

---

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN  
DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
AREA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN  
DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

AUTOR: Pérez Adelson  
C.I. 18.612.909

Valencia, Junio de 2018



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
AREA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN  
DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

**Aprobado por la Comisión Coordinadora del Programa de Ingeniería de  
Procesos**

Prof. Carlos Hernández  
Coordinador del Programa

Prof. Olga Martínez

Prof. Alberto Mieres Pitre

Valencia, Junio de 2018



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN DE POSTGRADO  
SECCIÓN DE GRADO



## ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO

En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:

***“EVALUACION DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE  
POLIMERIZACION DEL POLICLORURO DE ALUMINIO  
COMO COAGULANTE PRIMARIO EN EL TRATAMIENTO  
DE AGUA”***

Presentado para optar al grado de ***MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PROCESOS*** por el (la) aspirante:

***ADELSON PEREZ CALDERA***  
***V.- 18.612.909***

Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO**.

En Valencia, a los seis (06) día del mes de Marzo del año dos mil dieciocho.

Prof. Carlos Hernández

C.I.: 23.874.000

Fecha: 06/03/2018



Prof. Carlos Mieres  
C.I.: 3.306.841  
Fecha: 06/03/2018  
FE: 06/03/2018 al-

Prof. Ángel Almarza  
C.I.: 15.977.457  
Fecha: 06/03/2018

UNIVERSIDAD DE CARABOBO / DIRECCION DE POSTGRADO



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
AREA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



APROBACION DEL JURADO EXAMINADOR DEL INFORME

Señor Coordinador de la Maestría de Ingeniería de procesos químicos, mediante la presente comunicación hacemos de su conocimiento que hemos evaluado el trabajo de investigación presentado por el ciudadano Adelson David Pérez Caldera, el cual lleva por título:

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN  
DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

Así mismo le hacemos saber que el Informe Presentado fue:

Aprobado \_\_\_\_\_ Reprobado: \_\_\_\_\_

***JURADOS EXAMINADORES***

- 1). \_\_\_\_\_ de C.I: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_
- 2). \_\_\_\_\_ de C.I: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_
- 3). \_\_\_\_\_ de C.I: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Valencia, Junio de 2018

## ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
Capítulo I El problema de investigación	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2. Formulación del Problema	6
1.3. Objetivos de la Investigación	6
1.4. Justificación	7
1.5. Alcance	8
Capítulo II Marco teórico	9
2.1. Antecedentes	9
2.2.1 Generalidades del agua	14
2.2.2. Generalidades del policloruro de aluminio	18
2.2.3 Pruebas de jarra	22
2.2.4 Análisis estadístico	24
2.2.5. Normas nacionales e internacionales sobre el agua	25
Capítulo III Marco metodológico	27
3.1. Tipo de estudio y de investigación	27
3.2. Diseño de la investigación	28
3.2.1. Diagnostico de la situación actual del proceso de producción del policloruro de aluminio.	28
3.2.2. Caracterización de las propiedades físicas químicas del policloruro de aluminio a diferentes grados de polimerización.	29
3.2.3. Análisis de la influencia del grado de polimerización en la efectividad del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua.	32
3.2.4. Determinación los beneficios económicos de la reducción del tiempo de producción del PACl en relación a la eficiencia técnica del producto y su grado de polimerización.	35
3.3 Población y muestra	36

Capítulo IV Análisis y discusión de resultados	38
4.1 Resultados	38
Conclusiones	70
Recomendaciones	71
Bibliografía	72
Apéndices	77
Apéndice A: Especificaciones de las materia prima y producto	78
Apéndice B: Cálculos típicos	86
Apéndice C: Tablas de datos	93

## Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 2.1 Se representan algunas de las diferentes especies mono y polinucleares descritas, así como sus propiedades.	22
Tabla 2.2 Índice de floculación de Willcomb.	24
Tabla 2.3. Componentes relativos de la calidad organoléptica del agua potable.	26
Tabla 4.1 Contenido de pureza del aluminio.	39
Tabla 4.2 Porcentaje de dureza del agua de planta Hessa Chemical C.A	40
Tabla 4.3. Propiedades fisicoquímicas del ácido clorhídrico.	40
Tabla 4.4. Gravedad específica del PACl en función del tiempo de fabricación.	43
Tabla 4.5 Porcentaje de cloruro.	45
Tabla 4.6 Porcentaje de óxido de aluminio.	46
Tabla 4.7 Porcentaje de ingrediente activo.	47
Tabla 4.8 Porcentaje de aluminio ( $Al^{+3}$ ).	49
Tabla 4.9 Determinación de la relación atómica.	50
Tabla 4.10 Porcentaje de OH.	51
Tabla 4.11 Basicidad del policloruro de aluminio.	51
Tabla 4.12 Relación (OH/Al) en función de las horas de proceso.	52
Tabla 4.13 pH del policloruro de aluminio.	54
Tabla 4.14 Contenido de Hierro.	55
Tabla 4.15 Turbidez del Policloruro de Aluminio.	57
Tabla 4.16 Comparación de los parámetros del agua problema Vs los parámetros establecidos por la Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (1998).	58
Tabla 4.17 Diseño factorial $2^k$ .	62
Tabla 4.18 Normalidad de los residuos.	63
Tabla 4.19 Homogeneidad de las varianzas.	64
Tabla 4.20 Análisis de las medias.	64
Tabla 4.21 Comparación de las diferencias significativas del grado de	65

polimerización del PACl (prueba Tukey).	
Tabla.4.22 Relación costos beneficios situación actual.	68
Tabla 4.23 Relación costos beneficios situación futura.	69
Tabla C1 Medición de las gravedades específicas de los lotes en estudio.	93
Tabla C2 Determinación de los porcentajes de cloruro de los lotes en estudio.	93
Tabla C3 Determinación de los porcentajes de dióxido de aluminio de los lotes en estudio.	94
Tabla C4 Determinación de los porcentajes de ingrediente activo de los lotes en estudio.	94
Tabla C5 Determinación de los porcentajes de aluminio de los lotes en estudio.	95
Tabla C6 Determinación de las relaciones atómicas de los lotes en estudio.	95
Tabla C7 Contenido de hierro de los lotes en estudio.	96
Tabla C8 Determinación de los porcentajes OH de los lotes en estudio.	96
Tabla C9 Determinación de las basicidades de los lotes en estudio.	97
Tabla C10 Relación r Vs horas de Proceso de los lotes en estudio.	97
Tabla C11 Potencial de Hidrogeniones (pH) de los lotes en estudio.	98
Tabla C12 Prueba de Jarreas del PACl a las 12 horas de proceso.	99
Tabla C13 Prueba de Jarreas del PACl a las 24 horas de proceso.	100
Tabla C14 Prueba de Jarreas del PACl a las 36 horas de proceso.	101
Tabla C15 Prueba de Jarreas del PACl a las 48 horas de proceso.	102
Tabla C16 Prueba de Jarreas del PACl a las 60 horas de proceso.	103
Tabla C17 Prueba de Jarreas del PACl a las 72 horas de proceso.	104

## Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1.1 Reactor batch, proceso de fabricación de policloruro de aluminio.	5
Figura 2.1 Reacciones de polimerización de las sales de aluminio: olación y oxolación.	21
Figura 2.2 Distribución de las diferentes especies de Al en función de $r=(OH/Al)$ .	21
Figura 2.3 Equipo de jarra de 6 puestos, RPM de 10-100, con base iluminada (Fisher 15- 443-50 y 15-443-55).	23
Figura 4.1 Forma geométrica de los lingotes de aluminio.	41
Figura 4.2 Combinación del $Al^{+3}$ en el proceso de desestabilización una partícula coloidal.	49
Figura 4.3 Comparación de las curvas del ion OH y la basicidad.	53
Figura 4.4 Grado de polimerización del PACl según la relación OH/Al.	53
Figura 4.5 pH del policloruro Vs tiempo de fabricación del PACl.	54
Figura 4.6 Contenido de hierro Vs tiempo de fabricación del PACl.	56
Figura 4.7 Turbidez Vs tiempo de fabricación del PACl.	58
Figura 4.8 Porcentaje de remoción de turbidez y color Vs dosis de PACl a las 12 horas de proceso.	59
Figura 4.9 Porcentaje de remoción del y color Vs dosis de PACl.	60
Figura 4.10 Distribución de la normalidad de los residuos.	63
Figura 4.11 Diferencia de las medias para el porcentaj de la remoción de acuerdo al grado de polimerización.	66
Figura 4.12 Diferencia de las medias para el porcentaje de remoción contra dosis del PACl.	66
Figura 4.13 Interacción entre los factores y el porcentje d remoción de l turbiedad.	67
Figura A1 Especificación del Acido Clorhídrico.	78
Figura A2 Certificado de análisis del Ácido Clorhídrico	79

