional y honesta.

Stephanie Villavicencio y Allan Colindres

Por siempre estar pendientes de cómo iba en la universidad, por motivarme y ejercer presión. Los admiro.

Alejandra Zamora

Por brindarme tú amistad desde hace más de 10 años, por crecer personal y profesionalmente conmigo, por alegrarte de mis logros, por darme ánimos.

Cementos Progreso

Por permitirme desarrollar mi trabajo de EPS en su empresa, brindarme todas las herramientas necesarias para poder realizar un buen trabajo y ser mi primera experiencia laboral. Gracias a todo el equipo.

Emmanuel Montufar, Marcia Salguero y Marco Carballo

Por su apoyo en las revisiones y correcciones necesarias, por compartir conmigo todos sus conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPOTÉISIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	3
1.3. Determinación del problema.....	4
1.3.1. Definición	5
1.3.2. Delimitación	5
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Tintas flexográficas.....	9
2.1.1. Tinta a base de agua	9
2.1.2. Tintas a base solvente	10
2.1.3. Tintas U.V de base monomérica.....	10
2.2. Características del agua cruda	10
2.3. Sustancias dispersas en el agua	11
2.4. Color.....	12
2.4.1. Medición del color.....	15
2.4.2. Naturaleza del color en el agua	18

2.5.	Turbiedad	20
2.6.	Comparación entre características de color y turbiedad	20
2.7.	Teoría de la doble capa de las partículas.....	21
2.7.1.	Potencial Zeta	23
2.7.2.	Factores de estabilidad e inestabilidad	24
2.8.	Proceso de coagulación y floculación de las impurezas del agua	25
2.8.1.	Coagulación	26
2.8.1.1.	Factores que influyen en el proceso de coagulación	27
2.8.1.2.	Etapas de la coagulación	29
2.8.1.3.	Tipos de coagulación	31
2.8.1.4.	Comportamiento de coagulación según el tipo de agua	33
2.8.1.5.	Coagulantes	33
2.8.1.5.1.	Tipos de coagulantes	34
2.8.1.6.	pH óptimo para coagulación.....	40
2.8.1.7.	Criterios generales de dosificación.....	41
2.8.2.	Floculación	42
2.8.2.1.	Tipos de floculación.....	43
2.8.2.2.	Parámetros importantes en la floculación	43
2.9.	<i>Test</i> de jarras	44
2.9.1.	Elementos más importantes en el <i>test</i> de jarras.....	46
2.9.1.1.	Sistema de dosificación.....	47
2.9.1.2.	Sistemas de agitación	48
2.9.1.3.	Descripción de jarras.....	49
2.9.1.4.	Sistema de toma de muestra.....	50
2.9.1.5.	Sistema de iluminación	51

2.9.2.	Comparación del comportamiento del agua tratada en prueba de jarras y en planta de tratamiento.....	51
2.10.	Sedimentación.....	53
3.	METODOLOGÍA.....	55
3.1.	Variables.....	55
3.1.1.	Variables independientes	55
3.1.2.	Variables dependientes	55
3.1.3.	Tratamiento con variables factoriales	55
3.2.	Delimitación del campo de estudio	56
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	57
3.4.	Recursos materiales disponibles	57
3.4.1.	Materia prima.....	57
3.4.2.	Cristalería y materiales	57
3.4.3.	Equipo	58
3.4.4.	Reactivos químicos.....	59
3.5.	Técnica cuantitativa.....	60
3.5.1.	Potencial de hidrógeno	61
3.5.2.	Absorbancia para determinación de color	62
3.5.3.	Sólidos sedimentados.....	64
3.5.3.1.	Conos de sedimentación Imhoff	64
3.5.4.	Parámetros de aceptación.....	66
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	66
3.6.1.	Preparación de lechada de hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂].....	67
3.6.2.	Evaluación de dosificaciones de policloruro de aluminio [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O] e hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂] combinados. (Norma ASTM D2035:08	

	para <i>test</i> de jarras). Procedimiento basado en Arboleda, 2008	67
3.6.3.	Lectura de sedimentos formados (basado en procedimiento 2540 F. Sólidos sedimentables, Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales) (Baird, Eaton, & Rice, 2017).....	69
3.6.4.	Filtración de muestras de conos Imhoff.....	69
3.6.5.	Lectura de pH (Norma ASTM 1293).....	70
3.6.6.	Determinación de color real mediante espectrofotómetro. (Norma ISO 7887:2011 - Calidad del agua: examen y determinación de color)	71
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	72
3.8.	Análisis estadístico.....	73
3.8.1.	Medidas de tendencia central.....	73
3.8.2.	Medidas de dispersión	74
3.8.3.	Análisis de varianza ANOVA.....	74
3.9.	Plan de análisis de los resultados	75
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	75
3.9.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	76
4.	RESULTADOS.....	77
4.1.	Cuantificación del porcentaje de sedimentos, potencial de hidrógeno y absorbancia, de diferentes combinaciones de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ e hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ a distintos tiempos de agitación, para la clarificación de agua con tinta flexográfica.....	77

4.2.	Variación estadística de las distintas combinaciones de coagulante y ayuda de floculación, a los distintos tiempos de agitación	81
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	89
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES.....	97
	REFERENCIAS	99
	APÉNDICES	105
	ANEXOS.....	117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua	12
2.	Espectro electromagnético y luz visible.....	13
3.	Esquema de recepción de color del ojo humano	15
4.	Diagrama de espacio de color CIELAB	16
5.	Muestra de medición en un espectrofotómetro basado en matrices	18
6.	Configuración esquemática de la doble capa eléctrica	22
7.	Ubicación de Potencial Z.....	24
8.	Diagrama de flujo de proceso de coagulación	30
9.	Esquema del proceso de coagulación.....	31
10.	Ejemplo proceso de coagulación por adsorción	32
11.	Ejemplo proceso de coagulación por barrido	32
12.	Esquema de formación de flóculos	42
13.	Equipo de Jarras	46
14.	Jarras de precipitado (2 litros de capacidad).....	49
15.	Esquema de sifón para toma de muestra.....	50
16.	Esquema de base iluminada	51
17.	Escala de pH.....	61
18.	Cono Imhoff.....	65
19.	Relación de porcentaje de sedimento formado respecto a dosificación de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dos tiempos de agitación	78

20.	Relación de pH respecto a dosificación de hidróxido de calcio Ca(OH ₂) a dos tiempos de agitación.....	79
21.	Relación de absorbancia respecto a dosificación de hidróxido de calcio Ca(OH ₂) a dos tiempos de agitación.....	80

TABLAS

I.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores	6
II.	Colores reflejados y visibles por el ojo humano	14
III.	Diferencias entre color y turbiedad	21
IV.	Coagulación según tipo de agua	33
V.	Clasificación de los polielectrolitos.....	35
VI.	pH óptimo de coagulantes	40
VII.	Combinaciones recomendadas de coagulantes	40
VIII.	Características de agitadores	48
IX.	Diseño factorial de tratamientos	56
X.	Equipo de laboratorio.....	58
XI.	Reactivos químicos a utilizar	59
XII.	Reactivos químicos utilizados actualmente	60
XIII.	Escala de medición en conos Imhoff	66
XIV.	Hoja de datos originales para cada combinación de policloruro de aluminio [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O] e hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂] a distintos tiempos de agitación.....	72
XV.	Desviación estándar entre combinaciones con dosis de Ca(OH) ₂ constante a 15 minutos de agitación.....	81
XVI.	Desviación estándar entre combinaciones con dosis de [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O] constante a 15 minutos de agitación.....	82

XVII.	Análisis de varianza lineal de porcentaje de sedimentos a 15 minutos de agitación.....	82
XVIII.	Análisis de varianza lineal de pH a 15 minutos de agitación.....	83
XIX.	Análisis de varianza lineal de absorbancia a 15 minutos de agitación.....	83
XX.	Desviación estándar entre combinaciones con dosis de Ca(OH)_2 constante a 30 minutos de agitación	83
XXI.	Desviación estándar entre combinaciones con dosis de $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ constante a 30 minutos de agitación	84
XXII.	Análisis de varianza lineal de porcentaje de sedimentos a 30 minutos de agitación.....	84
XXIII.	Análisis de varianza lineal de pH a 30 minutos de agitación.....	85
XXIV.	Análisis de varianza lineal de absorbancia a 30 minutos de agitación.....	85
XXV.	Desviación estándar de resultados entre tiempos de agitación	86
XXVI.	Análisis de varianza de porcentaje de sedimentos formados a dos tiempos de agitación	86
XXVII.	Análisis de varianza de potencial de hidrógeno a dos tiempos de agitación.....	87
XXVIII.	Análisis de varianza de absorbancia a dos tiempos de agitación.	87
XXIX.	Cronograma de actividades	92
XXX.	Presupuesto generado para investigación	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia
$\alpha(\lambda)$	Coefficiente de absorción espectral
g	Gramos
kg	Kilogramo
L	Litros
m³	Metro cúbico
μm	Micras
ml	Mililitros
mm	Milímetro
Min	Minutos
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
T	Transmitancia

GLOSARIO

Alcalinidad	Capacidad del agua para neutralizar los ácidos. Esta capacidad se origina en el contenido de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), hidróxidos (OH^-) y ocasionalmente boratos, silicatos, y fosfatos. Se expresa en miligramos por litro de equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3).
Alícuota	Es una parte que mide exactamente un todo. Es una muestra, que representa las características del resto.
Alumbre	Sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Coagulante más ampliamente utilizado para el tratamiento de agua.
Análisis fisicoquímico	Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.
Calidad del agua	Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.
Clarificación	Proceso de separación de los sólidos del agua por acción de la gravedad.

Coagulación	Aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante adición de coagulantes.
Coagulantes	Sustancias químicas que inducen el aglutinamiento de las partículas muy finas, provocando la formación de partículas más grandes y pesadas.
Coloides	Sólidos finamente divididos (no se disuelven), que permanecen dispersos en un líquido por largo tiempo, debido a su menor diámetro y a la presencia de una carga eléctrica en su superficie.
Color	Impresión que producen en la retina, los rayos de luz reflejados y absorbidos por un cuerpo, según la longitud de onda de estos rayos.
Cuerpo receptor	Embalse natural, lago, laguna, río, manantial, humedal, pantano, y aguas subterráneas donde se descarga aguas residuales.
Dosificación	Acción mediante la cual se suministra una sustancia química al agua.
Dosis óptima	Concentración que produce la mayor eficiencia de reacción en un proceso químico.
Efluente	Líquido residual que fluye de un ente generador.

Espectrómetro	Aparato para observar los espectros, provistos de fotómetro, que determina en cada punto la intensidad relativa de las radiaciones de dos espectros luminosos.
Floc	Resultante de la unión de las partículas coloides en suspensión y el coagulante.
Floculación	Aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada.
Floculo	Conjunto de partículas pequeñas que son aglutinadas para formar partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación, se obtienen mediante tratamiento químico, físico o biológico.
Lechada	Líquido fino y claro de cal, yeso o cemento mezclado con agua.
Mezcla lenta	Agitación suave del agua, con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de flóculos.
Mezcla rápida	Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en una masa de agua.
Mezclador	Equipo para producir turbulencia en el agua.
Muestra	La parte representativa a analizar.

PAC	Policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$.
Polímero	Compuesto químico formado por unidades primarias más pequeñas llamadas monómeros, que se repiten en su estructura.
Potencial de hidrógeno	El pH es la expresión de la intensidad de la condición básica o ácida de un líquido. Es medido en una escala de 0 a 14.
Potencial Z	Medida de la magnitud de la repulsión o atracción electrostática entre partículas. Su medición aporta información de las causas de dispersión, agregación o floculación.
Sedimentación	Proceso en que los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes.

RESUMEN

La finalidad de este estudio, fue proponer una alternativa para el tratamiento de un efluente contaminado con tinta flexográfica a base de agua, proveniente de la limpieza del equipo de impresión de arte en sacos de papel, y así disminuir el uso de reactivos químicos utilizados en la actualidad.

Mediante pruebas de jarras se analizaron tres dosificaciones de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ combinadas con una alícuota constante de lechada de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, a tres diferentes concentraciones, a dos tiempos de floculación, manteniendo una velocidad de agitación constante de 50 RPM.

Para determinar cuál de estas combinaciones provoca una coagulación y floculación más efectiva, logrando una mayor clarificación del efluente, y que cumpla con el rango del parámetro de potencial de hidrógeno debe tener un valor entre 6 y 9, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de las aguas residuales y de la disposición de lodos, realizándose tres repeticiones por cada combinación. Teniendo un total de 18 tratamientos y 54 observaciones.

Los parámetros que determinaran cuál de las combinaciones es la más efectiva, serán, el potencial de hidrógeno, absorbancia, coeficiente de absorción (m^{-1}), y porcentaje de sedimentos formados (porcentaje).

OBJETIVOS

General

Evaluar el proceso de clarificación de un efluente contaminado con tinta flexográfica a base de agua, mediante la adición de una combinación óptima de policloruro de aluminio $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ y hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.

Específicos

1. Determinar mediante prueba de jarras el tiempo de floculación y dosis óptima de una combinación de policloruro de aluminio $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ y hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en base al parámetro fisicoquímico de pH.
2. Calificar la capacidad de remoción de color para cada combinación, en función del valor de la absorbancia.
3. Considerar la influencia en la coagulación y floculación, de cada combinación de reactivos mediante la sedimentación alcanzada.
4. Comprobar los resultados obtenidos mediante un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo, con un nivel de confianza del 95 %.

HIPOTÉISIS

Hipótesis de investigación:

Hi = Es posible evaluar distintas dosificaciones de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ combinadas con lechadas de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ a varias concentraciones, para la correcta coagulación de tinta flexográfica del efluente contaminado proveniente de la impresión de arte en papel, realizando tratamientos a diferentes dosificaciones de coagulante y ayuda de floculación, variando tiempos de agitación, evaluando el porcentaje de sedimento formado, absorbancia y pH. Se espera que la absorbancia sea ≤ 0.15 , esta es la obtenida aproximadamente, con el tratamiento actual y el rango de pH este entre $6 \leq pH \leq 9$ según lo indicado en el acuerdo 236-2006 “reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de disposición de lodos”.

Hipótesis nula:

Ho= No existen variaciones significativas en la respuesta calculada en los tratamientos de diferentes dosificaciones de hidróxido de calcio (2, 3 y 4 %), dosificaciones de policloruro de aluminio (6, 9 y 12 ml), y tiempo de agitación (15 y 30 min).

$$Ho: \mu\alpha_1 = \mu\alpha_2 = \mu\alpha_3 = 0$$

$$Ho: \mu\beta_1 = \mu\beta_2 = \mu\beta_3 = 0$$

$$Ho: \mu\gamma_1 = \mu\gamma_2 = 0$$

Hipótesis alternativa:

Ha= Existen variaciones significativas en la respuesta calculada en los tratamientos de diferentes dosificaciones de hidróxido de calcio (2,3 y 4 %), dosificaciones de policloruro de aluminio (6, 9 y 12 mL), y tiempo de agitación (15 y 30 min).

Ha: al menos una $\mu\alpha_i \neq 0$

Ha: al menos una $\mu\beta_i \neq 0$

Ha: al menos una $\mu\gamma_i \neq 0$

INTRODUCCIÓN

Las industrias en general consumen grandes cantidades de agua, constituyendo el principal factor del incremento continuo de la contaminación de la misma. Un ejemplo es el empleo de sustancias en los procesos de impresión o coloración, denominadas tintas, que son una combinación o mezcla de diferentes compuestos que dependiendo de sus características dan lugar a diferentes técnicas de proceso de coloración (Cifuentes, Durand y Sepúlveda, 1999). Más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes son utilizados en diferentes industrias como la papelera, textil, cosmética, farmacéutica, entre otras. La industria textil es la principal fuente emisora de agua con colorante, generando anualmente aproximadamente 120 m³/Ton de fibra, alrededor del mundo (njaneyulu, Sreedhara, & Suman, 2005).

En Guatemala, entre 2007 y 2010, se destinaron más de 20 mil millones de metros cúbicos al año para usos consuntivos y no consuntivos. La utilización anual del agua en ese periodo representa entre el 20 % y el 22 % de la oferta hídrica disponible anualmente en el país, la cual se estima por arriba de los 90,000 millones de metros cúbicos. En 2010, se emplearon 20, 373.88 millones de m³ en el sector industrial, lo que representó el 37.5 % del agua utilizada (IARNA, 2012).

De aquí surge la importancia de realizar tratamientos a los efluentes industriales, aplicando distintos procesos o técnicas con el objetivo de llevar al agua a condiciones óptimas de descarga, y así gran parte de los agentes contaminantes no terminen en el medio (Zaldumbide, 2008).

Los procesos de tratamiento para aguas residuales industriales, involucran principalmente los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La aplicación del proceso de coagulación y sus respectivos controles son esenciales en la clarificación del agua, todo el proceso posterior depende de la efectividad de este; inicia al adicionar los coagulantes y ayudas de floculación y finaliza con la aglomeración de las partículas, al formar pequeñas masas con peso específico mayor que el del agua, logrando así un excelente tratamiento.

La coagulación-floculación es el método más eficaz para la remoción de partículas coloidales que dan lugar a la turbiedad, color, bacterias, virus, y es una etapa imprescindible en la transformación de todo efluente que se desea tratar (Rodríguez Salcedo, 2008). Esto debido a que la mayoría de sólidos suspendidos en agua poseen cargas negativas, y se repelen unos con otros, evitando que las partículas se aglomeren y haciendo que permanezcan en suspensión, la coagulación desestabiliza las cargas de las partículas, neutralizándolas y permitiendo que sean capaces de pegarse unas con otras, formando microfloculos, seguido a esto se realiza la floculación, una mezcla suave que hace que se aumente el tamaño de los microfloculos, a fin de que los procesos de filtración puedan eliminarlos con mayor facilidad, logrando una buena clarificación del agua (Mazille & Spuhler, 2018).

La práctica más usual para el control del proceso de coagulación es mediante el ensayo de laboratorio llamada “prueba de jarras”, que consiste en una simulación a pequeña escala de todo el proceso de clarificación del agua, formado generalmente por un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas de agitación, que permiten comparar varias combinaciones químicas, que están todas sujetas a condiciones hidráulicas similares, arrojando como resultado parámetros óptimos de diseño, ayudando a seleccionar el tipo de coagulante más efectivo, determinar un pH óptimo de coagulación, la dosis óptima de

coagulante y de ayudas de coagulación, el orden más efectivo de adición de los productos químicos, niveles óptimos de mezcla, gradientes de velocidad, tiempos de mezcla y evaluar la necesidad de proveer floculación y sedimentación previa a la filtración.

En la actualidad el efluente contaminado con tinta flexográfica de esta planta industrial es tratado con dos reactivos químicos, un líquido catiónico compuesto de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, y un líquido aniónico compuesto por ácido 2 – propeinoico, sal de sodio y 2 –propenamida, el estudio planteado pretende evaluar la posibilidad de implementar productos de origen natural que mejoren el proceso de floculación y se reduzca el consumo de químicos en el tratamiento.

Por lo tanto, se ha propuesto eliminar el uso del líquido aniónico actual y reemplazarlo por una lechada de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, este es conocido como un buen coadyuvante al utilizarse en conjunto con un coagulante principal, aumentando la densidad de los floculos de sedimentación lenta convirtiéndolos en más rápidos de sedimentar, y mejora la tenacidad de los floculos para que estos no se rompan durante el mezclado y estabiliza el valor de pH.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Según Carlos Rodríguez en su tesis, *Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable*, a inicios de la década de los sesenta en varios países de Latinoamérica, se adoptó la tecnología de tratamiento de agua para países en vías de desarrollo, en donde se busca la utilización de coagulantes de origen natural que pueda disminuir el consumo de reactivos químicos (Rodríguez Salcedo, 2008).

Zaldumbide y Barrea (2009), en su artículo científico *Remoción de color en aguas contaminadas con tintas, pretratadas electroquímicamente mediante ozono en medio alcalino*, experimentaron con aguas residuales que contenían tintas flexográficas disueltas, empleadas en la industria de colorantes, en donde propusieron tratar estas aguas electroquímicamente, pero realizando un pretratamiento empleando un coagulante, el policloruro de aluminio, para posteriormente aplicar el proceso electroquímico y finalmente utilizar un tratamiento de ozono como etapa de pulimiento. Obteniendo un resultado satisfactorio de remoción de color y turbiedad y disminución de DQO.

En 2014, en la tesis *Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización*, se analizó el comportamiento y efectividad de ciertos coagulantes químicos, se evaluó la tendencia de las muestras de efluente contaminado al añadirles a parte del coagulante principal, una lechada de cal al 2 % con alícuotas de 3 y 4 mL, para

modificar el pH, observándose que durante el proceso de floculación, se formó *floc* más rápido y consistente, que las muestras sin esta cal (Galvis, 2014).

Castellanos y Tusarma (2014), en su tesis *Evaluación fisicoquímica por el método de adsorción – coagulación-floculación para remoción de colorantes del efluente del área de procesos industriales de la empresa textil CO&TEX S.A.*, desarrollaron una alternativa eficiente para la disminución de color de diferentes mezclas de colorantes en la industria textil, utilizando carbón activado y bentonita como adsorbentes, sulfato de aluminio líquido y policloruro de aluminio como coagulantes, y almidón de yuca como ayudante de floculación. Al utilizar este sistema se logró una máxima remoción de colorantes de 82 a 89 %, siendo una alternativa óptima para tratamientos de aguas residuales.

En 2016, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Colombia, realizó un estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación, para ello se tomó agua de residuo de tintas producto de la limpieza de las máquinas de impresión, proporcionada por una empresa de periódicos, utilizándose NaCl en forma de sal de mesa comercial, como electrolito y electrodos de aluminio, sin obtenerse resultados de remoción esperados, se evidencio la posibilidad de que este proceso de descontaminación podría ser reversible con el tipo de ánodos acondicionados (García y García, 2016).

Tejada (2017) en su tesis titulada *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa minera Santiago-B*, propuso la utilización de cal como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales de relaves mineros, dado que el problema principal de estos era la alta turbidez y demora de la sedimentación, el diseño experimental se realizó empleando el método de prueba de jarras, ejecutándose

pruebas de tratamiento de agua a distintas fechas, obteniéndose una dosis optima de cal al 5 % de 0.3 g de cal por litro de agua residual, con una remoción de turbiedad del 99.976 % y remoción de solidos totales de 99.973 %.

En 2017, en el artículo científico *Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la empresa del níquel comandante Ernesto Che Guevara*, se estudió la posible recuperación de níquel de un efluente, mediante un proceso de coagulación – floculación, realizándose corridas utilizándose hidróxido de calcio a diferentes dosis como coadyuvante de la coagulación, siendo los coagulantes principales, a base de aluminio, mediante prueba de jarras, se obtuvo que el mejor efecto coagulante se logró con una dosis de 150 mg/L de cal y 300 mg/L de sulfato de aluminio (Rivas, Menés y Rodriguez, 2017).

1.2. Justificación

La presencia de colorantes en cuerpos de agua reduce el paso de la luz solar, generando desequilibrio en los ecosistemas y desagradables efectos visuales, es por ello que un tratamiento adecuado de las aguas industriales es de vital importancia, siendo los tratamientos fisicoquímicos una alternativa eficiente y económica (Osorio, Vidal y Quintero, 2010).

El objetivo de esta investigación, es establecer e implementar una alternativa para el tratamiento del efluente contaminado con tinta flexográfica a base de agua, también conocida como GCMI o pantone, proveniente del proceso de la limpieza de equipo de impresión de arte en papel, incorporando el uso de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, como ayuda de floculación, combinado con una dosis de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, como coagulante principal para lograr un proceso total de coagulación - floculación efectiva de las tintas flexográficas que dan color al efluente, y que además permita seguir cumpliendo

con el rango de pH establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de disposición de lodos, con el fin de disminuir el uso de reactivos químicos en el proceso.

Cabe resaltar que está tinta ya viene preparada por el fabricante y no es necesario añadir ningún diluyente, únicamente se coloca un adhesivo epóxico en las planchas de impresión, sin embargo, este producto queda adherido al papel y el resto se procede a reciclar.

La implementación de una lechada de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, en el proceso, es vital además de propiciar la formación de floculos favoreciendo la sedimentación, ayudará al control del pH final del efluente, este será un valor crítico en la operación, al tenerlo controlado, se logrará un mayor rendimiento de los productos, reducción del consumo de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ y de costos de operación.

1.3. Determinación del problema

El proceso actual para el tratamiento del efluente contaminado con tintas, consiste en acumular el efluente en un tanque plástico durante un día y añadir dos coagulantes químicos, inicialmente un líquido catiónico que es policloruro de aluminio, agitar durante 15 minutos a una velocidad constante de 58 RPM, dejar reposar por 15 minutos más y posteriormente añadir un segundo químico, un líquido anionico que es una mezcla de ácido 2-propeinoico, sal de sodio y polímero 2-propenamida y nuevamente agitar a la misma velocidad y tiempo inicial, el agua tratada se deja fluir hacia una recipiente en donde se deja sedimentar por 24 horas, finalmente se extraen los lodos formados hacia piletas de secado para su posterior desecho y el líquido clarificado pasa a la planta de tratamiento wetland. Este proceso ha sido utilizado durante cinco años.

1.3.1. Definición

Actualmente el proceso de tratamiento del efluente contaminado con tinta flexográfica a base de agua, se realiza eficazmente, mediante la aplicación de un coagulante y un floculante químico, es un proceso previo a un tratamiento en planta Wetland, y se requiere plantear una alternativa que elimine o reduzca el uso de reactivos químicos, manteniendo un resultado de clarificación igual o mejor al actual, así como implementar el uso de un producto elaborado por una extensión de la misma corporación, como lo es el hidróxido de calcio.

Para encontrar una alternativa de tratamiento, se evaluarán distintas dosificaciones de lechada de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, en combinación con policloruro de aluminio $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$, analizándose por medio de un *test* de jarras, colocando cada muestra en *beackers* de dos litros de capacidad, variando su tiempo de agitación y manteniendo una velocidad constante. Se dejará sedimentar durante 45 minutos para proceder a una lectura de pH, absorbancia y porcentaje de sedimentos formados y comparar si estos valores son iguales o mejores que los obtenidos con el proceso actual.

1.3.2. Delimitación

En el Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de disposición de lodos, se establecen los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como la disposición de lodos, para que pueda establecerse un proceso continuo que permita proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana, y promueva el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada. En este estudio únicamente se tendrá en cuenta

el rango de potencial de hidrógeno permitido en el acuerdo, el resto de variables propuestas por este reglamento no serán evaluadas.

El rango de pH limitante para la aplicación de la combinación de coagulante y ayuda de floculación será el establecido en el artículo 20 – Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, siendo este $6 \leq \text{pH} \leq 9$. El proceso actual da como resultado, un rango de $7.3 \leq \text{pH} \leq 7.70$, y una absorbancia $A \leq 0.15$, valores que serán utilizados para comparación.

Tabla I. **Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores**

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Numero mas probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

Se evaluará una calidad de hidróxido de calcio (A), para la preparación de lechada con concentraciones al 2, 3 y 4 %, la limitante del coagulante principal, es decir la dosis máxima a utilizarse será la dosis aplicada en el proceso actual en la planta de tratamiento, siendo este 12 mL, partiendo de esto, se establecieron tres dosificaciones de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, de 6, 9 y 12 mL.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tintas flexográficas

Existe una gran variedad de tintas, diferentes formulaciones, para diferentes acabados y para satisfacer todo tipo de exigencias del mercado. Sin embargo, el elemento que todo tipo de tinta debe contener es el transportador de los pigmentos y demás componentes, es por ello que existen tres tipos de tinta que se utilizan de acuerdo al tipo de prensa o sustratos a imprimir: tintas a base de agua, tintas a base solvente y tintas U.V de base monomérica.

2.1.1. Tinta a base de agua

Este tipo de tintas son las más utilizadas por sus propiedades ecológicas, su base principal es el agua la cual se evapora en el proceso, es por eso que son de lento secado; es necesario monitorear constantemente sus niveles de pH pues un descontrol del mismo ocasiona una mala calidad de impresión.

Estas tintas tienen una mayor sensibilidad a la luz solar pues al exponerse a la misma se provoca una decoloración de la impresión, también son débiles ante la humedad y los líquidos y necesitan estar protegidas por un laminado o barniz que cubra la impresión (Gómez, 2017).

Un efluente contaminado con este tipo de tintas, es el objeto de evaluación de este estudio.

2.1.2. Tintas a base solvente

La base transportadora de estas tintas incluye solventes petroquímicos, entre más agresivo sea el solvente se podrá adherir a más materiales de impresión, pues las superficies de los materiales son afectadas de alguna manera por los solventes provocando una mejor penetración.

Entre las principales ventajas de estas tintas es que tienen alta resistencia a la humedad o al agua pues sus resinas o aditivos no son solubles en ellos, además, resisten a la luz solar y para su alta calidad de brillo no necesitan de barnices o laminados.

2.1.3. Tintas U.V de base monomérica

Estas tintas son secadas por radiación U.V con lámparas especiales en las unidades de impresión de la máquina, su base no se evapora, sino que se polimeriza sobre el material dejando una capa impresa con brillo y resistencia al frote. Son de secado inmediato se cristalizan al contacto con la luz ultravioleta y no penetran el material, sino que forman una capa sólida y rígida dando textura a la impresión, aunque dependiendo de los espesores impresos sobre materiales flexibles, estos al ser doblados se pueden curtir y desprender partículas de tinta (Gómez, 2017).

2.2. Características del agua cruda

El agua no existe en la naturaleza en su forma molecular pura, porque, según el tamaño de disgregación del material que arrastre, contiene partículas en suspensión o solución verdadera. De acuerdo con el tipo de impurezas que contenga, el agua puede aparecer como turbia, coloreada o ambas.

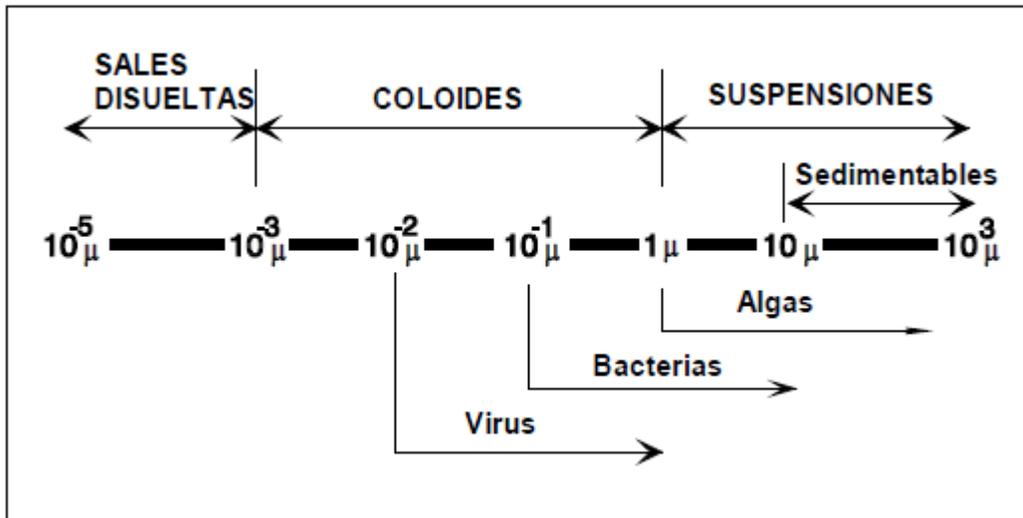
2.3. Sustancias dispersas en el agua

Una sustancia puede estar dentro de otra de varios modos diferentes:

- La molécula de una sustancia A puede estar dispersa dentro de una sustancia B. En este caso se dice que la sustancia A está disuelta dentro de la B.
- Partículas o gotitas muy pequeñas de la sustancia A pueden estar dispersas dentro de la sustancia B. Se dice entonces, que la sustancia A está en estado coloidal dentro de la sustancia B.
- Partículas relativamente grandes de la sustancia A están flotando dentro de la sustancia B. Se dice que la sustancia A está en suspensión en la sustancia B (Arboleda, 2000).

Los sólidos totales están compuestos por materiales flotantes, materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Los sólidos pueden ser moléculas orgánicas, inorgánicas e iones. Se clasifican en sólidos suspendidos y filtrables. La fracción filtrable está compuesta de sólidos coloidales y disueltos (Súarez, Burgos y Ures, 2014).

Figura 1. **Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua**



Fuente: Suárez, Burgos y Ures (2015). *Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.*

Según el tamaño de las partículas del sólido o líquido dispersado dentro de otro, existen un cambio en la clasificación del fenómeno y sus características. Cuando hay verdadera solución, el soluto tiene dimensiones aproximadamente iguales o inferiores a 1μ ; cuando hay un estado coloidal, el coloide tiene dimensiones que varían entre 1μ y 1000μ . Y cuando hay suspensión gruesa las partículas o gotas suspendidas tienen tamaños iguales o mayores de 1000μ (Arboleda, 2000).

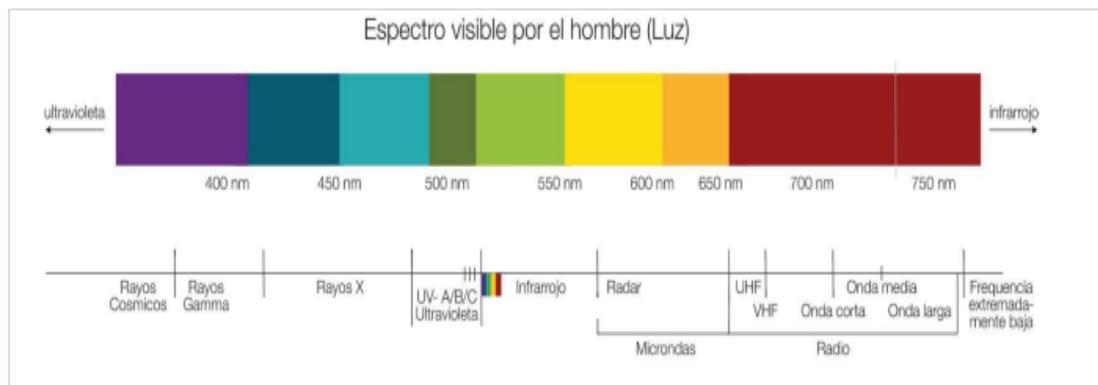
2.4. Color

El color no es más que la percepción en el ojo de una radiación electromagnética con una determinada longitud de onda y cómo la interpreta el cerebro, traduciéndola a un color u otro. El término luz blanca se refiere a una

mezcla de diferentes longitudes de onda que forman la sección visible del espectro electromagnético.

Cuando un objeto es golpeado por la luz, es posible que sucedan tres cosas. La luz puede ser absorbida por el objeto, puede ser transmitida, es decir, que pasa a través del objeto. O puede reflejarse desde la superficie o el interior del objeto. La dispersión es una mezcla de reflectancia y absorbancia (Toledo, 2017). El espectro entre 380 y 780 nm se considera visible por el ojo humano.

Figura 2. **Espectro electromagnético y luz visible**



Fuente: Univisión noticias. *Espectro visible por el hombre*. Consultado el 12 de febrero de 2020.
Recuperado de <https://www.univision.com/explora/el-espectro-visible-de-luz>.

Para la impresión de arte en la industria de estudio, son utilizados colores pantone para flexografía, manejando un total de 52 colores, que van en distintos tonos entre amarillo, celeste, rojo, azul, verde y negro.

Tabla II. **Colores reflejados y visibles por el ojo humano**

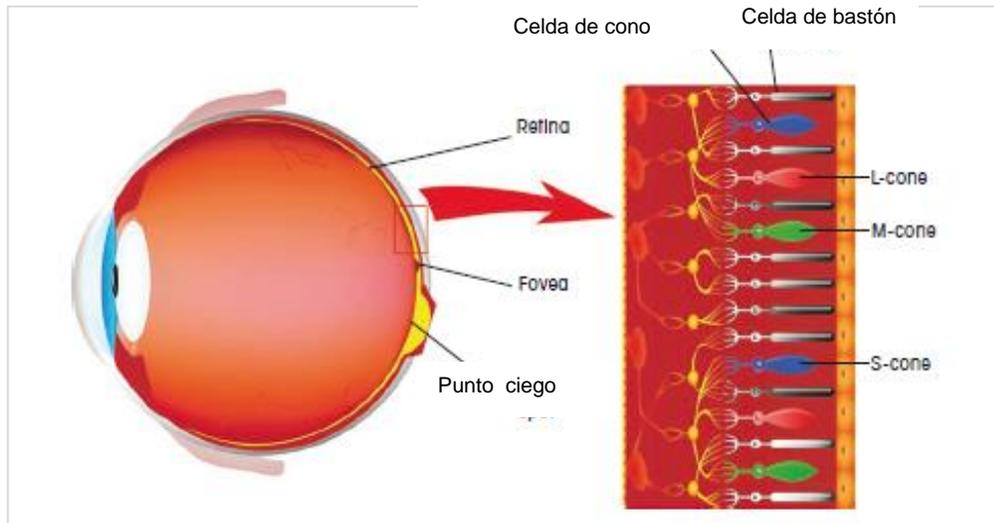
λ (nm)	Color absorbido	Color reflejado
380 – 420	Violeta	Amarillo – Verde
420 – 440	Azul - Violeta	Amarillo
440 – 470	Azul	Anaranjado
470 – 500	Verde – Azul	Rojo
500 – 520	Verde	Púrpura
520 – 550	Amarillo - Verde	Violeta
550 – 580	Amarillo	Azul – Violeta
580 – 620	Anaranjado	Azul
620 – 680	Rojo	Verde – Azul
680 - 780	Púrpura	Verde

Fuente: González y Hernández (2002). *Introducción al análisis instrumental*.

La luz proviene de una fuente conocida como iluminante, el color de la luz que emite el iluminante afecta la apariencia del objeto. Los iluminantes más utilizados son la luz solar y luz de lámparas. Algunos componentes de la luz serán reflejados, otros transmitidos y otros absorbidos. Los componentes que se transmiten ingresan al ojo humano e interactúan con los fotorreceptores de la retina.

Existen dos tipos de receptores en el ojo humano, los bastones responsables de la visión con poca luz y los conos, responsables de la visión diurna de colores brillantes. Existen tres clases de conos para sensibilidades espectrales diferentes. Los conos L (rojo), sensibles a longitudes de onda largas, que alcanzan su punto máximo aproximadamente en 560nm, conos M (verde), teniendo su pico alrededor de los 530 nm y conos de longitud de onda corta S (azul), teniendo su máximo a los 420 nm. El cerebro procesa señales las señales neuronales de los receptores interpretando la información como un color (Toledo, 2017).

Figura 3. **Esquema de recepción de color del ojo humano**



Fuente: Toledo (2017). *Basics of color measurements*.

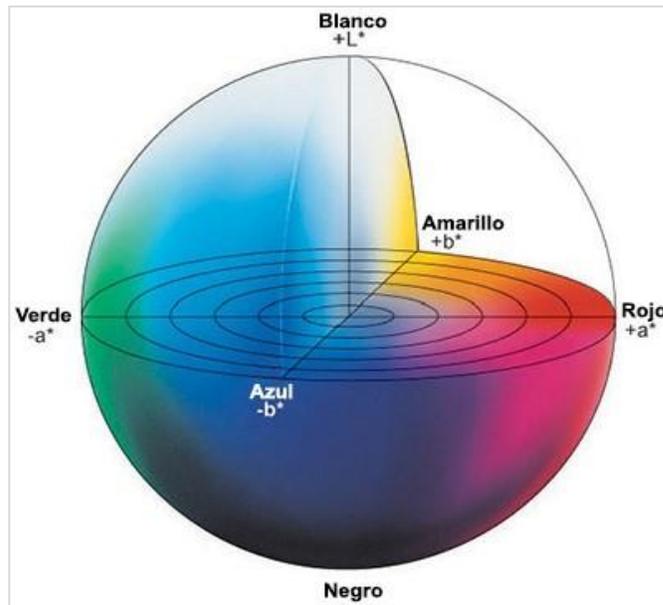
2.4.1. **Medición del color**

La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), es considerada como la autoridad en la ciencia de luz y el color, definiendo espacios de color, tales como, CIE XYZ, CIE L*C*h y CIE L*a*b, para expresar el color objetivamente.

El espacio de color L*a*b, conocido como CIELAB, es el más utilizado para evaluar el color de un objeto, correlaciona consistentemente los valores numéricos de color con la percepción visual.

Este espacio fue modelado basándose en una teoría de color oponente que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo (Konika Minolta).

Figura 4. Diagrama de espacio de color CIELAB



Fuente: Konica Minolta. *Entendiendo el espacio de color CIE L*a*b*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>.

Las coordenadas cromáticas son:

L^* = luminosidad

a^* = coordenadas rojo/ verde (+a rojo, -a verde)

b^* = coordenadas amarillo/azul (+b amarillo, -b azul)

Los instrumentos de medición de color, incluyendo colorímetros y espectrofotómetros, ayudan a cuantificar estos atributos, determinando el color de un objeto dentro del espacio de color, mostrando valores para cada coordenada L^* , a^* y b^* .

La medición del color por medio de un espectrofotómetro funciona casi siguiendo los mismos principios que el ojo humano: la luz proviene de una lámpara, atraviesa una muestra y luego se detecta la porción de luz transmitida. La sutil diferencia es que, en un espectrofotómetro, la transmitancia es medida dividiendo el espectro de intensidad de la luz transmitida a través de una muestra (I) por la intensidad inicial de la luz (I_0) (Mettler Toledo, 2017).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En ocasiones se encontrará el valor de transmitancia expresado en porcentaje:

$$T\% = \frac{I}{I_0} * 100 \% \quad (\text{Ecuación 2})$$

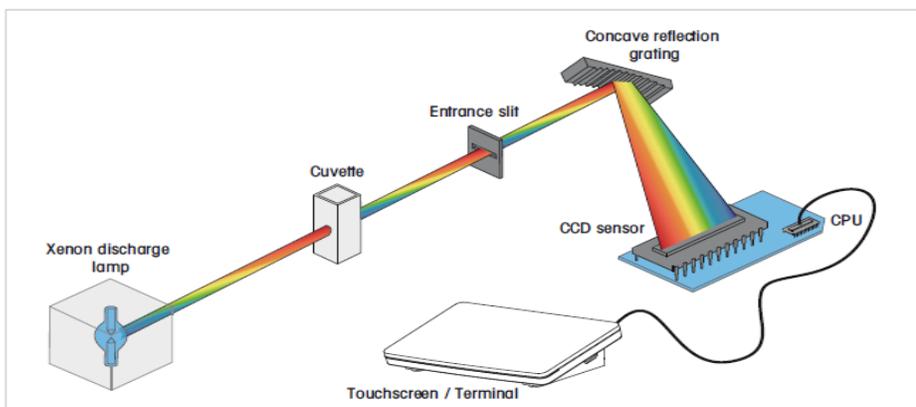
Cuando se transmite un rayo de luz a través de una solución coloreada, el rayo pierde intensidad, es decir, una parte de la luz es absorbida por la solución. Si la luz no es absorbida por una solución, la solución tiene una transmitancia del 100 %, si la luz se absorbe completamente en la solución, se tiene 0 % de transmitancia. La medida general para la absorción de la luz es la absorbancia (A), es ésta la que tiene relación directa con la concentración de sustancia absorbente.

$$A = \log \left(\frac{1}{T} \right) = -\log T \quad (\text{Ecuación 3})$$

En la mayoría de los casos los colores no son producidos por una sola longitud de onda monocromática, por lo que determinar el color mediante la absorbancia no es sencillo, porque el color puede resultar de una interferencia a

diversas longitudes de onda, originando un color observado resultado de una interferencia constructiva o destructiva de ciertas longitudes de onda (Martínez y Osorio, 2018).

Figura 5. **Muestra de medición en un espectrofotómetro basado en matrices**



Fuente: Toledo (2017). *Basics of color measurements*.

2.4.2. Naturaleza del color en el agua

En el agua se reconoce el color de una muestra una vez removida su turbidez, conocido como color verdadero y el color aparente que incluye el color de las sustancias en solución y coloidales y el color debido a material suspendido. La intensidad del color depende del pH, es decir, ambas propiedades son directamente proporcionales.