Figura A3 Reporte del análisis de laboratorio del Acido Clorhídrico.	80
Figura A4 Especificaciones del porcentaje de pureza del Aluminio.	81
Figura A5 Especificaciones de la dureza del Agua.	82
Figura A6 Registro de Control de Dureza del Agua de Producción.	83
Figura A7 Especificaciones comerciales del PACl .	84
Figura A8 Certificado de Análisis químico de policloruro de aluminio .	85

## Lista de Símbolos

(%) = porcentaje

r = relación

< = menor que

> = mayor que

$\leq$  = menor o igual que

$\mu$  = miu

$\pm$  = masa o menos

$\Delta H_f$  = delta de entalpia de formación

$\Delta S$  = delta de entropía

$\Delta$  = delta

## **DEDICATORIA**

“... Este proyecto se lo quiero dedicar a mi Dios Todo Poderoso, quien me regaló la oportunidad de ver la luz de la vida a través de seres hermosos como mis padres Dalia e Iván, a mi compañera de vida mi esposa Danaize, a hermanos y familiares los cuales día a día me apoyaron para finalizar con éxito ésta etapa de mi vida. Con el más grande sentimiento de amor se lo dedico a ustedes...”

## **RECONOCIMIENTOS**

A Dios, a mis padres, mi esposa, hermanos y a toda mi familia por estar conmigo siempre en las buenas y en las malas, por servirme de guía en estos años de desarrollo para así convertirme en la persona y el profesional que hoy soy, gracias por su amor y comprensión.

Al Ing. Carlos Hernández y a todos los profesores que me han dado sus enseñanzas y conocimientos.

A la Universidad de Carabobo por servirme de casa de estudios en la cual pude desarrollarme profesionalmente.

A la empresa Hessa Chemical C.A, por darme la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos en sus instalaciones.

Al personal que labora en la Hessa Chemical C.A, por su paciencia y enseñanzas.

A todas y cada una de las personas que han pasado por mi vida, amigos, compañeros de clase que me han apoyado siempre a lo largo de mi carrera universitaria.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
AREA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



## EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE POLIMERIZACION DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

**Autor:** Ing. Adelson D. Pérez C.

**Tutor Académico:** Msc. Ing. Carlos Hernández

**Fecha:** Junio, 2018

### RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones de Hessa Chemical C.A, el mismo está basado en el policloruro de aluminio (PACl), el cual es un coagulante utilizado en el tratamiento de agua, tuvo como objetivo principal evaluar la influencia del grado de polimerización del PACl, con la finalidad de valorar, como se ve afectada la remoción de partículas en suspensión que se encuentran en el agua al añadir PACl a diferentes grados de polimerización, partiendo de un diagnóstico de la situación actual del proceso de fabricación del PACl, de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del mismo en diferentes etapas del proceso, de realizar pruebas de jarras para determinar la dosis óptima y de determinar la relación costo-beneficios de acuerdo a la reducción del tiempo de fabricación del PACl, basado en fundamentos teóricos que sustentan la investigación. La metodología utilizada para este estudio, consistió en un tipo de investigación experimental, ya que el mismo está apoyado en un diseño experimental de campo, de tipo descriptivo, lo que permitió la ejecución de los procedimientos descritos en la ANSI/AWWA B408-98 y de cada una de las fases que contemplan el trabajo de investigación. Entre las conclusiones más resaltantes se encuentra, que de acuerdo a un análisis ANOVA, realizado para determinar la variación de las medias de la turbiedad, el grado de polimerización del PACl si influye sobre la coagulación de partículas coloidales en el proceso de tratamiento de agua, llegando al resultado, de que la reducción del tiempo de fabricación de PACl a través del ajustes de los parámetros fisicoquímicos del mismo, aumentarían la relación de costos beneficios para la organización de 1.50 a 1.67. Por último se propone desarrollar e investigar nuevas aplicaciones del PACl en diversas industrias.