Las causas más comunes de color en agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, estos tipos de aguas están asociadas a longitudes alrededor de 380 y 490 nm, también por el contacto con desechos orgánicos, como hojas, maderas, raíces, entre otros, en distintos estados de

descomposición, así como, la presencia de taninos, ácido húmico y residuos industriales.

El conjunto de compuestos responsables del color, no importando su origen, se conoce como sustancias húmicas. La estructura molecular de estas sustancias no se conoce totalmente, pero se sabe que contienen carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), y nitrógeno (N), en varios porcentajes. Existen cuatro clasificaciones de estas sustancias: ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), ácido himatomelánico y carbón húmico (Romero, 2005).

Remover el color es una función del tratamiento de agua y es necesario para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. Determinar el color es necesario para evaluar las características del agua, fuente del color y eficiencia del proceso usado para removerlo, su remoción es un objetivo esencial al momento de realizar un tratamiento.

El color puede removerse por los siguientes mecanismos:

- Por adsorción química en los precipitados poliméricos de los productos de hidrólisis de los coagulantes, produciendo una interacción entre estos y los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas pesadas de las sustancias productoras de color. Esto ocurre a valores de pH altos.
- Al tener pH bajos, las sustancias húmicas interaccionan con los compuestos de aluminio positivamente cargados para formar un precipitado de fulvato de aluminio (Arboleda, 2000). Este es el mecanismo de remoción se cree tendrá el efluente en estudio, su valor máximo de pH es neutro.

2.5. Turbiedad

Es el efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; es decir, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea remitida y no transmitida a través de la suspensión.

La turbiedad puede ser causada por diversos materiales, los cuales van desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, arcillas, materia orgánica e inorgánica, organismos planctónicos y microorganismos.

Al pasar a través de una suspensión coloidal un rayo de luz es diseminado de forma proporcional al tamaño de las partículas. Esta diseminación muestra la turbiedad en una solución, siendo una forma de medir la concentración de partículas coloidales en un líquido.

$$\tau = -\frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0} \text{ (Ecuación 4)}$$

En donde I_0 representa la intensidad de un rayo luminoso a través de un blanco; I la intensidad del mismo rayo después de atravesar una distancia l del medio dispersante; y τ la turbiedad de la solución (Arboleda, 2000).

2.6. Comparación entre características de color y turbiedad

El color y la turbiedad tienen características diferentes y deben tenerse en cuenta al momento de querer removerlas del agua por medio de un proceso de coagulación.

Tabla III. **Diferencias entre color y turbiedad**

Ítem	Color	Turbiedad
Composición física	Sustancias disueltas parcialmente coloidales	Arcillas coloidales
Composición química	Ácidos orgánicos con pesos moleculares entre 200 y 50,000 o más	Cristales de silicatos
Origen	Orgánico	Mineral
Tamaño de la dispersión	87 % < 0.01 μ	Entre 0.1 y 10 μ
Intensidad	Aumenta el pH	No varía con el pH
Comportamiento químico	Se comportan como sustancias disueltas	Se comportan como suspensiones coloidales

Fuente: Arboleda (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*.

Ambas propiedades se perciben ópticamente en forma distinta, así como sus características físicas y químicas que difieren grandemente, como se observa en la tabla I.

Cuando el color y la turbiedad están presentes de forma simultánea, la superficie de los coloides se vuelve mayor, estimulando la adsorción de las moléculas de color, necesitando una menor dosis de coagulantes. Al presentarse cero turbiedad, las dosis de coagulantes son superiores. El proceso es afectado también según la energía con la que se floccule (Arboleda, 2000).

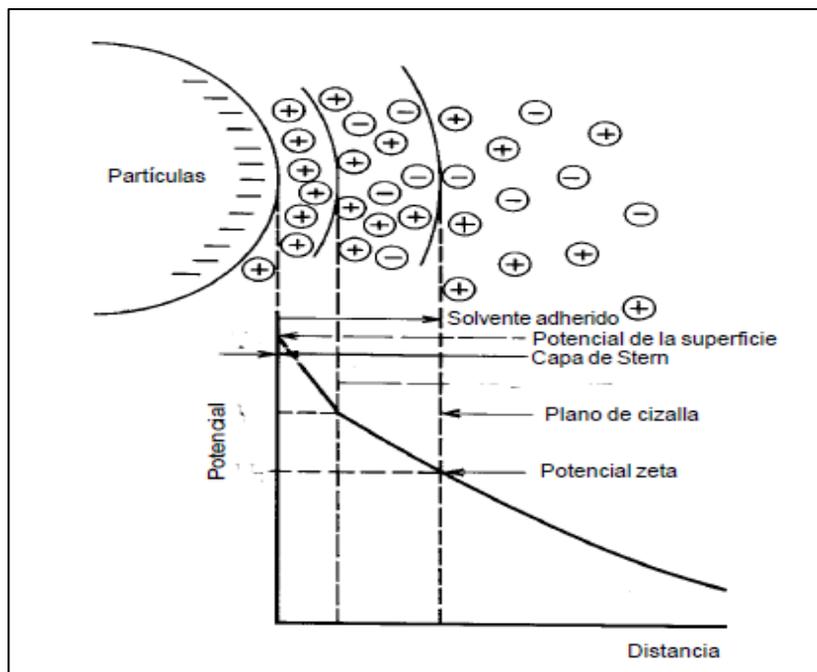
2.7. Teoría de la doble capa de las partículas

Las causantes de la turbiedad y el color dentro del agua son las partículas coloidales, es por ello que el tratamiento del agua está enfocado a la remoción de estas partículas. El sistema coloidal no presenta carga eléctrica líquida debido

a que la carga negativa de la superficie es balanceada con los iones positivos presentes en el agua. Como la superficie de la partícula es negativa, se genera una aglomeración de iones positivos en la interfaz sólido – líquido, conocida como capa de Stern, que junto con la carga negativa de la partícula forman la doble capa eléctrica, denominada también capa compacta.

A su vez, estos atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una pequeña cantidad de iones positivos, formándose así una capa difusa, por lo tanto, existe un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, que es conocido como potencial zeta (Barrenechea, 2004).

Figura 6. **Configuración esquemática de la doble capa eléctrica**



Fuente: Barrenechea (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I. Teoría tomo I.*

2.7.1. Potencial Zeta

Las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas, rodean a éstas de una doble capa eléctrica y esta interacciona con la fase acuosa. En 1924, después de plantearse varias teorías, Otto Stern considero la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide, en la que el potencial q se ve disminuido rápidamente en la capa adherida y con menor velocidad en la capa difusa. La capa adherida es conocida como capa de Stern. Dado que esta se transporta con la partícula, puede considerarse como parte de la carga del coloide.

En un coloide deben tenerse en cuenta, los siguientes potenciales:

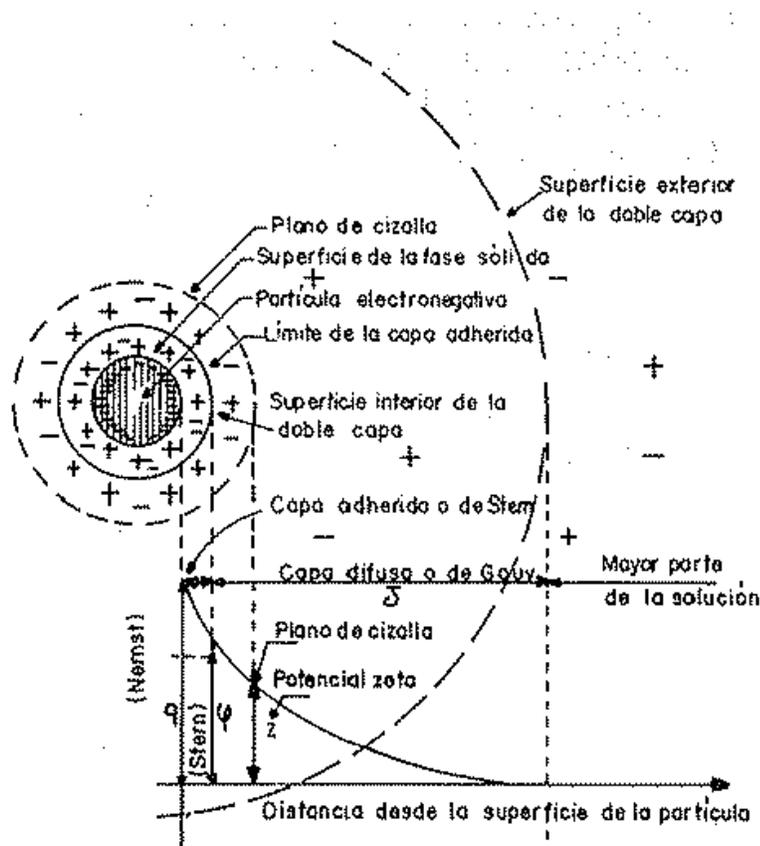
- El potencial q , es que existe en la superficie del coloide
- El potencial ϕ existente en la superficie interior de la doble capa, que es donde inicia la parte difusa.
- El potencial Z existe en el plano de cizalla.

El plano de cizalla es el que separa al coloide del resto de la dispersión, es decir, es la sección de la capa que se mueve con la partícula, está situada entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa. Como el coloide no puede separarse de los contraiones que lo rodean, el único potencial que puede determinarse con precisión, es el potencial en la superficie del plano de cizalla, es decir, el potencial Z (Arboleda, 2000).

En otras palabras, existe una distancia mínima entre la superficie del coloide y los contraiones, en donde el potencial eléctrico decrece linealmente, después

sufre una disminución exponencial que pasa entre la capa compacta y la difusa, este potencial eléctrico es el potencial Z (Barrenechea, 2004).

Figura 7. **Ubicación de Potencial Z**



Fuente: Arboleda (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*.

2.7.2. Factores de estabilidad e inestabilidad

Las partículas coloidales están sometidas a dos grandes fuerzas:

- Fuerzas de atracción de Van der Waals: que se producen por el continuo movimiento de las partículas, conocidas como factores de inestabilidad.

- Fuerzas de repulsión electrostáticas: estas impiden la aglomeración de partículas cuando se acercan unas a otras, conocidas también como, factores de estabilidad.

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza que resulta de la suma de la fuerza de atracción y la de repulsión (Cárdenas, 2000).

Para eliminar partículas coloidales del seno del agua, es necesario agregar partículas más grandes y que sedimenten con facilidad, normalmente se ve necesario añadir un producto capaz de neutralizar la carga de los coloides y de formar agregados de partículas (Súarez, Burgos y Ures, 2014).

2.8. Proceso de coagulación y floculación de las impurezas del agua

Se conoce como coagulación – floculación al proceso por el que las partículas se aglutinan en pequeñas masas conocidas como *floc*, que tienen un peso específico superior al del agua. Este proceso es utilizado para:

- Remover turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remover color verdadero y aparente.
- Eliminar bacterias, virus y organismos patógenos que pueden ser separados por coagulación.
- Destruir algas y plancton.

- Suprimir sustancias productoras de sabor y olor y precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

Existen dos aspectos importantes en el proceso de coagulación – floculación de las impurezas del agua:

- La desestabilización de las partículas suspendidas, es decir la eliminación de las fuerzas que las mantienen separadas. Este fenómeno es conocido como coagulación.
- El movimiento de las partículas desestabilizadas dentro del líquido para que tengan contacto, regularmente formando puentes entre sí, esto se conoce como floculación (Arboleda, 2000).

2.8.1. Coagulación

Inicia de forma instantánea al agregar los coagulantes al agua, consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas coloidales, la alcalinidad del agua y el agua misma. La coagulación busca disminuir el potencial Z, por alguno de los siguientes métodos:

- Coagulación por neutralización de carga: se lleva a cabo cuando coloides de diferente signo son mezclados en el agua. Esto es lo que pasa al añadir alumbre o sales de hierro al agua.
- Coagulación por disminución del espesor de la doble capa (distancia d): al existir más concentración de iones en el agua, la “distancia d” disminuye, hasta lograr que el valor del potencial Z sea inferior al crítico (Restrepo, 2009).

2.8.1.1. Factores que influyen en el proceso de coagulación

- Valencia: entre mayor sea la valencia del ion, resulta más efectivo como coagulante.
- Capacidad de cambio: medida de la tendencia a reemplazar cationes de baja valencia por otros con una mayor, lo que provoca la desestabilización y aglutinación de partículas rápidamente.
- Tamaño de partículas: para que sirvan como *floc* las partículas deben tener entre 1 μm y 5 μm de diámetro, si son más grandes no pueden ser incorporadas como *floc*.
- Tipo y cantidad de coagulante: la cantidad exacta se debe determinar mediante ensayos de pruebas de jarras, para evitar una sobredosificación que rompa la adsorción superficial. Poca cantidad de coagulante no logrará neutralizar la carga de la partícula en su totalidad, la formación de microflóculos será escaso y la turbiedad elevada. Una alta cantidad de coagulante producirá la inversión de la carga de la partícula, formando gran cantidad de microflóculos con velocidades de sedimentación muy bajas, provocando una turbiedad residual elevada.
- Temperatura: influye en la formación del *floc*, mientras más fría se encuentre el agua, la reacción es más lenta y tarda más en formarse el *floc*.

- pH del agua: cada coagulante tiene una zona de pH óptima, en la cual ocurre una buena floculación en un menor tiempo y una misma dosis de coagulante, permitiendo optimizar productos y rendimientos.
- Relación cantidad – tiempo: la cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación de *floc*.
- Alcalinidad: esta guarda relación con el pH y se debe considerar para una buena coagulación (Restrepo,2009).
- Influencia de la mezcla: la agitación debe ser uniforme e intensa para asegurar una buena mezcla entre el coagulante y el agua y que se produzca la reacción química de neutralización de cargas. Si se producen turbulencias desiguales, solo cierta porción de agua tendrá mayor concentración de coagulantes y la otra poco o nada. La mezcla se da en dos etapas, primero la agitación intensa debe producirse al inicio de la coagulación, con una duración máxima de 60 segundos, para dispersar el coagulante dentro del volumen del agua y la segunda etapa debe ser lenta para desarrollar los microfloculos.
- Sistema de aplicación de coagulante: la dosis de coagulante debe ser en forma constante y uniforme, para que sea completamente dispersado. El caudal debe ser constante y fácilmente regulable.
- Influencia de la turbiedad: cuando la turbiedad es alta, se adiciona poca cantidad de coagulante debido a que hay más probabilidad de colisión entre partículas, realizándose una coagulación con facilidad. Mientras que en una turbiedad baja es más difícil que se lleve a cabo la coagulación por

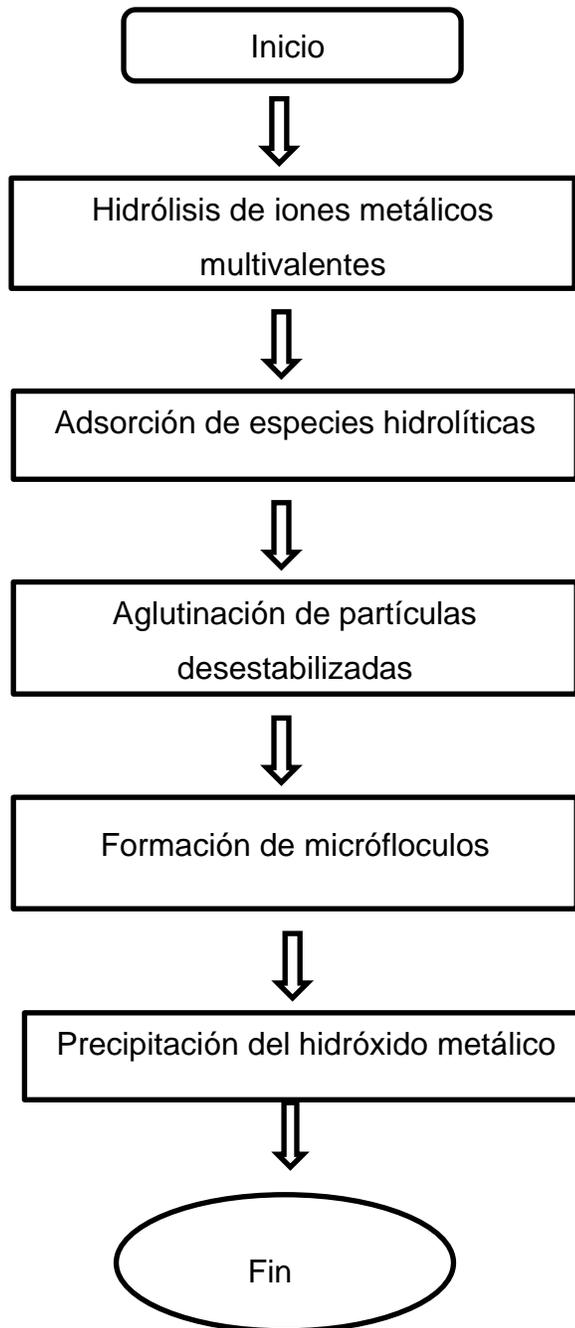
lo que la cantidad de coagulante usado es igual o mayor que si se tuviera alta turbiedad (Cárdenas, 2000).

2.8.1.2. Etapas de la coagulación

- Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes, por lo tanto, su polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr que el coloide se desestabilice.
- Amontonamiento de las partículas desestabilizadas a través de un puente entre ellas que involucra su transporte y las interacciones químicas.
- Aglutinación de las partículas desestabilizadas mediante su transporte y fuerzas de Van der Waals.
- Formación de microflóculos.
- Precipitación del hidróxido metálico.

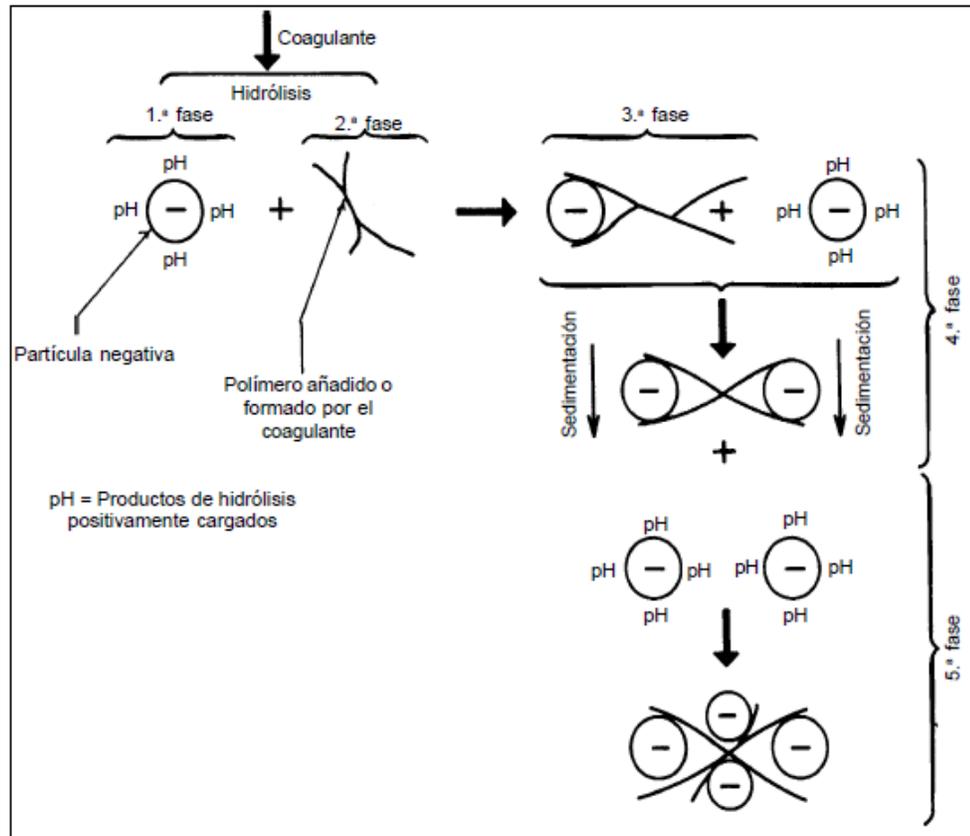
Las distintas etapas de la reacción son controlables bajo condiciones químicas. Algunas de las etapas ocurren de manera secuencial. Otras coinciden parcialmente y otras simultáneamente (Barrenechea, 2004).

Figura 8. Diagrama de flujo de proceso de coagulación



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Esquema del proceso de coagulación



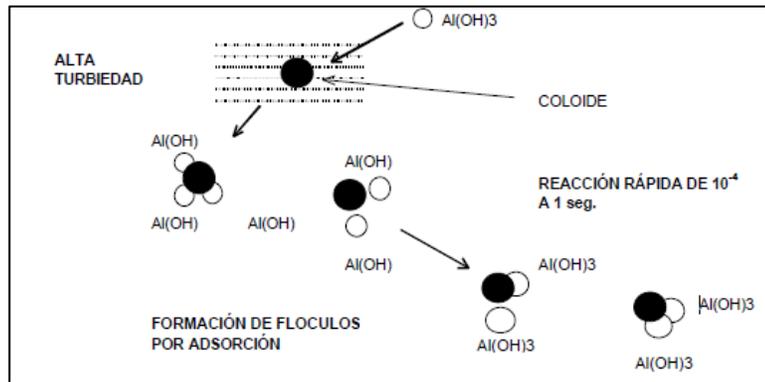
Fuente: Barrenechea (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I. Teoría tomo I.*

2.8.1.3. Tipos de coagulación

Los casos más comunes y básicos de coagulación son:

- **Coagulación por adsorción:** sucede cuando el agua contiene una alta concentración de partículas coloidales; cuando el coagulante se adiciona al agua turbia, los coloides adsorben los productos solubles de los coagulantes, formando floculos en forma casi instantánea.

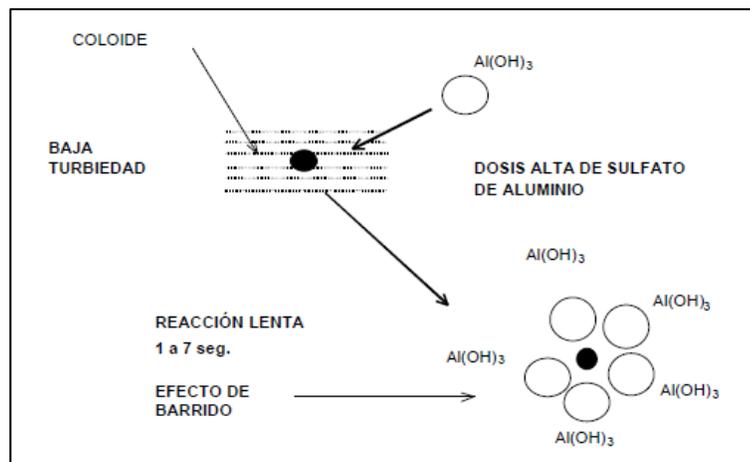
Figura 10. **Ejemplo proceso de coagulación por adsorción**



Fuente: Cárdenas (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*.

- Coagulación por barrido: se presenta cuando el agua presenta baja turbiedad, es decir, es más clara, y la cantidad de coloides es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas o cubiertas al producirse una sobresaturación de precipitado del coagulante añadido.

Figura 11. **Ejemplo proceso de coagulación por barrido**



Fuente: Cárdenas (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*.

2.8.1.4. Comportamiento de coagulación según el tipo de agua

El proceso de coagulación–floculación consiste en añadir al agua o agua residual determinados aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos.

Tabla IV. Coagulación según tipo de agua

Tipo de agua	Tipo de coagulación	Requerimientos
Baja concentración de coloides y alcalinidad.	Coagulación por barrido, formando precipitado.	Alta dosis de coagulantes y adición de alcalinidad o partículas o ambas.
Baja concentración de coloides y alta alcalinidad.	Coagulación por barrido, formando precipitado.	Alta dosis de coagulantes y adición de partículas.
Alta concentración de coloides con baja alcalinidad,	Adsorción de polímeros metálicos positivos en la superficie de los coloides. pH entre 4 a 7	La dosis de coagulantes incrementa con la concentración de partículas, se necesita adicionar alcalinidad.
Alta concentración de coloides y alcalinidad.	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos pH > 7	La dosis de coagulante incrementa con la concentración de partículas.

Fuente: Cárdenas (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*.

2.8.1.5. Coagulantes

Son las sustancias químicas o naturales que inducen la aglomeración de las partículas finas, ocasionando la formación de partículas más grandes y

pesadas. Pueden clasificarse en dos grupos: polielectrolitos o ayudas de coagulación y coagulantes metálicos. Ambos actúan como polímeros, la diferencia es que, con los primeros, las cadenas poliméricas ya están formadas al momento de que se los agrega al agua, efectuándose después la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa (Arboleda, 2000).

2.8.1.5.1. Tipos de coagulantes

Los coagulantes pueden ser orgánicos, inorgánicos o una combinación de ambos; en todo caso, constan de moléculas de carga positiva de modo que el tratamiento de coagulación tiene la capacidad de neutralizar la carga eléctrica negativa de las partículas para desestabilizar las fuerzas que mantienen separados a los coloides.

- Ayudas de coagulación (también llamados floculantes)
 - Polielectrolitos

Un polímero es una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas conocidas como monómeros unidas por enlaces covalentes que se repiten de manera sucesiva. El grado de polimerización que pueden alcanzar está dado por el número de monómeros que conforman la cadena. Cuando estas cadenas tienen múltiples grupos funcionales activos, se les denomina polielectrolitos (Arboleda, 2000).

Tabla V. **Clasificación de los polielectrolitos**

Según su origen	Según su carga	
Polímeros naturales	Iónicos	Catiónicos
		Aniónicos
Polímeros sintéticos	No iónicos	

Fuente: Arboleda (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*.

Se caracterizan por tener un gran tamaño molecular y cargas eléctricas a lo largo de a lo largo de una cadena molecular de átomos de carbono, demostrando que son efectivos para coagular coloides negativos gracias a los enlaces químicos que se forman entre el polímero y el coloide.

- Sílice activada

Lleva usándose desde hace más de medio siglo, en combinación con alumbre, en dosis optimas aumenta la tasa de coagulación, reduce la dosis necesaria de alumbre y amplía el intervalo de pH efectivo para la coagulación. Ayuda a fortalecer el *floc*, haciéndolo más denso, grande y con un asentamiento más rápido, mejorando la remoción de color (Arboleda, 2000).

- Agentes lastradores

Son materiales que al ser agregados al agua forman partículas adicionales promoviendo la formación del *floc* o a la modificación de pH. Son utilizados para tratar aguas de color alto con una baja turbiedad y bajo contenido mineral, que producen *floc* pequeño y poca sedimentabilidad. Los más comunes son las arcillas como la bentonita, caolinita, caliza, cal y sílice pulverizada (Romero, 2005).

- Cal hidratada o hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Es el producto resultante de la calcinación de la piedra caliza. La cal hidratada, es el polvo seco obtenido mediante el tratamiento de la cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química por el agua, en las condiciones de su hidratación. La cal hidratada también conocida como cal apagada, tiene desde un 75 a 95 % de material que pasa por un tamiz número 200. Es conocida por su uso en la suavización de agua y en el tratamiento de lodos. También puede ser utilizada en el tratamiento de aguas industriales y soluciones contaminadas inorgánicas peligrosas, generalmente es empleada para remover impurezas de manganeso, hierro, fluoruros y taninos que causan olores desagradables. La suavización con cal puede eliminar entre un 80 – 90 % del color. Al emplearse conjuntamente, provee control de pH, reducción de olores y desinfección (Calidra, 2002).

Al añadirse la cal hidratada como lechada, la suspensión dosificada debe enviarse a la entrada del tanque con el efluente a tratar, si lo que se necesita es un ajuste del pH óptimo de floculación o a la salida del tratamiento si lo que se necesita es un ajuste final de pH o a ambos puntos.

- Coagulantes metálicos

Pueden clasificarse en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios.

- Sales de aluminio

Formados por a base de aluminio, los coagulantes a base de esta sal son los que dominan el mercado, hay bastante disponibilidad a un costo razonable, son

fáciles de producir en incluso fábricas muy sencillas, por esta razón la mayoría de plantas de tratamiento están diseñadas para trabajar con coagulantes de este tipo.

- Sulfato de aluminio ($(\text{SO}_4)_3\text{Al}_2$)

Es el coagulante estándar más utilizado en tratamiento de agua, también conocido como alumbre. Se vende en varias presentaciones; en polvo, molida, terrones, granos parecidos al arroz y en forma líquida. La dosis de aplicación varía entre 5 y 50 mg/L para aguas naturales, el pH efectivo para coagulación usando alumbre va desde 5.5 a 8.0, normalmente se utiliza individualmente (Romero, 2005).

- Policloruro de aluminio ($\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Abreviado y conocido como PAC. Los floculos formados mediante la utilización de PAC tienden a ser grupos de pequeñas estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los floculos con alumbre son normalmente estructuras porosas con tamaño de 25 a 100 mm. Son producidos adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $\text{Al}(\text{OH})_n\text{Cl}_{3-n}$ donde n tiene valores entre 1 a 2.5. Los PAC son tipificados según su contenido de aluminio (en porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (en porcentaje de SO_4), y contenido de hidróxido (en porcentaje alcalinidad, iones de hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas).

El policloruro de aluminio [$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$], es una sal inorgánica de aluminio multinuclear que puede formar flóculos con mayor rapidez y forma, genera mayor velocidad de sedimentación y tiene un gran poder clarificante que logra remociones de alta turbiedad o alto color, respecto a otras sales de

aluminio. Su pH de funcionamiento se encuentra entre 5 y 9, que varía según el contenido de carbono orgánico disuelto en el agua. Se vende como un líquido viscoso de color ámbar claro, a veces opalescente y de sabor dulzaino astringente.

Dentro de las ventajas que posee el PAC son: normalmente no requiere un ajuste de pH, aunque en ocasiones puede utilizarse un modificador de pH, un rango de trabajo de pH más amplio, aluminio residual más bajo, mejor remoción de sustancias orgánicas, mejor remoción de turbiedad y color, producción de menos lodo, fácil manejo de producto sólido y líquido, menor consumo de producto, menor dosis de aluminio, velocidad de reacción muy alta. Sus desventajas son un precio más alto por kg que al utilizar alumbre, se compensa al utilizar una dosis menor (Rinne, s.f.).

Cabe resaltar que esté es el coagulante implementado junto a distintas dosificaciones de hidróxido de calcio, para el tratamiento del efluente en estudio.

- Sales de hierro

No son tan populares como los químicos a base de aluminio, por el color oscuro del hidróxido de hierro, esto hace que el proceso se vea sucio. El Hierro (III), es muy eficiente en rangos de pH bajos que van desde 3.5 hasta 7, los cuales son útiles para remover sustancias orgánicas y de color, así como remoción de bacterias y plankton; rangos de pH altos que van desde 8 hasta 9.5, para remover hierro y manganeso (Rinne, s.f.).

- Sulfato ferroso ($\text{SO}_4\text{Fe}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Se empaca como cristales o granos verdes fácilmente solubles en agua, su fórmula química comercial es $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Este reacciona con la alcalinidad del agua, formando bicarbonato ferroso $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. Debe producirse la oxidación del ion ferroso en ion férrico insoluble para que sea útil como coagulante. Esto puede lograrse mediante la adición de cal y oxígeno disuelto del agua, en la mayoría de casos se utiliza esta combinación para elevar el pH a un valor en donde los iones ferrosos se precipiten como hidróxido férrico (Rodríguez, 2008).

- Cloruro férrico (Cl_3Fe)

Se consigue de forma líquida o cristalina. Es barato, pero manejarlo es difícil dada su alta agresividad, debe utilizarse equipo resistente a la corrosión. Es utilizado en su mayoría para tratar aguas residuales. Este reacciona con la alcalinidad del agua o con la adición de cal para formar *floc* de hidróxido férrico. Las ventajas de este producto son: coagulante de bajo costo, alta velocidad de reacción, no hay problemas con el aluminio residual, eficiente sin ayuda de floculación. Sus desventajas son: se necesita un mejor diseño de proceso que el alumbre, en el proceso puede causarse color, dosis mayores que usando aluminio, muy corrosivo para manejar y almacenar (Rinne, s.f.).

- Sulfato férrico ($(\text{SO}_4)\text{Fe}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

Comercialmente se encuentra en forma cristalina, puede dosificarse en seco o líquido. Es funcional en un intervalo amplio de pH lo que hace que sea usado generalmente en tratamiento de agua con alto contenido de manganeso, logra su remoción con éxito a pH mayor de 9 (Romero, 2005).

2.8.1.6. pH óptimo para coagulación

Este valor es de los más importantes y con más efectos en el proceso de coagulación, afectando la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y aluminio, también el tiempo necesario para la formación de *floc* y la carga sobre las partículas coloidales. El pH óptimo para la remoción de los coloides cargados negativamente, depende de la naturaleza del agua, usualmente se encuentra en un rango de pH de 5.0 a 6.5 (Rodríguez, 2008).

Tabla VI. pH óptimo de coagulantes

Coagulante	pH
Alumbre	4 – 7
Sulfato ferroso	4.5 – 6.5
Cloruro férrico	5.5 – 6.7
Sulfato férrico	5 - 7

Fuente: Romero (2005). *Calidad del agua, Escuela colombiana de ingeniería.*

Tabla VII. Combinaciones recomendadas de coagulantes

Coagulantes	Dosificación típica
Alumbre + soda caustica	3/1
Alumbre + cal hidratada	3/1
Alumbre + carbonato de sodio	1/1 – 2/1
Alumbre + aluminato de sodio	4/3
Sulfato ferroso + cal hidratada	4/1
Sulfato ferroso + cloro	8/1
Aluminato de sodio + cloruro férrico	1/1
Alumbre + sílice activada	9/1 – 14/1

Fuente: Romero (2005). *Calidad del agua, Escuela colombiana de ingeniería.*

2.8.1.7. Criterios generales de dosificación

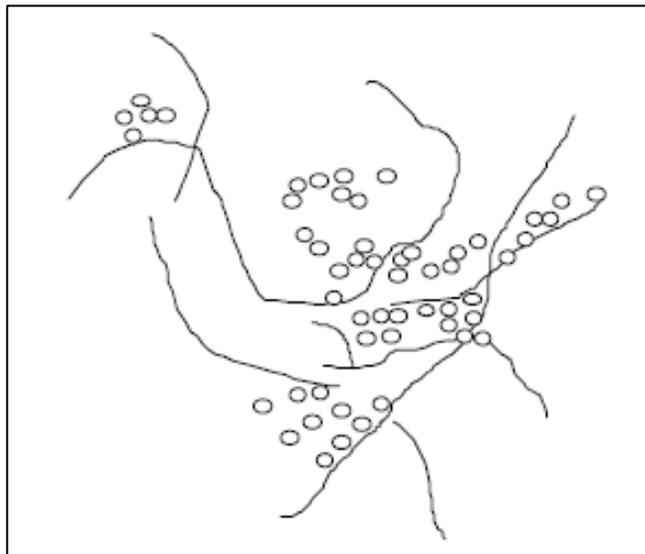
- Alumbre ($(\text{SO}_4)_3\text{Al}_2$): es recomendable una concentración de 60 g/L, con un tiempo mínimo de cinco minutos de retención en el tanque de disolución, utilizándose una tubería de pvc o polietileno. El alumbre líquido se dosifica en solución al 50 % sin diluirlo.
- Cloruro férrico líquido (Cl_3Fe): es recomendable no diluirlo y emplear tuberías de plástico o de acero recubierto de caucho. Si se utiliza cloruro férrico sólido, debe tenerse una concentración mayor del 2.5 %.
- Sulfato férrico ($(\text{SO}_4)_2\text{Fe}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$): solución al 25 % y nunca menor al 1 %, tiempo de retención de 20 minutos en tanque de disolución y pasar por tuberías de plástico.
- Sulfato ferroso ($\text{SO}_4\text{Fe} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): se recomienda utilizar la forma granular, en solución al 6 % con tiempo de retención de 5 minutos.
- Cal viva (CaO): se recomienda cal que pase el tamiz de $\frac{3}{4}$ " y se retenga mínimo el 95 % sobre tamiz No. 100, deben utilizarse accesorios de plástico o caucho.
- Cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$): se recomienda solución máxima al 6 %, y utilizarse solamente en plantas pequeñas con dosificaciones menores de 113 kg/h.
- Polímeros: si vienen en polvo, debe aplicarse soluciones al 0.1 % y debe ser consumido en un período menor de tres días (Química y tratamiento de aguas., 2012).

2.8.2. Floculación

Es el proceso siguiente a la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada, permitiendo el crecimiento y aglomeración de los floculos que se acaban de formar, con la finalidad de que su tamaño y peso sean aumentados y así sedimenten con mayor facilidad. Al utilizarse ayudas de coagulación (floculantes) estos hacen un puente de una superficie a otra, enlazando partículas individuales en aglomerados (Cárdenas, 2000).

Para que exista una floculación efectiva debe realizarse un mezclado lento que permite juntar de a poco los flóculos, si se realiza una mezcla rápida lo que ocurriría es que estos se romperían. Es por ello que, para este estudio, la velocidad de agitación posterior al mezclado rápido a 100 RPM, será de 40 RPM.

Figura 12. **Esquema de formación de flóculos**



Fuente: Cárdenas (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*.

2.8.2.1. Tipos de floculación

- Floculación pericinética

Producida por el movimiento natural de las partículas, realizándose contactos por bombardeo entre las mismas, conocido como el movimiento browniano, solo influye en partículas con tamaño menor a 1μ . Actúa al inicio del proceso, aproximadamente entre los 5 y 10 segundos.

- Floculación ortocinética

Es debida a las colisiones de las partículas por el movimiento del agua que es producido por una energía exterior, que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Las partículas se mueven a diferentes velocidades y direcciones, aumentando la probabilidad de colisión, logrando partículas de mayor tamaño, superiores a 1μ , esto sucede durante el resto del proceso, entre 20 a 30 minutos (Restrepo, 2009).

En las plantas de tratamiento, la floculación es tanto pericinética como ortocinética, por lo que, en este estudio, se verán aplicadas ambos tipos de floculación.

2.8.2.2. Parámetros importantes en la floculación

- Gradiente de velocidad
- Número de colisiones entre microfloculos
- Tiempo de retención, es decir, el tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación.
- Densidad y tamaño del *floc*

- Volumen de lodos
- Grado de agitación mecánica o hidráulica: es necesario mantener una agitación adecuada al dosificar el coagulante que ayuda en la coagulación, como en el proceso de formación y crecimiento del flóculo. La dispersión del coagulante en la superficie del agua necesita una agitación rápida para que se produzca una dispersión homogénea en todos los puntos, desestabilizando las partículas y provocando un mayor número de colisiones entre ellas, asegurando el inicio de una floculación total; iniciada la floculación, se debe reducir la velocidad de agitación para evitar roturas de los flóculos (Vásconez, 2013).

2.9. Test de jarras

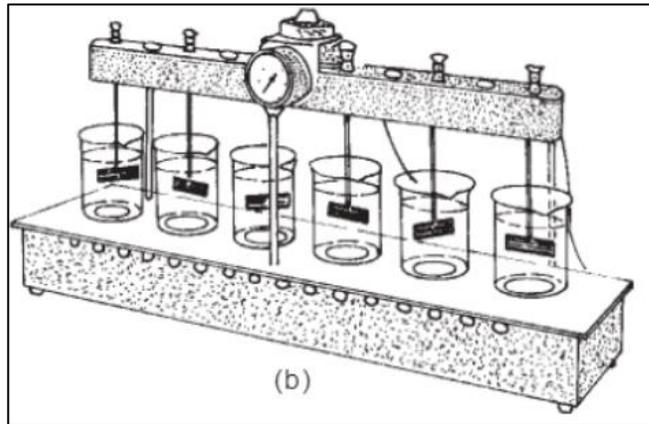
Es conocido como un sistema de simulación del proceso de coagulación, en donde se pueden determinar los siguientes parámetros:

- Determinación de dosis óptima de coagulante por:
 - Evaluación cualitativa
 - Tamaño del *floc* producido
 - Tiempo inicial de formación del *floc*
 - Evaluación cuantitativa
 - Determinaciones químicas como pH, alcalinidad, contenido de hierro y magnesio.
 - Determinaciones físicas como turbiedad y color residuales.

- Velocidad de sedimentación
- Influencia del pH en la coagulación
- Eficiencia de la mezcla mediante ensayos de segregación
- Influencia de los coagulantes en el proceso de coagulación
- Tiempo y gradiente óptimos de floculación
- Comparación entre la prueba de jarras y el comportamiento de los floculantes.
- Eficiencia de los ayudantes de coagulación, conocidos como floculantes
- Orden más efectivo de adición de los diferentes coagulantes o floculantes (Arboleda, 2000).

Las pruebas de jarras en su mayoría son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, este tiene un ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas. Importante resaltar que la norma ASTM D2035:08 es para el *test* de jarras.

Figura 13. **Equipo de Jarras**



Fuente: Várgas (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.

Estos equipos constan de los siguientes componentes:

- Agitador mecánico que posee de tres a seis paletas, puede operar a velocidades variables de entre 0 a 400 revoluciones por minuto.
- Iluminador de flóculos localizado en la base del equipo.
- Vasos de precipitado de 2 litros de capacidad, de cristal refractario.

2.9.1. Elementos más importantes en el *test* de jarras

La selección de productos químicos y la cantidad a utilizar en determinado proceso es un paso importante en el tratamiento de aguas. Se debe identificar las concentraciones con las que el proceso y el sistema funcionen de manera

óptima; es decir, obtener eficiencias adecuadas a menores costos, para lo cual se realizan ensayos de dosificación a escala laboratorio a través de equipos como la prueba de jarras.

2.9.1.1. Sistema de dosificación

Las unidades de agitación múltiple deben ser equipadas con facilidades para la adición de los coagulantes en forma rápida y simultánea a todas las jarras. La mayoría de equipos comerciales no tienen esto en cuenta, causando resultados erróneos.

Usualmente los coagulantes y ayudas de coagulación se adicionan con una pipeta graduada, pero la velocidad de adición de los reactivos es lenta y se presentan diferencias considerables de tiempo entre cada dosificación.

Se han encontrado soluciones alternativas, midiendo las cantidades de reactivo que se va a aplicar a cada jarra con una pipeta y añadirlos en *beackers* pequeños de donde se extraen con jeringas hipodérmicas desechables, colocándolas delante de la jarra correspondiente en un soporte improvisado instalado en la parte superior del equipo, tiene de seis a doce agujeros en donde son colocadas las jeringas, al empezar a funcionar el equipo con los tiempos y gradientes de velocidad programados, se aplasta una banda que presiona los émbolos de todas las jeringas al mismo tiempo.

Esto permite la aplicación simultánea en todas las jarras. Este método auxiliar improvisado deja que solo una persona ejecute toda la prueba, si no se instala esta ayuda, se requiere de por lo menos tres personas para realizar una aplicación correcta (Várgas, s.f.).

2.9.1.2. Sistemas de agitación

La intensidad de la agitación expresada como gradiente de movimiento del agua, es la variable más importante en la prueba de jarras. Se usan paletas o rotores, que trabajan en forma mecánica o magnética, y puede utilizarse una o varias paletas.

Tabla VIII. Características de agitadores

Tipo de paleta	Número de paletas	Diámetro (cm)	Área proyectada (cm)	Observaciones
Plana 1	2	7 y 6	17.5	a
Plana 2	2	7.2	28.8	b
Plana 3	2	7.2	18.4	c
Hélice	3	5.0	4.50	d
Doblada	2	5.0	2.80	-

Fuente: Várgas (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.

Donde:

- Utilizada en el modelo Phips & Bird
- Tipo impulsor marino
- Utilizada por florida 1 – Environmental specialities
- Utilizada por florida 2 – Environmental specialities

2.9.1.3. Descripción de jarras

Deben acomodarse correctamente en el equipo y tener una capacidad de 2 000 ml, si no se tuvieran de esa capacidad pueden utilizarse de 1 000 ml, aunque no es lo recomendable. Debe evitarse el uso de jarras de menor tamaño, porque se dificulta la adición de los reactivos y las paletas pueden tomar en las paredes del recipiente, según sea el diámetro de este.