**Palabras claves:** Policloruro de aluminio, Coagulación, Polimerización.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
AREA DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



## EVALUATION OF INFLUENCE OF THE DREGREE OF POLYMERIZATION OF ALUMINUM POLYCHLORIDE AS A PRIMARY COAGULANT IN WATER TREATMENT

**Autor:** Ing. Adelson D. Pérez C.

**Tutor Académico:** Msc. Ing. Carlos Hernández

**Fecha:** Junio, 2018

### Abstract

The present research work was carried out in the facilities of Hessa Chemical C.A, manufacturer for excellence of the Polychloride of aluminum (PACl), which is a coagulant used in water treatment. The main objective was to evaluate about influence of the degree of polymerization of the PACl, with the purpose of assessing, how suspended particles found in the water was affected by adding PACl to different degrees of polymerization starting from a diagnosis of the current situation of the manufacturing process of the PACl, of the characterization of the physicochemical properties of the same in different stages of the process, by performing 'jar test', to determine the optimal dose and determine the cost-benefit ratio, according to the reduction of the manufacturing time of the PACl, based on theoretical foundations that support research.

The methodology used for this study consisted of a type of experimental research, which is supported by an experimental field design, of a descriptive nature, which allowed the execution of the procedures described in ANSI / AWWA B408-98 and each one of the phases that contemplate the research work.

Among the most important conclusions is the ANOVA analysis, carried out to determine the variation of the turbidity averages, where the degree of polymerization of the PACl influences the coagulation of colloidal particles in the water treatment process, reaching as a result the reduction of the time of manufacture of PACl, through the adjustments of the physical-chemical parameters, increases the cost-benefit ratio for the organization from 1.50 to 1.67. Finally, it is proposed to develop and investigate new applications of PACl in various industries.

**Key words:** Aluminum polychloride, Coagulation, Polymerization

## Introducción

El policloruro de aluminio (PACl) es un polímero inorgánico, que se utiliza como coagulante en el tratamiento de agua para remover sólidos en suspensión y partículas orgánicas, también es utilizado en la industria de papel, textil, cosméticos, petróleo, entre otras; en los últimos años el policloruro de aluminio, ha sido uno de los coagulantes con mayor uso a nivel mundial, ya que no deja residuo de aluminio en el agua tratada, mejorando ciertas características de la misma para que pueda ser de calidad y apta para el consumo humano.

El policloruro de aluminio puede ser fabricado con varias tecnologías, en el presente estudio se produce a partir de aluminio en forma de lingotes de alta pureza y ácido clorhídrico en medio acuoso, obteniendo un líquido ámbar o ligeramente amarillento, destacando que las propiedades fisicoquímicas del mismo pueden variar considerablemente de acuerdo al proceso de producción empleado, por tanto el policloruro de aluminio esta caracterizado por la formula  $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}H_2O$  donde  $0 < m < 3 < n$ .

El grado de polimerización del policloruro de aluminio es una función de la relación  $(OH^-/ Al^+)$ , lo indica la presencia de especies solubles monoméricas y poliméricas, así como de precipitados, estas especies mencionadas anteriormente se van formando durante el progreso de la reacción, por lo tanto al igual que otras propiedades fisicoquímicas del PACl deben ser monitoreadas, para obtener un policloruro de alta calidad, evaluando su eficiencia en la remoción de partículas coloidales presentes en el agua, a través de pruebas de jarras.

Desde esta perspectiva se realizó un estudio de investigación para evaluar las propiedades fisicoquímicas del PACl variando su grado de polimerización y determinando su eficiencia como coagulante primario en el proceso de tratamiento y clarificación de agua, través de una simulación en prueba de jarras valorando el porcentaje de remoción de partículas coloidales presentes, este estudio se realizó en las instalaciones de la empresa Hessa Chemical ubicada en Mariara estado Carabobo.

Dicho estudio está desarrollado a partir seis (4) capítulos en relación a la evaluación de la influencia del grado de polimerización en el proceso de remoción o coagulación de partículas coloidales presentes en el agua:

En el capítulo I se describe el problema de investigación al que debe proponerse una solución; a través de la formulación de objetivos, en el capítulo II se refleja la investigación documental realizada para el diseño del proyecto, el capítulo III describe los métodos, instrumentos y procedimientos utilizados para la realización del proyecto de investigación, en capítulo IV se expresan los resultados obtenidos tras la aplicación de las herramientas y métodos utilizados en la investigación, por último en las conclusiones y recomendaciones se incluye un análisis reflexivo del autor sobre la ejecución del proyecto y los fenómenos observados, además se plantea recomendaciones a la empresa, relacionadas al área de ejecución del proyecto, a fin de que se constituyan en temas de consideración futuros.