Se debe evitar lavar las jarras con detergente, debido a que estos tienen compuestos aniónicos que son absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio y si no se remueven completamente, los resultados pueden afectarse de forma significativa indica (Várgas, (s.f.).

Figura 14. **Jarras de precipitado (2 litros de capacidad)**

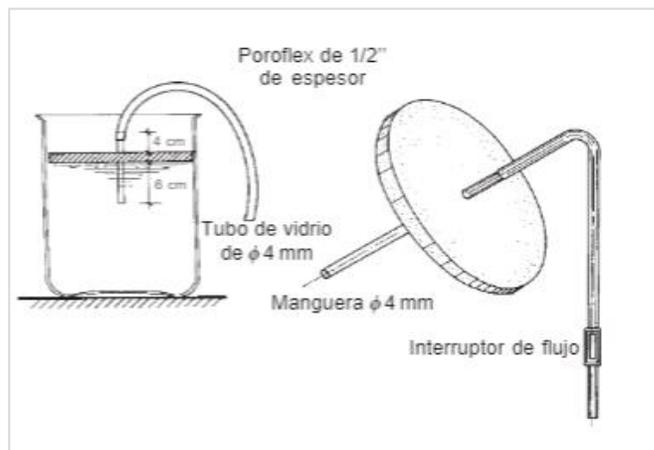


Fuente: Várgas (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.

2.9.1.4. Sistema de toma de muestra

Terminada la mezcla rápida y la floculación se tiende a sedimentar. El sobrenadante (agua clarificada), se succiona con una pipeta volumétrica a la misma profundidad en todas las jarras, o bien utilizando un sifón de aproximadamente 3mm de diámetro, debe estar colocado en dirección horizontal en el punto de muestreo para que sea representativo de una profundidad determinada, para mantener la altura constante, debe estar sostenido por un flotador de tecnopor, también debe estar hecho para que las velocidades de flujo en cada vaso sean iguales y que el arrastre de sedimentos sea el menor posible. Antes de iniciar con el muestreo, indica (Vargas, (s.f.) que se debe descartar alrededor de 10 ml de agua para después tomar las muestras y proceder a realizar los análisis correspondientes.

Figura 15. Esquema de sifón para toma de muestra



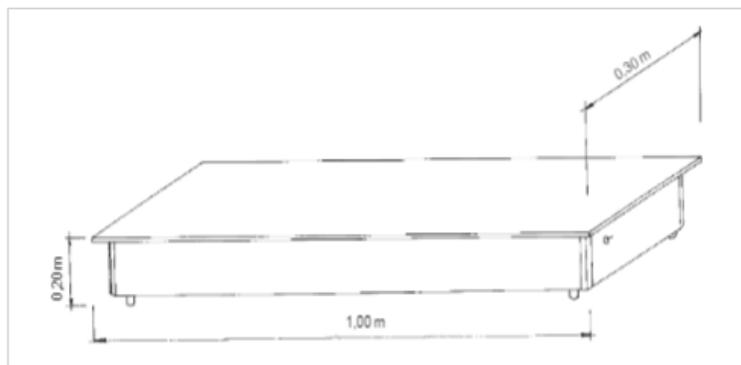
Fuente: Vargas, (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.

2.9.1.5. Sistema de iluminación

Es conveniente, aunque no esencial, tener una buena iluminación para observar mejor el floculo formado en las jarras. Idealmente, las jarras deben tener una base blanca con iluminación en ángulo recto a la dirección del observador, ya sea arriba o debajo de las jarras.

Deben evitarse fuentes de luz que generen calor, ocasionando diferencias de temperatura y afectando los resultados.

Figura 16. Esquema de base iluminada



Fuente: Várgas, (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Consultado el 16 de febrero de 2020. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.

2.9.2. Comparación del comportamiento del agua tratada en prueba de jarras y en planta de tratamiento

Con el *test* de jarras se intenta reproducir las condiciones a las que se desarrollaran los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en la

planta de tratamiento. Sin embargo, debido a que el volumen de las jarras es más pequeño, comparando con los tanques reales en la planta, únicamente se puede lograr una reproducción parcial del proceso.

Las diferencias más considerables son las siguientes:

- En los tanques de la planta existen un flujo continuo del efluente y en las jarras no existe flujo. Esto provoca que en los tanques el agua sufra un tratamiento desigual, porque un gran volumen de ella queda retenido un largo tiempo, mientras que otro porcentaje del volumen fluye casi de inmediato. En la prueba de jarras, toda el agua a tratar, queda retenida en las jarras todo el tiempo que dura el ensayo.
- Dada la diferencia de tamaño entre las jarras y los tanques de floculación, la proporción entre la escala de turbulencia que se produce en cada uno y el tamaño del floculo que se forma, es diferente, afectando la velocidad de aglutinamiento de las partículas.
- La dosificación de coagulantes, floculantes y la agitación de la masa de agua son mejor controladas en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento.

A pesar de estas deficiencias, (Vargas, (s.f.) explica que la prueba de jarras es el método más usual para controlar factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación.

2.10. Sedimentación

Es el proceso físico que consiste en la remoción de los sólidos suspendidos en un fluido por acción de la gravedad. Estas partículas deben tener un peso específico mayor que dicho fluido. Los sólidos presentes en el agua, en una planta de tratamiento, pueden tener dos orígenes: de forma natural, las sustancias como arcilla, limo o arena y de forma modificada resultado del proceso de coagulación – floculación. Al producirse la sedimentación de una suspensión de partículas, se obtiene un fluido clarificado que continúa su tratamiento por filtros y una suspensión más concentrada de lodos como producto residual (Pérez, 2002).

Las partículas en suspensión sedimentan de acuerdo a su forma y su concentración, es por ello que la sedimentación puede clasificarse según se trate de partículas discretas, partículas floculentas o partículas por caída libre e interferida.

- Sedimentación de partículas discretas: son aquellas que sus características como forma, tamaño y densidad, no cambian al descender en el líquido.
- Sedimentación de partículas floculentas: aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloidales desestabilizadas a causa de la aplicación de agentes químicos como coagulantes. Este si cambia durante la caída, su tamaño, forma y densidad, influyen en la velocidad de sedimentación. Este tipo de sedimentación es un proceso intermedio entre a coagulación – floculación y la filtración rápida en la clarificación de agua. Las partículas suspendidas en una planta de tratamiento son sólidos inorgánicos y orgánicos provenientes del color y la turbiedad, y de su paso

por los procesos de coagulación y floculación, su tamaño o densidad se incrementa para iniciar el proceso de sedimentación.

Las partículas tratadas con coagulantes metálicos, son floculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua entre 85 a 95 % y turbiedad o color con valores de densidad entre 1.002 al predominar el color y 1.03 al predominar la turbiedad. El diámetro de los floculos puede variar desde tamaños menores a 0.001 mm hasta mayores a 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (Maldonado, 2004).

- Sedimentación por caída libre e interferida: el fenómeno de caída libre sucede cuando existe una baja concentración de partículas en el agua y éstas se depositan sin interferir. Lo contrario sucede cuando existe una alta concentración de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija, ocurriendo un depósito masivo en lugar de individual, esto se conoce como sedimentación zonal o caída interferida, las partículas ya en contacto forman una masa compacta que impide una mayor consolidación, produciéndose una compresión (Galvis, 2014).

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

A continuación, se presenta la descripción de las variables independientes y dependientes.

3.1.1. Variables independientes

- Dosificación de lechada de hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] (en porcentaje)
- Dosificación de policloruro de aluminio [$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$] (ml)
- Tiempo de mezcla (min)
- Tiempo de sedimentación (min)

3.1.2. Variables dependientes

- Potencial de hidrógeno (pH)
- Porcentaje de sedimentos
- Absorbancia para determinación de color verdadero

3.1.3. Tratamiento con variables factoriales

En la tabla IX, se muestra la dosificación de tratamientos, tiempo y repeticiones.

Tabla IX. **Diseño factorial de tratamientos**

Dosificación [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O] (ml)	Tiempo (min)	Dosificación Ca(OH) ₂ (en porcentaje)	Repeticiones		
			1	2	3
6	15	2	Y _{1,1}	Y _{1,2}	Y _{1,3}
		3	Y _{2,1}	Y _{2,2}	Y _{2,3}
		4	Y _{3,1}	Y _{3,2}	Y _{3,3}
	30	2	Y _{4,1}	Y _{4,2}	Y _{4,3}
		3	Y _{5,1}	Y _{5,2}	Y _{5,3}
		4	Y _{6,1}	Y _{6,2}	Y _{6,3}
9	15	2	Y _{7,1}	Y _{7,2}	Y _{7,3}
		3	Y _{8,1}	Y _{8,2}	Y _{8,3}
		4	Y _{9,1}	Y _{9,2}	Y _{9,3}
	30	2	Y _{10,1}	Y _{10,2}	Y _{10,3}
		3	Y _{11,1}	Y _{11,2}	Y _{11,3}
		4	Y _{12,1}	Y _{12,2}	Y _{12,3}
12	15	2	Y _{13,1}	Y _{13,2}	Y _{13,3}
		3	Y _{14,1}	Y _{14,2}	Y _{14,3}
		4	Y _{15,1}	Y _{15,2}	Y _{15,3}
	30	2	Y _{16,1}	Y _{16,2}	Y _{16,3}
		3	Y _{17,1}	Y _{17,2}	Y _{17,3}
		4	Y _{18,1}	Y _{18,2}	Y _{18,3}

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Campo de estudio: Tratamiento de efluente industrial
- Área: Proceso de tratamiento de agua previo a su paso a planta Wetland
- Proyecto: Alternativa para clarificación de agua contaminada con tinta flexográfica a base de agua.

- Ubicación: Toma de muestra en Planta Sacos del Atlántico S.A y desarrollo de análisis en Centro tecnológico del concreto, CETEC, Cementos Progreso.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Katherine Gabriela Aguilar Galindo
- Asesor: Ing. Emmanuel de Jesús Montufar
- Director E.P.S: Ing. Oscar Argueta Hernández
- Director EIQ: Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía.
- Asesor supervisor E.P.S: Ing. Sergio Alejandro Recinos
- Asesor/revisor: Lcda. Lorena Benítez

3.4. Recursos materiales disponibles

Se describen a continuación los recursos materiales disponibles con los que se cuenta.

3.4.1. Materia prima

- Agua contaminada con mezcla de tintas flexográficas a base de agua, con saturaciones de color variable. El parámetro de color del efluente, está en un rango entre 350,00 – 1,700,000 U pt-Co. Los residuos son de colores Pantone para flexografía, usándose 52 colores en total, la combinación de estos depende del diseño de arte realizado.

3.4.2. Cristalería y materiales

- *Beackers* de 2,000 mL

- *Beackers* de 100 mL
- *Beackers* de 300 mL
- Conos de sedimentación Imhoff de 1,000 mL
- Soportes para conos de sedimentación
- Pipetas serológicas de 10 mL
- Vidrio de reloj
- Espátula para muestreo
- Jeringas hipodérmicas desechables
- Embudos
- Papel filtro de 0.45 μ m
- Soporte con aro para embudo

3.4.3. Equipo

En la siguiente tabla se describe el equipo de laboratorio utilizado.

Tabla X. **Equipo de laboratorio**

Equipo	Descripción	Marca	Modelo
Espectrofotómetro	Gama de longitud de onda: 190 – 1100 nm con exactitud +/- 1.0 nm. Lámpara xenón.	Merck	Spectroquant Pharo 300

Continuación de la tabla IX.

Equipo	Descripción	Marca	Modelo
Potenciómetro	Precisión de +/- 0.01 unidades	inoLab	WTW series 730
Equipo para <i>test</i> de jarras	Equipo de agitación con velocidad máxima de 600 RPM	Phipps and Bird	PB-700
Balanza analítica	Con intervalo de escala 0.001 g	Mettler toledo	HE53
Agitador magnético	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Reactivos químicos

Por tratarse de compuestos químicos, los reactivos se pueden clasificar según muchas variables: propiedades fisicoquímicas, reactividad en reacciones químicas, características del uso del reactivo. Los utilizados para el estudio se describen en la siguiente tabla.

Tabla XI. Reactivos químicos a utilizar

Tipo	Especificación	Cantidad total
Sólido aniónico	Hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂]	11 g
Líquido catiónico	Policloruro de aluminio [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O]	216 mL

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa

La finalidad del estudio es determinar una dosis optima de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, combinado con una lechada de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, que logré una coagulación y floculación efectiva de tinta, logrando la clarificación del agua, previo al tratamiento en la planta wetland, analizando los parámetros de pH, absorbancia y porcentaje de sedimentos.

Estableciéndose tres combinaciones, de tres dosis del coagulante policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, con una dosis de lechada de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, preparada a tres concentraciones diferentes, este último será utilizado como ayuda de floculación, para promover la formación del *floc*, añadiendo volumen y peso a las partículas, y regulando el pH final del agua tratada para que esta se encuentre dentro del rango aceptable del Acuerdo Gubernativo 236-2006, al agregar únicamente el coagulante PAC, la alcalinidad del agua final estará por debajo del parámetro mínimo de pH 6, permitido en el acuerdo. Realizándose a la misma velocidad de agitación y dos tiempos de mezcla de 15 y 30 minutos.

Para efectos comparativos, se realizará un tratamiento del efluente con los reactivos químicos y dosis utilizadas en la actualidad.

Tabla XII. **Reactivos químicos utilizados actualmente**

Reactivo	Características	Dosis
Composición de: ácido 2 – propeinoico, sal de sodio y polímero 2- propenamida	Líquido aniónico pH = 7	24 mL/L
Policloruro de aluminio	Líquido catiónico pH = 4	12 mL/L

Fuente: elaboración propia.

3.5.1. Potencial de hidrógeno

El pH es una unidad de medida que establece el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia. Su expresión es el logaritmo negativo de base 10 en la actividad de iones de hidrógeno.

$$pH = -\log[H^+]$$
$$pOH = -[\log OH^-]$$

Cuando una medida de pH indica que una sustancia o elemento es ácido, quiere decir que posee mayor cantidad de iones de hidrógeno. Si la medición arroja que una sustancia es alcalina o básica, indica que cuenta con menor concentración de iones hidrógeno y mayor concentración de hoxidrilos.

Figura 17. Escala de pH



Fuente: Concepto. *Escala de medida de pH*. Consultado el 10 de junio de 2020. Recuperado de <https://concepto.de/ph/>.

La medición de pH es de las actividades más importantes y de mayor frecuencia en las pruebas químicas del agua. El rango de pH para aguas

naturales oscila entre 4 y 9, aunque la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos.

En la actualidad la técnica más exacta para la medición de pH es la potenciométrica, está fundamentada en la medida de la diferencia de potencial experimentada en dos celdas electroquímicas, conocidas como electrodos, se utiliza un electrodo combinado de membrana de vidrio y uno de calomel como referencia. Los equipos de la actualidad combinan estas dos celdas electrolíticas en un mismo sensor, y poseen programas electrónicos internos que proporcionan la medida directa a partir de la diferencia de potencial, facilitando la lectura de este parámetro. Los medidores de pH modernos, poseen un mecanismo electrónico que relaciona automáticamente la medida con respecto a la temperatura, mostrando el valor real de pH a la temperatura de medición.

Este método de lectura es aplicable a todo tipo de aguas naturales, efluentes industriales y domésticos. Su precisión depende del equipo utilizado para la determinación; existen potenciómetros que permiten mediciones con +/- 0.001 unidades, requiriendo para su calibración cinco estándares. Pero los más utilizados otorgan una precisión de +/- 0.01 unidades, necesitando únicamente tres puntos o tres estándares (pH 4.00, 7.00 y 10.00), (INVEMAR, 2003).

3.5.2. Absorbancia para determinación de color

La intensidad de color de una muestra de agua es caracterizada por su grado de absorción de la luz a la longitud de onda de absorción máxima y cuantificada por la medición del coeficiente de absorción, mediante un espectrómetro o fotómetro de filtro. Generalmente, la mayoría de aguas naturales que poseen un color marrón amarillento y las muestras de aguas coloreadas

procedentes de residuos domésticos, pueden ser medidas con una longitud de onda de 436 nm.

Por otra parte, las aguas residuales industriales no presentan máximos de absorción lo suficientemente claros y diferenciados, estas aguas deben examinarse a diferentes longitudes de onda específicas dentro del conjunto del espectro visible: 436, 525 y 620 nm. La longitud de onda de 436 nm, se utiliza siempre, mientras que las otras dos, pueden diferir de estos valores, lo cual dependerá del filtro que se utilice.

Previo a la medición en el espectrómetro, las muestras deben filtrarse con el fin de evitar interferencias debidas a la presencia de sustancias no disueltas. El filtrado podría provocar otras interferencias, por ejemplo, reacciones de oxidación causadas por el contacto con el aire o por precipitaciones provocadas al momento de filtrar. Los colores dependen normalmente de la temperatura y del pH, por lo que es necesario medir estos parámetros de la muestra paralelamente a la medición óptica. Así mismo, si los colores de la muestra son muy intensos, se debe diluir en un volumen de agua destilada, multiplicándose por el factor de dilución al expresarse los resultados (ISO, 2011).

Una vez obtenida la lectura de absorbancia de la muestra a determinada longitud de onda, debe calcularse el coeficiente de absorción espectral $\alpha(\lambda)$ (absorción por unidad de paso de luz), de la siguiente forma:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{d} * f \text{ (Ecuación No. 5)}$$

Donde:

A = es la absorbancia de la muestra de agua a la longitud de onda λ

d = paso de la luz a través de la cubeta, en milímetros (mm)

f = factor utilizado para obtener el coeficiente espectral en metros recíprocos (f = 1,000).

La mayoría de espectrómetros están calibrados directamente en unidades de absorbancia, si ese no fuera el caso y estuviesen calibrados por transmitancia, puede calcularse la absorbancia de la siguiente forma:

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \text{ (Ecuación No. 6)}$$

Para expresar los resultados, se debe anotar la longitud de onda incidente conjuntamente con el coeficiente de absorción.

Nota: Para este estudio, se analizará únicamente a una longitud de onda de 436 nm, puesto que el efluente debió pasar por un proceso de clarificación previamente.

3.5.3. Sólidos sedimentados

La sedimentación está relacionada con las propiedades de caída de partículas en el agua, al producirse sedimentación, el resultado final será un fluido clarificado.

3.5.3.1. Conos de sedimentación Imhoff

Creados por el ingeniero alemán Karl Imhoff, estos conos se utilizan generalmente para determinar la eficiencia de un sedimentador, y establecer el porcentaje de sólidos en suspensión que pueden ser eliminables en una decantación primaria. El cono Imhoff es un recipiente graduado, con forma cónica, paredes transparentes y con capacidad de un litro.

Figura 18. **Cono Imhoff**



Fuente: ACEO Laboratorios. *Cono de sedimentación*. Consultado el 10 de marzo de 2020.
Recuperado de <https://acequilabs.com.co/material-laboratorio/cono-de-sedimentacion-imhoff/>.

Los sólidos sedimentables son la cantidad de material que sedimenta de una muestra en cierto periodo de tiempo. Pueden estar determinados y expresados en función de un volumen (mL/L), o de una masa (mg/L), mediante volumetría y gravimetría respectivamente. Los conos Imhoff son ideales para determinar los sólidos sedimentables de efluentes naturales, domésticos e industriales.

Tabla XIII. **Escala de medición en conos Imhoff**

Intervalo de volumen (mL)	División de escala (mL)
0 -1	0.1
1 -10	0.5
10 – 20	1
20 – 40	2
40 – 100	10
100 – 500	50
500 – 1000	100

Fuente: ACEO Laboratorios. *Cono de sedimentación*. Consultado el 10 de marzo de 2020.
Recuperado de <https://acequilabs.com.co/material-laboratorio/cono-de-sedimentacion-imhoff/>.

Siempre que el nivel de sólidos se encuentre más próximo a la distancia media entre dos divisiones de escala, este valor se suma al correspondiente a la división menor. Si el nivel se halla más próximo a una de las divisiones de escala, se considera el valor de ésta.

3.5.4. Parámetros de aceptación

Los parámetros de aceptación se presentan a continuación:

- $6 \leq \text{pH} \leq 9$
- $A \leq 0.15$

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La persona que realiza la investigación deberá tener el cuidado de que la información recopilada cumpla con las condiciones necesarias.

3.6.1. Preparación de lechada de hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]

- En una balanza analítica, pesar sobre un vidrio de reloj, 0.2 g de [Ca(OH)₂]
- En una probeta de 10 mL de capacidad, medir agua destilada, y transferir a un *beacker* de 50 mL y colocar un magneto.
- Colocar sobre un agitador magnético e iniciar agitación a velocidad baja.
- Añadir lentamente el [Ca(OH)₂] pesado y dejar agitar durante 3 minutos para lograr una buena disolución.
- Realizar el mismo procedimiento para las lechadas con concentración de 3 y 4 %, pesando 0.3 y 0.4 gramos, respectivamente. Nota: con ayuda de una varilla de agitación mantener en movimiento la lechada de cal, mientras se espera a ser añadida a la muestra de efluente contaminado, para evitar que se sedimente y cambie la concentración.

3.6.2. Evaluación de dosificaciones de policloruro de aluminio [Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O] e hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] combinados. (Norma ASTM D2035:08 para *test* de jarras). Procedimiento basado en Arboleda, 2008

- Determinar el pH, temperatura y absorbancia inicial del agua a tratar
- Añadir un volumen de 1,000 mL de agua contaminada con tinta a tres *beackers* con capacidad de 2,000 mL los cuales funcionarán como jarras, colocarlos en el equipo e introducir los agitadores.