La importancia de esta investigación radica en que al obtener un PACI con un alto grado de eficiencia como coagulante a menor costo, se podrá mejorar el rendimiento de las materias primas, disminuir los tiempos de reacción, además de ello servirá para obtener datos experimentales del contenido de aluminio en función del tiempo y disminuir el aluminio residual en el proceso de coagulación de agua el cual con lleva a minimizar los riesgo a la salud y cuidado al medio ambiente.

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la presente etapa de la investigación se describe de forma detallada el planteamiento del problema, su justificación y los objetivos puntuales que rigen el desarrollo de este trabajo.

#### **1.1 Planteamiento del Problema**

El agua es un recurso natural inigualable que ha servido de plataforma fundamental para el desarrollo de muchas civilizaciones durante millones de años, a pesar que esta se obtiene de fuentes naturales en muchas ocasiones debe ser tratada fisicoquímicamente, eliminando o mejorando ciertas características de la misma para que pueda ser de calidad y apta para el consumo humano tal como lo establece la resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas (28 de julio de 2010), es por ello que para disminuir las sustancias solidas y coloidales se ha optado, por el Policloruro de Aluminio (PACl) que según la norma ANSI/AWWA B408-98 es un coagulante de polímeros inorgánicos utilizado a nivel mundial para el tratamiento de agua en la etapa de clarificación.

Según Stumm (1992), deduce que "el tratamiento de agua puede subdividirse en cuatro etapas: clarificación, desinfección, acondicionamiento químico y organoléptico; por consiguiente en los últimos años el uso del policloruro de aluminio (PACl) se ha ido incrementando debido a su mejor desempeño", es por ello que la

demanda del PACl ha ido aumentando vertiginosamente al igual que su utilidad en las diferentes industrias tales como la industria de cosmético, papel e hidrocarburos, obligando hacer los procesos productivos del mismo cada vez más eficientes, para satisfacer las necesidades y sobrepasar las expectativas de los usuarios.

Por consiguiente Yan, Wang, Qu y Chow (2007) menciona que se "ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados como el PACl, el cual se comporta diferente a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características químicas". Existen diferentes modelos para describir la distribución de las especies generadas en las reacciones de sales de aluminio en soluciones acuosas, los métodos potenciométricos parecen indicar la presencia de especies solubles monoméricas y poliméricas, así como precipitados por consiguiente Baes y Mesmer (1976) consideran las siguientes especies:

Monómeros:  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{Al}(\text{OH})_4^+$

Polímeros:  $\text{Al}_2(\text{OH})^{24+}$ ,  $\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$

Precipitado:  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$

El procesos de fabricación del PACl utiliza aluminio con un alto grado de pureza (98% de pureza), ácido clorhídrico (32% p/p) y agua suavizada como materia prima, la reacción se lleva a cabo en un reactor tipo batch de fibra de vidrio, la misma es exotérmica a presión atmosférica, ésta es controlada a través de la temperatura, la gravedad específica y el porcentaje de cloruro, la toma de muestra que se realiza a las primeras 12 horas y luego cada 6 horas hasta llegar a un policloruro de aluminio comercial de alta concentración, lo que se traduce en cerca de 72 horas de reacción, para posteriormente despacharlo como producto final y este ser diluido finalmente en las diferentes plantas de tratamientos. En la figura 1.1 se muestra un reactor tipo batch.

En la actualidad el tratamiento de agua de las plantas hidrológicas del país ha avanzado hacia el uso progresivo de policloruro de aluminio de alta concentración, por sus beneficios comprobados en cuanto a remoción de impurezas, sin embargo, el proceso de producción del PACl suele resultar bastante lento, dado que se requiere

llegar a altas concentraciones o un alto grado de polimerización. Es así que el tiempo de reacción es un factor importante en el proceso de producción, por ello esta variable influye de manera directa en los costos de producción y en la entrega oportuna al mercado, este producto es fabricado en la empresa Hessa Chemical ubicada en Mariara, municipio Diego Ibarra en el estado Carabobo.

Dentro de este marco el propósito de esta investigación se basa en analizar cómo influye el grado de polimerización, a través de la relación  $\text{OH}^-/\text{Al}^+$  en la coagulación de partículas coloidales y evaluar las condiciones de operación que conlleven a un proceso de producción más rápido, logrando de igual manera un producto con características fisicoquímicas y propiedades coagulantes que sean tan eficientes como las que se tiene en la actualidad.