- Tomar volúmenes (6 mL, 9 mL y 12 mL) de coagulante PAC (policloruro de aluminio [$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$]), y colocarlos en *beackers* de 100 mL.
- Iniciar con una agitación a 100 rpm durante un minuto para homogenizar la muestra.
- Mientras la muestra se encuentra en agitación, con ayuda de agujas hipodérmicas desechables tomar los volúmenes de coagulante colocado en *beackers* con anterioridad.
- Pasado el minuto de homogenización, añadir los volúmenes de coagulante respectivos a cada jarra, a la misma profundidad y al mismo tiempo (para este proceso será necesaria la ayuda de otra persona), y dejar durante cinco minutos para propiciar la desestabilización de las partículas.
- Pasado ese tiempo, añadir la alícuota de 10 mL de lechada de hidróxido de calcio en estudio a cada jarra, al mismo tiempo, tratando que este caiga en la parte saliente de un vórtice creado por la agitación para evitar que se aglomere sobre la superficie del agua formando masas pegajosas, volviéndose difíciles de disolver, y dejar nuevamente en agitación rápida durante un minuto.
- Después de este tiempo disminuir la velocidad de rotación de las paletas hasta 50 rpm y dejar flocular durante 15 minutos.
- Al pasar el tiempo de floculación, suspender la agitación, extraer las paletas y transferir las muestras a conos de sedimentación Imhoff previamente etiquetados, dejando sedimentar durante 45 minutos.

- Repetir el mismo procedimiento para el tiempo de floculación de 30 minutos y para todas las concentraciones de lechada de cal (2, 3 y 4 %).

3.6.3. Lectura de sedimentos formados (basado en procedimiento 2540 F. Sólidos sedimentables, Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales) (Baird, Eaton, & Rice, 2017)

- Pasado el tiempo de sedimentación, realizar la lectura de formación de sedimento en mL/L según la escala de los conos y anotar.
- Tomar muestras de cada cono, con ayuda de pipetas serológicas a la misma profundidad y tiempo (aproximadamente 250 mL), transferir a *beakers* de 300 mL previamente etiquetado, para proceder a la lectura de absorbancia y pH final de cada jarra.

Nota: Purgar un volumen mínimo de muestra, antes de añadir el resto.

3.6.4. Filtración de muestras de conos Imhoff

- Situar un embudo de vidrio en un aro montado en un soporte, colocando debajo un *beaker* de 300 mL, el extremo inferior de la punta del embudo debe tocar la pared interna del *beaker* de forma que el líquido que desciende deslice por la pared del recipiente y así evitar salpicaduras.
- Cortar y doblar papel filtro de 0.45 μm y colocar en embudo con ayuda de unas gotas de agua destilada para que el papel este bien adherido a las paredes del embudo.

- Transferir la muestra al embudo procurando no llenar más de la mitad con ayuda de una varilla de vidrio para evitar salpicaduras.
- Esperar que el líquido escurra durante aproximadamente 5 minutos.

3.6.5. Lectura de pH (Norma ASTM 1293)

- Calibrar el equipo diariamente antes de iniciar con las mediciones
 - Seleccionar tres soluciones buffer con pH de 4, 7 y 10
 - Encender potenciómetro
 - Enjuagar el electrodo con agua destilada y secar con toalla de papel fino, para no dañarlo.
 - Iniciar calibración introduciendo el electrodo en el primer frasco de estándar con pH de 4, esperar el tiempo del equipo en realizar lectura (aproximadamente 30 segundos) y extraer el electrodo.
 - Repetir el mismo procedimiento con las otras dos soluciones estándar.
- Enjuagar completamente el electrodo con agua destilada, secar con toalla de papel fina o no electrostática y luego enjuagar con la muestra.
- Traspasar 50 mL de muestra filtrada, a un *beacker* previamente purgado.

- Colocar una barra magnética y mantener una agitación suave para lograr una medición más precisa.
- Introducir el electrodo en la muestra.
- Esperar a que se establezca la lectura y registrar pH de la muestra.
- Extraer el electrodo y enjuagarlo con agua destilada, secar y colocarlo en su respectivo protector de bulbo con solución de cloruro potásico (3 mol/L KCl).

3.6.6. Determinación de color real mediante espectrofotómetro. (Norma ISO 7887:2011 - Calidad del agua: examen y determinación de color)

- Encender equipo y elegir absorbancia como medida de análisis
- Ajustar a longitud de 436 nm
- Ubicar celda de 10 mm en el espectrofotómetro, fijando agua destilada como blanco y registrar lectura.
- Retirar celda y secar.
- Purgar la celda con muestra del efluente tratado, previamente filtrado.
- Colocar muestra en la celda óptica del espectrofotómetro y realizar lectura.
- Realizar el mismo procedimiento para todas las muestras y teniendo los valores de absorbancia para cada una, calcular coeficiente de absorción según ecuación.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Muestra la tabla utilizada para el control y recolección de datos de las distintas variables a analizar según las dosis, combinaciones y tiempos de agitación establecidos.

Tabla XIV. **Hoja de datos originales para cada combinación de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ e hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ a distintos tiempos de agitación**

Nomenclatura	Sedimentos en porcentaje		pH		Absorbancia	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
A.6.2	425.000	422.170	7.917	7.964	0.300	0.335
	421.099	419.112	7.889	7.894	0.298	0.326
	418.211	418.571	7.725	7.847	0.245	0.361
A.6.3	416.286	414.140	8.077	8.025	0.411	0.455
	415.162	413.162	7.975	7.977	0.348	0.452
	414.108	411.428	7.836	7.954	0.359	0.412
A.6.4	410.714	409.714	8.112	8.075	0.552	0.582
	411.835	407.013	7.982	8.090	0.423	0.587
	410.000	407.661	7.881	7.934	0.471	0.617
B.9.2	775.809	760.116	7.526	7.588	0.084	0.106
	765.896	752.013	7.273	7.509	0.096	0.107
	786.981	765.896	7.369	7.450	0.109	0.109
B.9.3	710.983	615.607	7.566	7.484	0.118	0.116
	684.971	696.428	7.520	7.635	0.097	0.111
	691.237	754.335	7.410	7.566	0.113	0.112
B.9.4	676.300	586.705	7.701	7.674	0.121	0.124
	615.607	682.143	7.610	7.656	0.111	0.119
	641.983	656.069	7.572	7.618	0.121	0.118
C.12.2	841.041	766.763	7.022	7.144	0.089	0.096
	875.722	794.405	7.014	7.116	0.081	0.093
	853.862	759.283	7.092	7.126	0.092	0.094
C.12.3	823.699	753.410	7.230	7.249	0.108	0.102
	835.260	778.092	7.182	7.308	0.106	0.109
	829.718	738.561	7.211	7.273	0.104	0.107
C.12.4	791.908	704.046	7.356	7.323	0.117	0.109
	742.774	769.942	7.261	7.381	0.113	0.112
	754.935	716.134	7.297	7.348	0.101	0.113

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se analizaron tres parámetros (pH, coeficiente de absorbancia y porcentaje de sedimentos), variables que definieron la combinación de coagulantes más adecuada, cada combinación fue evaluada a dos tiempos de agitación (15 y 30 minutos), a una misma velocidad, realizándose tres repeticiones por cada combinación. La combinación de estas variables permitió desarrollar un total de 18 tratamientos y 54 observaciones de los cuales se obtuvo la media y desviación estándar entre repeticiones por cada combinación, entre combinaciones y así mismo entre los resultados de las mismas combinaciones a distinto tiempo de agitación. Finalmente, se realizó un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo con un nivel de confianza del 95 %.

3.8.1. Medidas de tendencia central

- Media aritmética

Representa el centro de gravedad del conjunto de valores observados.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Ecuación No.7}$$

La media aritmética de un conjunto de valores $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ de una variable x , es determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra (n).

Esta variable estadística fue utilizada para promediar los valores de los parámetros analizados.

3.8.2. Medidas de dispersión

Muestran la variabilidad de una distribución, indicándolo a través de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable se encuentran muy alejadas de la media.

- Varianza

Medida de las desviaciones de x al cuadrado, respecto a la media aritmética de una distribución estadística, donde n , es el tamaño de la muestra. Expresada matemáticamente como:

$$S^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación No.8}$$

- Desviación estándar

Indica el grado de dispersión que tiene un conjunto de datos de la media. Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Representada como:

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ecuación No.9}$$

3.8.3. Análisis de varianza ANOVA

Constituye una herramienta básica para estudiar el efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre la medida de una variable continua. Es el *test* estadístico utilizado cuando lo que se busca es comparar las medidas de dos o más grupos. También puede utilizarse para estudiar los posibles efectos de los factores sobre la varianza de una variable.

La hipótesis nula de la que parten los diferentes tipos de ANOVA consiste en que la media de la variable estudiada es la misma en los diferentes grupos, lo contrario a la hipótesis alternativa que indica que al menos dos medias difieren de forma significativa. Básicamente un ANOVA consiste en calcular la media de cada uno de los grupos para posteriormente comparar la varianza de estas medias, es decir, la varianza expuesta por el variable grupo, también llamada intervarianza, en comparación con la varianza promedio dentro de los grupos, conocida como intravarianza (Amat Rodrigo, 2016).

3.9. Plan de análisis de los resultados

Este plan es la parte final de la investigación realizada, en él se concentra toda la información obtenida y que será presentada.

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

Los resultados de pH, absorbancia y porcentaje de sedimentos formados, obtenidos de los dieciocho tratamientos propuestos, definieron cuál de las combinaciones de reactivos y tiempo de agitación será la óptima para una coagulación y floculación efectiva, teniendo en cuenta que según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*, artículo 20 – Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores – se indica que el parámetro de potencial de hidrógeno debía encontrarse en un valor entre 6 y 9. Así mismo, el valor de absorbancia debía ser igual o mayor al obtenido mediante el tratamiento del efluente utilizando los reactivos actuales de la planta.

3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos

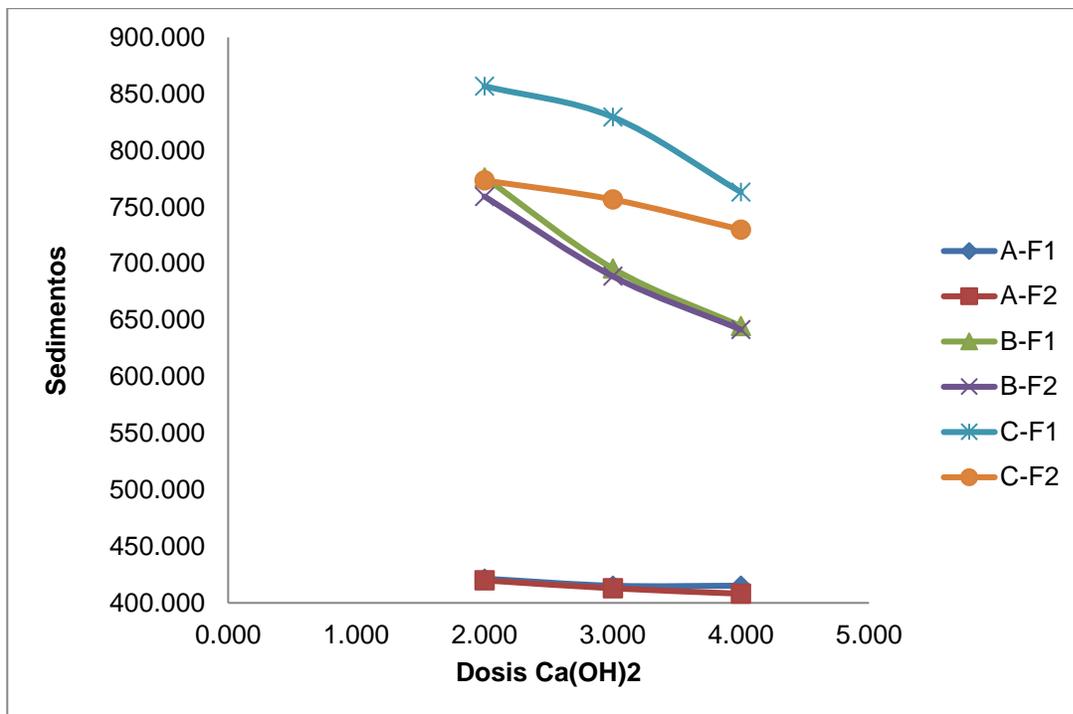
Para la elaboración de las representaciones gráficas, tabulación de los resultados y el análisis estadístico, se utilizó el *software* Microsoft Excel.

4. RESULTADOS

- 4.1. **Cuantificación del porcentaje de sedimentos, potencial de hidrógeno y absorbancia, de diferentes combinaciones de policloruro de aluminio $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ e hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a distintos tiempos de agitación, para la clarificación de agua con tinta flexográfica**

En los siguientes diagramas se presentan la cuantificación de los porcentajes de sedimentos, el potencial de hidrógeno y absorbancia.

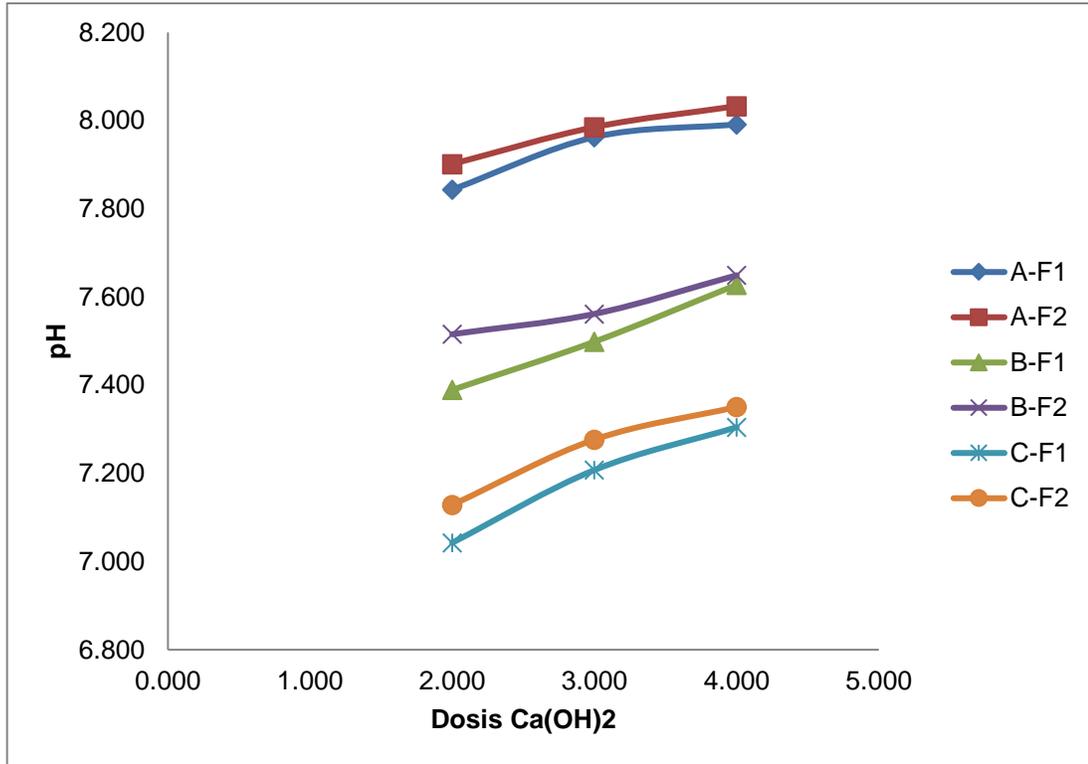
Figura 19. **Relación de porcentaje de sedimento formado respecto a dosificación de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dos tiempos de agitación**



Nomenclatura	Sedimentos (ml)	
	F1	F2
A.6.2	421.437	419.951
A.6.3	415.185	412.910
A.6.4	415.185	408.129
B.9.2	776.229	759.342
B.9.3	695.730	688.790
B.9.4	644.630	641.639
C.12.2	856.875	773.484
C.12.3	829.559	756.688
C.12.4	763.206	730.041

Fuente: elaboración propia.

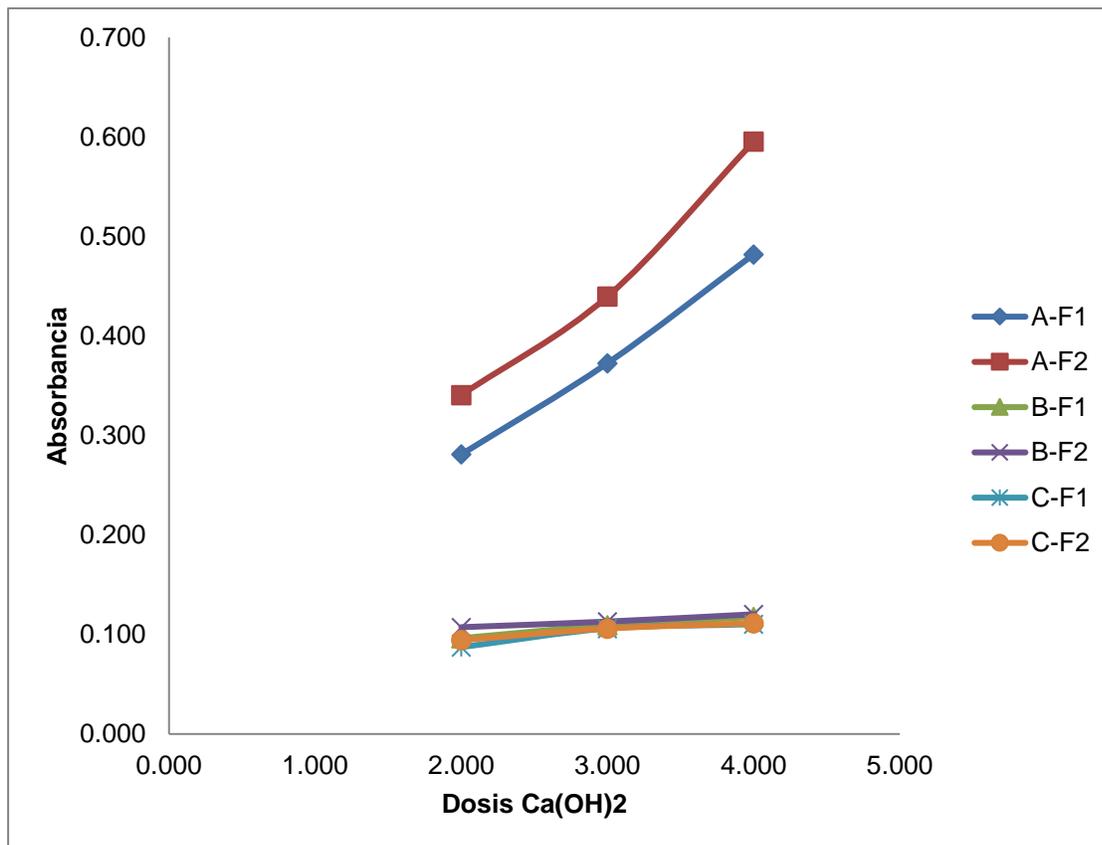
Figura 20. **Relación de pH respecto a dosificación de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dos tiempos de agitación**



Nomenclatura	pH	
	F1	F2
A.6.2	7.844	7.902
A.6.3	7.963	7.985
A.6.4	7.992	8.033
B.9.2	7.389	7.516
B.9.3	7.499	7.562
B.9.4	7.628	7.649
C.12.2	7.043	7.129
C.12.3	7.208	7.277
C.12.4	7.305	7.351

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Relación de absorbancia respecto a dosificación de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ a dos tiempos de agitación**



Nomenclatura	Absorbancia		Coeficiente de absorbancia	
	F1	F2	F1	F2
A.6.2	0.281	0.341	28.100	34.067
A.6.3	0.373	0.440	37.267	43.967
A.6.4	0.482	0.595	48.200	59.533
B.9.2	0.096	0.107	9.633	10.733
B.9.3	0.109	0.113	10.933	11.300
B.9.4	0.118	0.120	11.767	12.033
C.12.2	0.087	0.094	8.733	9.433
C.12.3	0.106	0.106	10.600	10.600
C.12.4	0.110	0.111	11.033	11.133

Fuente: elaboración propia.

4.2. Variación estadística de las distintas combinaciones de coagulante y ayuda de floculación, a los distintos tiempos de agitación

En las siguientes tablas se presenta la variación estadística de las distintas combinaciones de coagulante y ayuda de floculación, a los distintos tiempos de agitación.

Tabla XV. Desviación estándar entre combinaciones con dosis de Ca(OH)_2 constante a 15 minutos de agitación

Dosis [$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$]	Dosis de Ca(OH)_2	σ Porcentaje de sedimentos	σ pH	σ Absorbancia
6	2	231.656	0.402	0.109
9				
12				
6	3	211.471	0.381	0.153
9				
12				
6	4	176.929	0.344	0.212
9				
12				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Desviación estándar entre combinaciones con dosis de $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ constante a 15 minutos de agitación**

Dosis $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$	Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	∂ Porcentaje de sedimentos	∂ pH	∂ Absorbancia
6	2	3.609	0.078	0.101
	3			
	4			
9	2	66.344	0.119	0.011
	3			
	4			
12	2	48.171	0.132	0.012
	3			
	4			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Análisis de varianza lineal de porcentaje de sedimentos a 15 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$	770498.529	2	385249.264	1554.006	6.959E-21	3.555
Dosis $\text{Ca}(\text{OH})_2$	27823.733	2	13911.867	56.117	1.840E-08	3.555
Interacción	12678.536	4	3169.634	12.786	4.206E-05	2.928
Dentro del grupo	4462.330	18	247.907			
Total	815463.128	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Análisis de varianza lineal de pH a 15 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O]	2.533	2	1.266	161.300	3.216E-12	3.555
Dosis Ca(OH) ₂	0.213	2	0.107	13.588	2.531E-04	3.555
Interacción	0.014	4	0.004	0.453	0.769	2.928
Dentro del grupo	0.141	18	0.008			
Total	2.902	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Análisis de varianza lineal de absorbancia a 15 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O]	0.451	2	0.225	299.578	1.527E-14	3.555
Dosis Ca(OH) ₂	0.030	2	0.015	19.998	2.672E-05	3.555
Interacción	0.032	4	0.008	10.716	1.270E-04	2.928
Dentro del grupo	0.014	18	0.001			
Total	0.527	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Desviación estándar entre combinaciones con dosis de Ca(OH)₂ constante a 30 minutos de agitación**

Dosis [Al ₂ (OH) ₅ Cl ₂ ·5H ₂ O]	Dosis de Ca(OH) ₂	σ Porcentaje de sedimentos	σ pH	σ Absorbancia
6	2	200.155	0.387	0.139
9				
12				
6	3	182.073	0.357	0.191
9				
12				
6	4	166.317	0.342	0.277
9				
12				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Desviación estándar entre combinaciones con dosis de $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ constante a 30 minutos de agitación**

Dosis $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$	Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\bar{\sigma}$		
		Porcentaje de sedimentos	$\bar{\sigma}$ pH	$\bar{\sigma}$ Absorbancia
6	2	5.947	0.066	0.128
	3			
	4			
9	2	59.238	0.068	0.007
	3			
	4			
12	2	21.907	0.113	0.009
	3			
	4			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Análisis de varianza lineal de porcentaje de sedimentos a 30 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$	596097.036	2	298048.518	287.930	2.159E-14	3.555
Dosis $\text{Ca}(\text{OH})_2$	15000.509	2	7500.254	7.246	4.915E-03	3.555
Interacción	9145.808	4	2286.452	2.209	0.109	2.928
Dentro del grupo	18632.558	18	1035.142			
Total	638875.911	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Análisis de varianza lineal de pH a 30 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis						
[Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O]	2.350	2	1.175	415.638	8.630E-16	3.555
Dosis Ca(OH)₂	0.119	2	0.060	21.114	1.902E-05	3.555
Interacción	0.011	4	0.003	1.016	0.425	2.928
Dentro del grupo	0.051	18	0.003			
Total	2.531	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Análisis de varianza lineal de absorbancia a 30 minutos de agitación**

Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Dosis						
[Al₂(OH)₅Cl₂·5H₂O]	0.735	2	0.367	2534.814	8.686E-23	3.555
Dosis Ca(OH)₂	0.041	2	0.020	141.342	9.873E-12	3.555
Interacción	0.059	4	0.015	101.135	4.443E-12	2.928
Dentro del grupo	0.003	18	0.000			
Total	0.837	26				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Desviación estándar de resultados entre tiempos de agitación**

Nomenclatura	Porcentaje de sedimentos			pH			Absorbancia		
	F1	F2	σ	F1	F2	σ	F1	F2	σ
A.6.2	421.437	419.951	1.051	7.844	7.902	0.041	0.281	0.341	0.042
A.6.3	415.185	412.910	1.609	7.963	7.985	0.016	0.373	0.440	0.047
A.6.4	415.185	408.129	4.989	7.992	8.033	0.029	0.482	0.595	0.080
B.9.2	776.229	759.342	11.941	7.389	7.516	0.089	0.096	0.107	0.008
B.9.3	695.730	688.790	4.908	7.499	7.562	0.045	0.109	0.113	0.003
B.9.4	644.630	641.639	2.115	7.628	7.649	0.015	0.118	0.120	0.002
C.12.2	856.875	773.484	58.967	7.043	7.129	0.061	0.087	0.094	0.005
C.12.3	829.559	756.688	51.528	7.208	7.277	0.049	0.106	0.106	0.000
C.12.4	763.206	730.041	23.451	7.305	7.351	0.033	0.110	0.111	0.001

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Análisis de varianza de porcentaje de sedimentos formados a dos tiempos de agitación**

ANÁLISIS DE VARIANZA (Porcentaje de sedimentos)						
Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Tiempo agitación (min)	2864.311	1	2864.311	0.096	7.600E-01	4.494
Dentro del grupo	475059.315	16	29691.207			
Total	477923.626	17				

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXIV. *Desviación estándar de resultados entre tiempos de agitación.*

Tabla XXVII. **Análisis de varianza de potencial de hidrógeno a dos tiempos de agitación**

ANÁLISIS DE VARIANZA (pH)						
Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Tiempo agitación (min)	0.016	1	0.016	0.145	7.083E-01	4.494
Dentro del grupo	1.747	16	0.109			
Total	1.763	17				

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXIV. *Desviación estándar de resultados entre tiempos de agitación.*

Tabla XXVIII. **Análisis de varianza de absorbancia a dos tiempos de agitación**

ANÁLISIS DE VARIANZA (Absorbancia)						
Factores	Sc. Ajuste	GL	Mc. Ajuste	F	P	Fc
Tiempo agitación (min)	0.004	1	0.004	0.139	7.139E-01	4.494
Dentro del grupo	0.449	16	0.028			
Total	0.453	17				

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXIV. *Desviación estándar de resultados entre tiempos de agitación.*

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con el propósito de encontrar una alternativa de tratamiento de agua que disminuya el uso de coagulantes químicos y permita mejorar la clarificación del agua contaminada con tinta flexográfica, cumpliendo con el parámetro de potencial de hidrógeno establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de disposición de lodos*, se propusieron distintas combinaciones de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, y lechada de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ a dos tiempos de agitación de quince y treinta minutos a una velocidad de cincuenta revoluciones por minuto, siendo procesadas mediante un *test* de jarras, para posteriormente analizar el porcentaje de sedimentos formados, potencial de hidrógeno, absorbancia y coeficiente de absorción.

- Porcentaje de sedimentos

En la figura 20, se presenta la relación del porcentaje de sedimento formado respecto a la variación de la dosificación de policloruro de aluminio manteniendo las dosis de lechada de hidróxido de calcio constante, a los dos tiempos de agitación propuestos. Se observa que a medida que se aumentaba la dosis del coagulante químico el porcentaje de sedimentos también aumentaba, es decir, que las partículas coloidales presentaban fuerzas de cohesión más fuertes, dejando un líquido más limpio, sin embargo, conforme los porcentajes de lechada de cal iban aumentando el porcentaje de sedimento disminuía, dado que al añadir más iones negativos de los necesarios para aumentar el tamaño de los floculos y estabilizar el pH, lo que se provoco fue un efecto contrario, logrando que se

formaran únicamente microfloculos con velocidades de sedimentación más bajas.

- **Potencial de hidrógeno**

En la figura veintiuno, se observa el comportamiento del potencial de hidrógeno respecto a las distintas combinaciones de coagulante y ayuda de coagulación a los dos tiempos de agitación, todos los valores de pH obtenidos están dentro del rango permitido en el Acuerdo Gubernativo 236-206, a medida que la dosis de policloruro aumenta, el pH va disminuyendo, pero al aumentar el porcentaje de lechada de cal en cada combinación, el pH aumenta, dado que se aumenta la cantidad de iones negativos en el agua.

- **Absorbancia**

En la figura veintidós se presenta la relación de absorbancia respecto a cada combinación, observando que este valor disminuye conforme la dosis de policloruro de aluminio aumentaba, lo que indica que el porcentaje de sedimento formado fue mayor, teniéndose agua más clara y mayor paso de luz, la absorbancia se incrementa cada vez que la dosis de lechada de cal lo hace, esto porque la cal no es soluble en agua y al existir cal en exceso hay más partículas disueltas, aumentando así la turbiedad del líquido.

La coagulación se basa en una doble capa en donde la carga negativa de los coloides provocada por sus grupos funcionales, es desestabilizada por la carga positiva de los iones coagulantes. Por su misma naturaleza (carga negativa), existe una fuerza de repulsión entre coloides, que es lo que permite que estén en suspensión, por el efecto de su propia carga, el ion coagulante se acerca a la superficie del coloide, lo que hace que su potencial se reduzca a tal

punto que comienzan a presentarse fuerzas de atracción de tipo van der Waals entre los coloides y el ion coagulante y se comienzan a formar los coágulos, esto fue lo que sucedió al añadir inicialmente al proceso, una dosis de policloruro de aluminio dado que este es una sustancia anfótera, y en este caso se comportó como un ácido de Lewis, permitiendo que se neutralizara la carga de las partículas coloidales, es decir, la sal metálica actuó sobre los coloides del agua por medio del catión.

Para lograr que el proceso de coagulación fuera eficaz fue necesaria una agitación instantánea a 100 RPM para poder dispersar el coagulante y favorecer las reacciones químicas inicial, posterior a ellos se mantuvo una velocidad de 50 RPM, mantener una agitación homogénea y lenta del conjunto, fue importante para aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encontraran con una partícula de flóculo.

La lechada de hidróxido de calcio fue utilizada como coadyuvante, favoreciendo la coagulación y llevando el agua a un pH óptimo, una vez lograda la desestabilización de las partículas, lo que interesaba que estas sedimentaran, el hidróxido de calcio además ayudó a la formación de los flóculos, para lograr una mejor clarificación del agua, estos necesitan aumentar en volumen, peso y cohesión.

El aumentar el tiempo de agitación de quince a treinta minutos no causo mayor efecto en los resultados de las variables estudiadas, el porcentaje de sedimentos disminuyó y el pH y absorbancia aumentaron al pasar de quince a treinta minutos, pero con un gradiente pequeño, la desviación estándar entre dichos resultados puede observarse en la tabla XXIV.

Tabla XXIX. Cronograma de actividades

Descripción de actividades	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
	Semana				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Inducción laboratorio CETEC	■																							
Recolección de información y caracterización de proceso actual		■	■	■																				
Toma y caracterización de muestras de efluente			■	■																				
Desarrollo de pruebas fisicoquímicas de efluente					■	■	■	■	■	■	■	■												
Ordenamiento y tabulación de datos																	■							
Análisis e interpretación de resultados																		■						
Análisis estadístico																			■					
Presentación a nivel gerencia																			■					
Planificación de contenido para difusión de información																			■	■				
Desarrollo de campaña de difusión																				■				
Inicio de capacitación a personal técnico																					■	■		
Evaluación final a personal																								■

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Presupuesto generado para investigación

Descripción	Precio Unitario (Q)	Unidades	Subtotal (Q)
Alquiler de equipo de jarras	2 500	1	2 500
Análisis de potencial de hidrógeno	150	54	8 100
Análisis espectrofotométrico	250	54	13 500
Uso de balanza analítica	1 000 (alquiler de equipo)	54	1 000
Conos de sedimentación Imhoff	320	6	1 920
Soporte para conos de sedimentación	250	6	1 500
<i>Beacker</i> de 2000 ml	95	6	570
<i>Beacker</i> de 100 ml	45	6	270
Pipeta serológica 10 ml	800	6	4 800
Espátula	55	1	55
Vidrio de reloj	125	3	375
Garrafón de agua desmineralizada	15	3	45
Papel filtro 0.45µm	40	5	200
Toallas de papel	10	1	10
Saco de hidróxido de calcio	42	1	42
Poliloruro de aluminio	815	1	815
Impresión	120	4	480
Encuadernación	75	4	300
TOTAL		Q. 36 482	

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los mejores resultados fueron obtenidos con una combinación de 12 ml de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, y una dosis de lechada de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ al 2 %, con un tiempo de agitación de 15 minutos.
2. Todas las combinaciones de reactivos dieron un resultado de potencial de hidrógeno dentro de los límites permitidos. Obteniendo un pH de 7.04 con la mejor combinación.
3. La menor absorbancia tuvo un valor de 0.087 con la combinación de 12 ml de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$ y concentración de cal al 2 %.
4. La formación de sedimentos más alta se obtuvo mediante la combinación óptima, teniendo 856.87 ml de sedimentos formados.
5. Se rechaza la hipótesis nula y se aprueba la hipótesis alterna, que establece que sí existe variación significativa entre los resultados de porcentaje de sedimentos formados y absorbancia.
6. Se aprueba la hipótesis nula, que establece que no existe variación significativa entre los resultados de potencial de hidrógeno al establecer distintas combinaciones de policloruro de aluminio y lechada de hidróxido de calcio a diferentes dosis.

RECOMENDACIONES

1. Instituir un procedimiento estándar para la adición de los coagulantes debe ser en forma rápida y simultánea a todas las jarras, si el equipo no cuenta con un método automático para añadir los reactivos de esta forma.
2. Establecerse un área con las condiciones adecuadas para evitar la contaminación de muestras por partículas de polvo y así afectar los resultados.
3. Mantener en constante agitación las lechadas de cal para evitar la sedimentación.

REFERENCIAS

1. ACEO Laboratorios. (s.f.). *Cono de sedimentación*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://acequilabs.com.co/material-laboratorio/cono-de-sedimentacion-imhoff/>.
2. Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de disposición de lodos*. Constitución Política de la República de Guatemala. Guatemala. 5 de mayo de 2006.
3. Amat, J. (3 de enero, 2016). *Ciencia de datos: ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova.
4. Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, INTERAMERICANA S.A.
5. Barrenechea, A. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Planta de filtración rápida. Manual I. Teoría tomo I*. Lima, Perú.
6. Calidra, G. (8 de febrero, 2002). *Usos de la cal en el tratamiento de aguas*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://foccal.org/portal/sites/default/files/archivos/articulos/Tratamiento%20AGUAS-CAL.pdf>.

7. Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. Lima, Perú: SEDAPAL.
8. Castellanos, S., y Tusarma, M. (2014). *Evaluación fisicoquímica por el método de adsorción-coagulación-floculación para la remoción de colorantes del efluente del área de procesos industriales de la empresa textil CO&TEX S.A.* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
9. Cifuentes, M., Durand, G., y Sepúlveda, C. (1999). *Degradación fotoquímica de tintas flexográficas con radiación UV/H₂O₂*. *Revista Ciencia Abierta*. Vol 7.
10. Coagulación. (12 de mayo, 2012). *Química y tratamiento de aguas*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://coagulacionagua.blogspot.com/2012/05/contenido.html>.
11. Cogollo, J. (s.f.). *Portal de revistas bdigital*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>.
12. Concepto (s.f.). *Escala de medida de pH*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://concepto.de/ph/>.
13. Galvis González, N. J. (2014). *Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización*. (Tesis de magister). Universidad de Manizales, Colombia.

14. García, C. y García, C. (Junio de 2016). *Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación*. *Revista Tecnura*, 20 (47), 107-117.
15. Gómez, J. (22 de marzo, 2017). *Comunidad Flexográfica*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://encontinuo.com/index.php?blogs/entry/172-diversidad-de-tintas-para-impresi%C3%B3n-flexogr%C3%A1fica/>.
16. González, L. y Hernández, C. (2002). *Introducción al análisis instrumental*. Barcelona, España: Editorial Ariel, S.A.
17. Ingredion México. (s.f). *Conoce a Ingredion*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.ingredion.com/na/es-mx/compania.html>.
18. INVEMAR. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminante marinos (aguas, sedimentos y organismos)*. Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.
19. ISO. (2011). *UNE- EN ISO 7887. Calidad del agua: exámen y determinación de color*. España: AENOR.
20. Jarsa Guatemala. (s.f.). *Innovando la química con excelencia*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.grupojarsa.net/>.

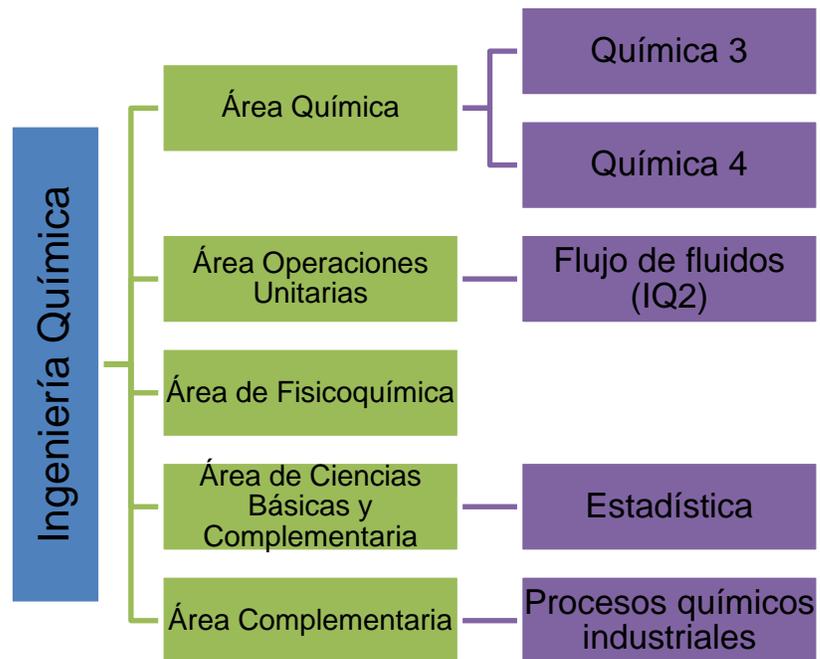
21. Konica Minolta. (5 de marzo, 2006). *Entendiendo el espacio de color CIE L*a*b.* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>.
22. Maldonado, V. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS. (2004). *Sedimentación. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida. Manual I. Tomo I.* Lima, Perú.
23. Martínez, M., y Osorio, A. (Agosto de 2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.*, 13(1), 192-205.
24. Pérez, J. (2002). *Manual de potabilización del agua.* (Tesis de maestro asociado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
25. Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable.* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf. Medellín.
26. Rinne, T. (s.f.). Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro. *XXII Congreso de Centroamerica y Panama de ingeniería sanitaria y ambiental.* Honduras: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

27. Rivas, S., Menés, G., y Rodríguez, A. (2017). Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la empresa del níquel comandante Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 8(2),195-205.
28. Rodríguez, C. (2008). *Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Sucre, Colombia.
29. Romero, J. (2005). *Calidad del agua*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
30. Suárez, J., Burgos, A., y Ures, P. (2014). *Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil*. Coruña.
31. Tejada, R. (2014). *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa minera Santiago –B*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Altiplano, Perú.
32. Toledo, M. (2017). *Basics of color measurements*. Suiza: Market Support Group AnaChem.
33. Univisión noticias. (2 de abril, 2018). Espectro visible por el hombre. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.univision.com/explora/el-espectro-visible-de-luz>.

34. Vargas, L. (s.f.). *Docplaye. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Recuperado de https://docplayer.es/36882906-Capitulo-11-criterios-para-la-seleccion-de-los-procesos-y-de-los-parametros-optimos-de-las-unidades.html#download_tab_content.
35. Vásconez, D. (2013). *Reducción del nivel de sólidos suspendidos del agua de retrolavado en la etapa de filtración*. (Tesis de licenciatura). Universidad Central de Ecuador, Ecuador.
36. Zaldumbide, F. (2008). *Remoción de color en aguas contaminadas con tintas flexoacuosas mediante un sistema acoplado electroquímico - Ozono*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
37. Zaldumbide, F., y Barrera, C. (2009). *Remoción de color en aguas contaminadas con tintas, pretratadas electroquímicamente mediante ozono en medio alcalino*. *Revista Quivera*, 11(1), 68-76.

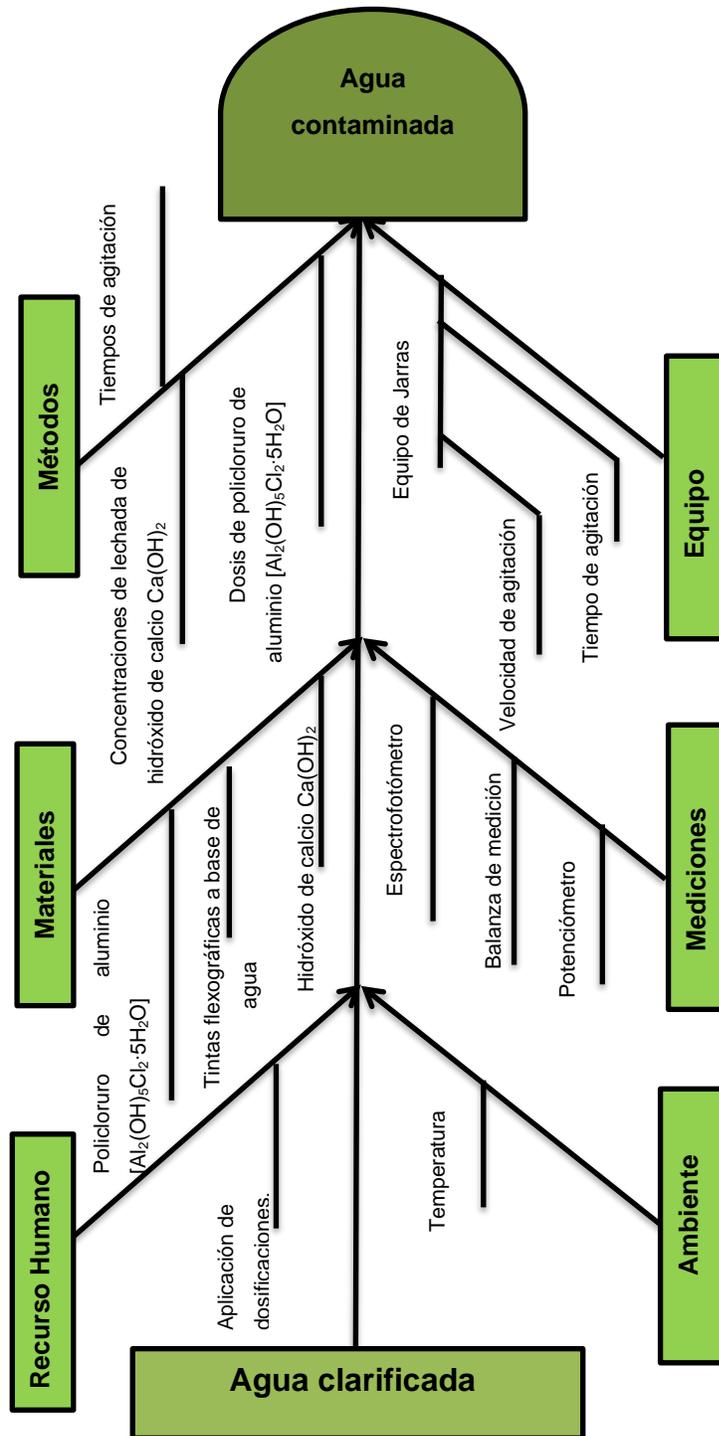
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de causa y efecto



Fuente: elaboración propia.

Para identificar más fácil las muestras se codificó con una letra y dos números separados por puntos. Dado que son tres grupos de combinaciones, la letra representa el grupo, siendo A para el primero, B para el segundo y C para el tercero, el primer dígito representa la dosificación de policloruro de aluminio $[Al_2(OH)_3Cl_3]$, y el segundo dígito la dosificación de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$. Se tienen dos tiempos de agitación para floculación, siendo F1 para 15 minutos y F2 para 30 minutos.

Apéndice 3. Codificación para identificación de tratamientos

Dosificación de $[Al_2(OH)_3Cl_3]$ (g/l)	Tiempo (min)	Tiempo (min)	Dosificación de $Ca(OH)_2$ (g/l)	Código
6			2	A.6.2.
			3	A.6.3.
			4	A.6.4.
9	F1	F2	2	B.9.2.
			3	B.9.3.
			4	B.9.4.
12			2	C.12.2.
			3	C.12.3.
			4	C.12.4.

Fuente: elaboración propia.

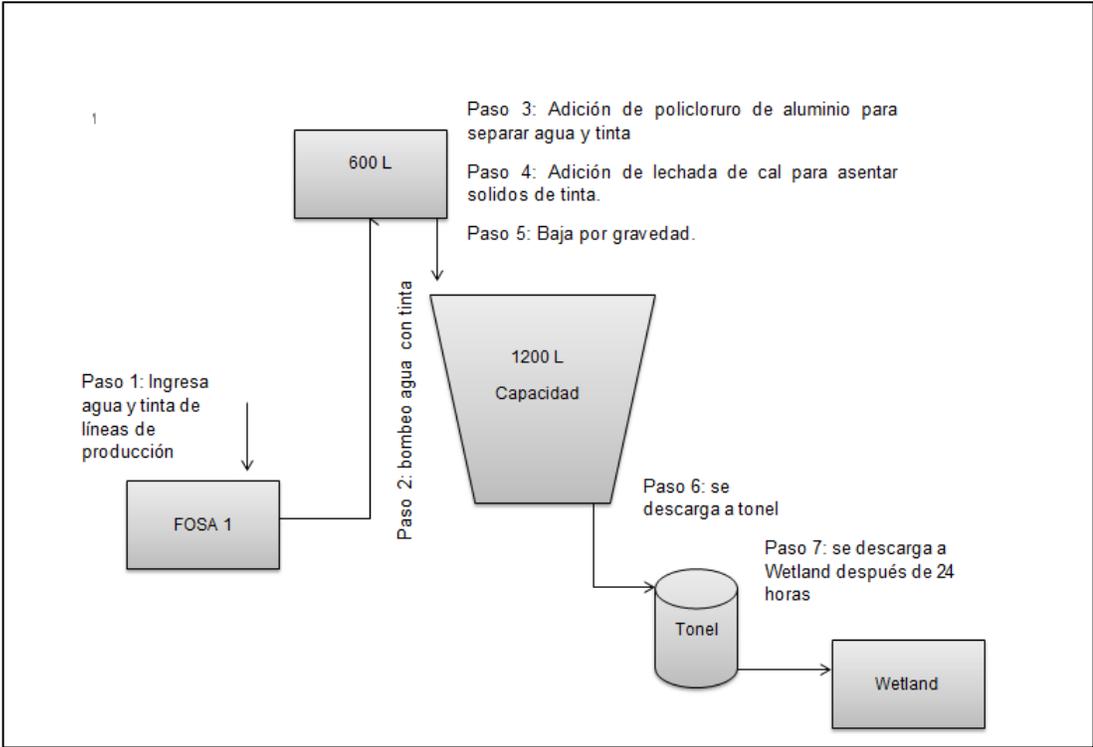
Apéndice 4. **Proceso actual de tratamiento de agua contaminada con tinta**



1	Ingres a agua y tinta de líneas de producción
2	Bombeo de agua contaminada
3	Tanque de 600 L – Agua contaminada Adición de policloruro de aluminio y líquido aniónico.
4	Tanque 1200 L - Mezcla agua contaminada con coagualante
5	Tonel de descarga Sedimentación de tinta
6	Agua clarificada hacia planta Wetland

Fuente: elaboración propia, Planta de impresión en papel.

Apéndice 5. **Esquema de proceso de adición de coagulante y ayuda de floculación**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Ficha técnica de tinta flexográfica**

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO							
Nombre del producto	Tinta flexográfica						
Nombre comercial	GCMI/ Pantone/ especificación cliente						
Sinónimos	N.A						
Uso del producto	Tinta diseñada para la impresión en la industria del papel, cartón, corrugado y las artes gráficas. Su uso es industrial y debe ser manejada por técnicos capacitados apropiadamente según las normas de higiene y seguridad industrial correspondientes.						
INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES PELIGROSOS							
Componente	No. CAS	Contenido	ACGIH		OSHA		Unidades
			TWA	STEL	TWA	STEL	
Amina	141- 43 - 5	0.04 - 0.20 %	3	N.D	6	N.D	ppm
Hidróxido de amonio acuoso	1336-21-6	0.1 - 0.3 %	25	35	25	35	ppm
Mezcla pigmentos orgánicos	mezcla	12 -52 %	N.D	N.D	15	N.D	ppm
Alcohol Isopropílico	67-63-0	0.1 - 0.5 %	400	500	N.D	N.D	ppm
PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS							
Punto de ebullición	90 -100 °C		Solubilidad en H2O		Soluble		
Punto de inflamación	N.A		Estado físico		Líquido		
Densidad (g/cm3)	1.1 -1.5		Olor		Irritante		
Presión de vapor a 20°C	N.D		Color		Según tono		
Punto de fusión	N.A		pH		9.0 - 9.2		
Temperatura ignición	N.A		Solidos		40 – 55 %		

Continuación del apéndice 6.

RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN	
Medio de extinción	Polvo químico seco, CO ₂ , espuma
Equipo de protección en caso de incendio	Equipo de respiración autónoma
Procedimiento en caso de incendio	Usar rocío de agua para enfriar contenedores
Condiciones que conducen a riesgos especiales	Se generan vapores amoniacales
Productos nocivos de la combustión	Monóxido y bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y gases tóxicos e irritantes
DATOS DE REACTIVIDAD	
Estabilidad	A condiciones ambientales
Inestabilidad	Se degrada a altas temperaturas y en presencia de ácidos fuertes
Incompatibilidad	Agentes oxidantes fuertes y ácidos
Productos peligrosos de descomposición	No hay
Polimerización espontánea	No
Condiciones a evitar	Ninguna
PROPIEDADES TOXICOLÓGICAS	
Contacto con ojos	Lavar con abundante agua durante 15 minutos como mínimo
Contacto con piel	Para ciertas personas puede ser irritante. Lavar con agua y jabón.
Inhalación	Olor irritante, en exposiciones prolongadas algunas personas pueden sufrir náuseas
Ingestión	Beber dos vasos de agua e inducir vómito, requiere atención médica
Carcinogénica	No contiene
Mutagénica	No contiene
Teratogénica	No contiene
Información complementaria	
Nombre químico	LD50 oral (rata) LD 50 dérmica (conejo) Inhalación LC50 (rata)
PROPIEDADES TOXICOLÓGICAS	
Absorber el material derramado con algún material inerte (p.e arena o tierra seca) y depositar en un contenedor para residuos químicos.	

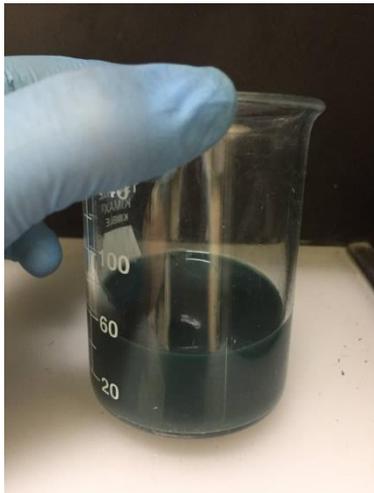
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Toma de muestras de agua contaminada con tinta**



Fuente: elaboración propia, Planta Sacos del Atlántico.

Apéndice 8. **Muestras de agua contaminada con tinta**



Fuente: elaboración propia, Planta Sacos del Atlántico.

Apéndice 9. Balanza analítica utilizada



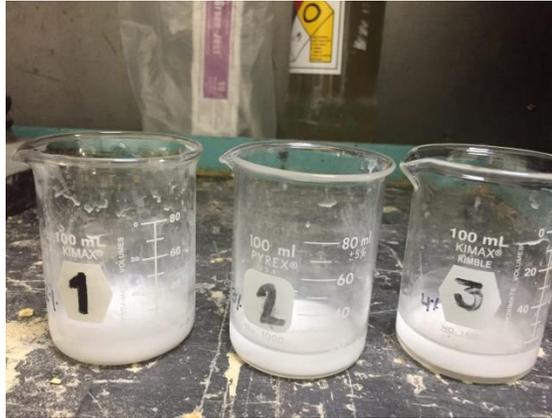
Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 10. Preparación lechada de cal



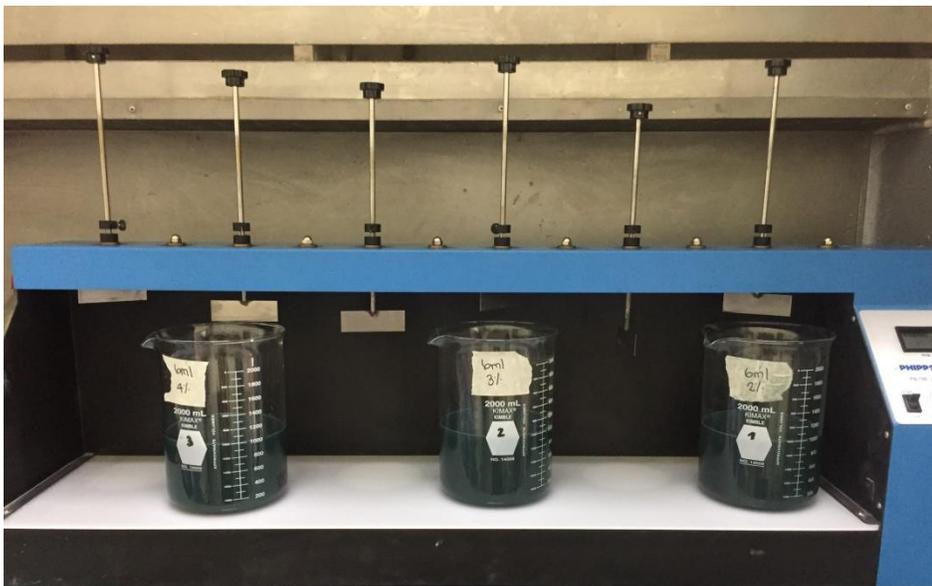
Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 11. **Lechada de hidróxido de calcio a distintos porcentajes**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 12. **Prueba de jarras**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 13. **Equipo de sedimentación**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 14. **Medición de pH**



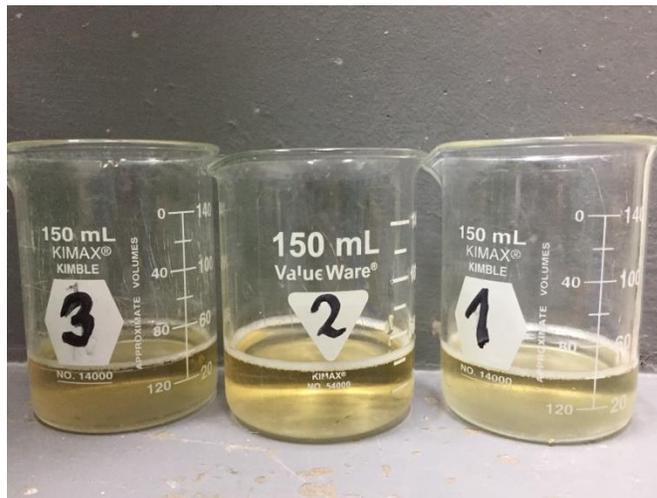
Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 15. Espectrofotómetro



Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Apéndice 16. Muestras de agua clarificada



Fuente: elaboración propia, Laboratorio CETEC, Planta La Pedrera, Cementos Progreso.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica policloruro de aluminio [Al₂(OH)₃Cl₃]

Sección 1. Identificación del producto y de la compañía		
Nombre comercial	: SKYFLOC AN.1	
Uso del producto	: Aditivo	
Proveedor	: Ecolab Inc. Water Care Division 370 N. Wabasha Street St. Paul, MN 55102 1-800-75-WATER	
Código	: 911319-02	
Fecha de emisión	: 11-Mayo-2011	
Información de salud en caso de emergencia: 1-800-328-0026 Exterior Estados Unidos y Canadá LLAMAR 1-651-222-5352 (en los EE.UU.)		
Sección 2. Composición e información sobre los ingredientes		
<u>Nombre</u>	<u>Número CAS</u>	<u>% en peso</u>
2-propenoic acid, sodium salt, polymer with 2-propenamide	25085-02-3	>50
urea	57-13-6	5 - 20
Sección 3. Identificación de los riesgos		
Estado físico	: Sólido. (Polvo.)	
Visión general de la	: ATENCIÓN!	
Emergencia	: PUEDE CAUSAR IRRITACIÓN OCULAR Y EPITELIAL. Evite el contacto con la piel y la ropa. Lávese completamente después del manejo.	
<u>Efectos agudos potenciales en la salud</u>		
Ojos Piel	: Moderadamente irritante para los ojos.	
Inhalación	: Moderadamente irritante para la piel.	
Ingestión	: No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.	
	: No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.	
Vea la sección 11 para la Información Toxicológica		
Sección 4. Primeros auxilios		
Contacto con los ojos	: En caso de contacto, lávese de inmediato los ojos con agua fría corriente. Qútese los lentes de contacto y continúe lavándose con abundante agua durante 15 minutos por lo menos . Obtenga atención médica si persiste la irritación.	
Contacto con la piel	: Lavar con agua y jabón. Obtenga atención médica si se produce irritación. Lavar la ropa antes de volver a usarla.	
Inhalación	: Si ha habido inhalación, trasladar al aire libre.	
Ingestión	: No inducir al vómito a menos que lo indique expresamente el personal médico. No suministrar nada por vía oral a una persona inconsciente. Si se han ingerido grandes cantidades de este material, llame a un médico inmediatamente.	

Continuación del anexo 1.

Sección 5. Medidas de extinción de incendios

Punto de Inflamación : > 100°C

El producto no alimenta a la reacción de combustión

Métodos anti-incendios e instrucciones: Use un agente de extinción adecuado para incendios circundantes.

Contenga con un dique el área del incendio para prevenir que el producto rebose. No hay peligro específico.

Equipo de protección especial para los bomberos: Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

Sección 6. Medidas a tomar en el transcurso de derrames accidentales

Precauciones personales : Ventile el área de fugas o derrames. No toque los recipientes dañados o el material derramado a menos que esté usando el equipo de protección adecuado (Sección 8). Detener la fuga si esto no presenta ningún riesgo. Evite la entrada en alcantarillas, canales de agua, sótanos o áreas reducidas.

Precauciones ambientales : Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, los canales, los desagües y las alcantarillas.

Métodos para limpieza : Si el personal de emergencia no está disponible vacíe o levante con una pala los materiales derramados y colóquelos en un envase apropiado para desecho. Evite crear polvo e impida la dispersión causada por el viento.

Sección 7. Manejo y almacenaje

Manipulación : Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Lávese completamente después del manejo.

Almacenamiento : Manténgase fuera del alcance de los niños. Manténgase el recipiente bien cerrado. Mantener el contenedor en un área fresca y bien ventilada.
Almacenar entre -10 y 50°C

Sección 8. Controles de exposición/protección personal

Controles de ingeniería : Utilizar medios para encerrar el proceso, sistemas localizados de desfogue de ventilación u otros procedimientos de ingeniería para conservar el nivel de partículas en el aire por debajo de los límites de exposición recomendados. Si el uso del producto genera polvo, vapores o niebla, utilizar una ventilación adecuada para conservar la cantidad de contaminantes aerotransportados bajo el límite de exposición permitida.

Protección personal

Ojos : Protección de los ojos es recomendada.

Manos : En caso de manipulación prolongada o reiterada, utilizar Guantes impermeables.

Piel : No se necesita equipo protector bajo condiciones normales de uso.

Respiratoria : No se necesita equipo protector bajo condiciones normales de uso.

Nombre : Límites de exposición /m³ 8 hora(s). Estado: All forms
urea : AIHA WEEL (Estados Unidos, 1/2004).

Continuación del anexo 1.

Sección 9. Propiedades físicas y químicas					
Estado físico	:	Sólido. (Polvo.)			
Color	:	Blanco hueso.			
Olor	:	Inodoro.			
pH	:	7 (1%)			
Propiedades de dispersión	:	Parcialmente disperso en agua fría, agua caliente.			
Solubilidad	:	Parcialmente soluble en agua fría, agua caliente.			
Sección 10. Datos sobre la estabilidad y la reactividad					
Estabilidad	:	El producto es estable.			
Sección 11. Información toxicológica					
<u>Efectos agudos potenciales en la salud</u>					
Ojos Piel	:	Moderadamente irritante para los ojos.			
Inhalación	:	Moderadamente irritante para la piel.			
Ingestión	:	No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.			
	:	No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.			
<u>Efectos crónicos potenciales en la salud</u>					
Efectos crónicos en los humanos	:	Contiene material dañino para los siguientes órganos: piel, ojo, cristalino o córnea.			
Sección 12. Información sobre la ecología					
Productos de degradación	:	Estos productos son óxidos de carbono (CO, CO ₂) y agua., óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ ...). Algunos óxidos metálicos.			
Sección 13. Consideraciones en el momento de la eliminación					
Eliminación de los desechos	:	Se debe evitar o minimizar la generación de desechos cuando sea posible. Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, los canales, los desagües y las alcantarillas. La eliminación de este producto, sus soluciones y cualquier derivado deben cumplir siempre con los requisitos de la legislación de protección del ambiente y disposición de desechos y todos los requisitos de las autoridades locales.			
Consultar a las autoridades locales o regionales.					
Sección 14. Información sobre el transporte					
Información reglamentaria	Número ONU	Nombre de envío adecuado	Clase	Grupo de embalaje	Información adicional
Clasificación DOT	No regulado.	-	-	-	-

Fuente: Jarsa Guatemala. *Innovando la química con excelencia*. Consultado el 10 de junio de 2020. Recuperado de <http://www.grupojarsa.net/>.

Anexo 2. Ficha técnica, adhesivo epóxico

	<h1>Hoja de Datos de Seguridad</h1> <p>NOMBRE DEL MATERIAL: ADHESIVO CORAGUM® PLUS BOM 936</p> <h2>Ingredion México, S.A. de C.V.</h2> <p>Fecha de emisión HDS: Noviembre, 2017 Revisión: 1.0</p>
1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA	
1.1 Identificación del producto	
Nombre comercial	Adhesivo CORAGUM® PLUS BOM 936
Nombre químico	Adhesivo pregal
Número CAS	No disponible
Categoría química	Adhesivo
Sinónimos	No aplica
1.2 Uso recomendado del producto	
Este producto se recomienda para uso industrial. <i>Nota: Es importante consultar las especificaciones técnicas del producto para su adecuada aplicación.</i>	
1.3 Identificación de compañía responsable	
Fabricante/ Proveedor	Ingredion México, S.A. de C.V. Av. Martano Otero #1249, Torre Atlántico P9 Col. Rinconada del Bosque. CP. 44530 Guadalajara, Jalisco, México Teléfono de emergencia: 01-800-681-9531 (CHEMTREC) +1-703-741-5970 (Global CHEMTREC)
2. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	
2.1 Clasificación:	
Por lo general, no representa ningún riesgo a la salud, de acuerdo a la NOM-018-STPS-2015 y la GHS, sin embargo, puede causar irritación en ojos, piel y vías respiratorias. De acuerdo al párrafo (d) de las 29 CFR 1910.1200, es considerado como polvo combustible.	
2.2 Elementos de la etiqueta GHS	
Símbolo (s):	No es necesario según criterios de clasificación.
Palabra de Atención:	¡PRECAUCIÓN!
Indicación de Riesgo:	Polvo combustible: Formación de nube de polvo de la sustancia puede dar lugar a atmósferas explosivas. Contacto con ojos y piel: Puede provocar irritación. Inhalación: Puede causar irritación. Ingestión: Puede causar incomodidad gastrointestinal.
Almacenamiento:	Mantener los envases/contenedores cerrados, en ambientes con ventilación y a temperatura ambiente. Evitar contacto directo con luz solar y otras fuentes de calor.
Disposición:	Eliminar el envase/restos de acuerdo a la legislación local, estatal o

Continuación del anexo 2.

Hoja de Seguridad – Adhesivo CORAGUM® PLUS BOM 936

3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN DE COMPONENTES

Sustancia:			
Nombre Químico Adhesivo pregal	Identidad Química Adhesivo	No. CAS No disponible	% en peso 100

4. PRIMEROS AUXILIOS

4.1 Descripción de primeros auxilios

Contacto con los ojos: En caso de posible irritación. Lavar inmediatamente con abundante agua por al menos 15 minutos. Levantar ocasionalmente los párpados inferior y superior.

Contacto con la piel: En caso de posible irritación. Lavar área afectada con agua y jabón. Retirar ropa y zapatos contaminados con dicha sustancia y lavarlos antes de utilizar nuevamente.

Inhalación: En caso de posible irritación o respiración de grandes cantidades, trasladarse a un lugar con aire fresco disponible. Si se dificulta la respiración, proporcionar oxígeno autónomo.

Ingestión: En caso de haber ingerido un exceso o si existe irritación. No inducir al vómito. En caso de persona inconsciente, no administrar nada vía oral.

Nota: En caso de persistencia de molestias, recibir atención médica inmediata y, en su caso, tratamiento especial.

4.2 Síntomas/efectos agudos o retardados

Este producto no presenta algún riesgo a nivel general, sin embargo, podría ocasionar efectos como reacciones de irritación en casos de respuesta alérgica.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS

5.1 Medios de extinción

Extintor de Polvo Químico Seco (PQS), espuma, neblina de agua, dióxido de carbono.

5.2 Peligros específicos del producto

Riesgo de fuego o explosión:
El polvo de este producto puede causar explosión y emitir gases tóxicos si es encendido por cargas estáticas u otra fuente de ignición. Las condiciones bajo las cuales esto puede ocurrir son: concentración en suspensión con aire, punto de ignición, tamaño de partícula y humedad del polvo. Evite usar este producto con flamas, arcos eléctricos, electricidad estática y/o soldadura. Asegúrese de tener el equipo de manipulación conectado a tierra. Siempre mantenga limpia el área, evitando formación de películas de polvo.

Fuente: Ingredion México. *Conoce a Ingredion*. Consultado el 16 de junio de 2020. Recuperado de <https://www.ingredion.com/na/es-mx/compania.html>.