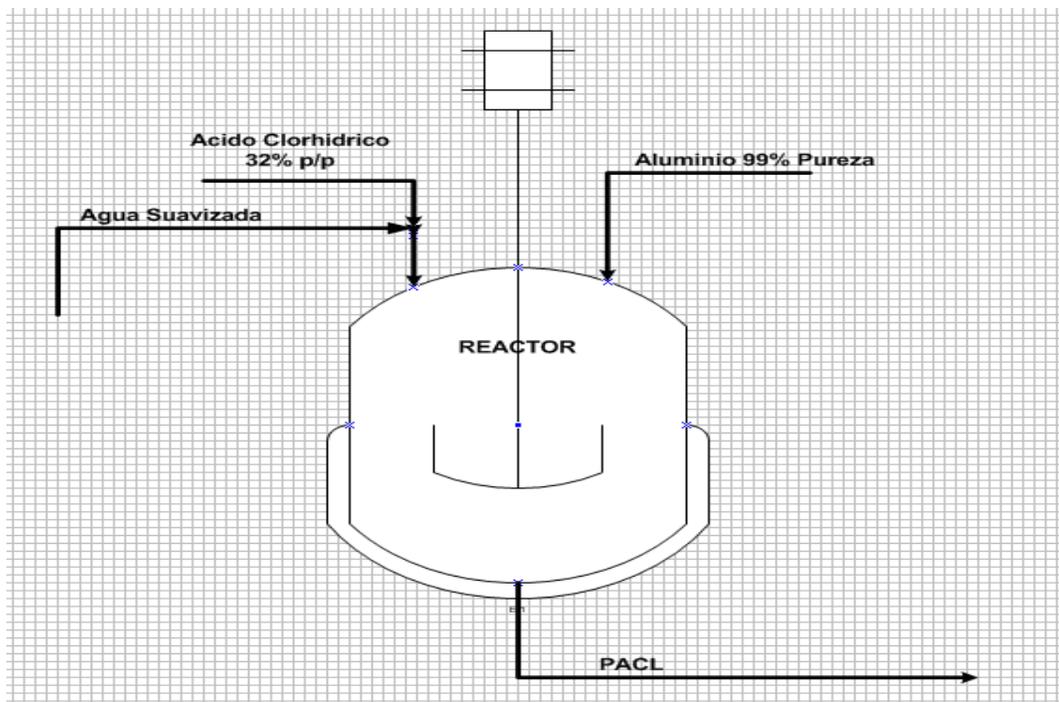


Figura 1.1 Reactor batch, proceso de fabricación de policloruro de aluminio.

**Fuente:** Aguilar, Sáez, Llorens, Soler y Ortuño (2002).

## **1.2 Formulación del Problema**

Debido a que el grado de polimerización afecta las propiedades del polímero y al no disponer de datos experimentales de cómo se ve afectado el proceso de coagulación en el tratamiento de agua por la variabilidad de dicha propiedad, aunado a lo que menciona Pernitsky *et al.* (2006) "...que su mecanismo de coagulación no ha sido estudiado ampliamente", se debe esperar hasta alcanzar un alto grado de concentración o polimerización, lo que genera una gran cantidad de horas de reacción en el proceso de fabricación del mismo, lo que trae como consecuencia el alza de los costos del PACl y la espera prolongada del producto en el mercado, aumentando los gastos operativos asociados al proceso. Por tanto es oportuno plantear la siguiente interrogante ¿Cómo influye el grado de polimerización del policloruro de aluminio en la eficiencia de la coagulación de partículas coloidales en el tratamiento de agua?.

## **1.3 Objetivos de la Investigación**

### 1.3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del grado de polimerización del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual del proceso de fabricación del policloruro de aluminio.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del policloruro de aluminio a diferentes grados de polimerización.
- Analizar la influencia del grado de polimerización del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua.
- Determinar los beneficios económicos de la reducción del tiempo de producción del policloruro de aluminio de acuerdo a la relación eficiencia técnica del producto y grado de polimerización.

#### **1.4 Justificación**

Con base a lo anteriormente planteado, la mejora continua en los procesos industriales van siempre orientados a un manejo cada vez más eficiente de los recursos, para obtener productos de calidad en el menor tiempo posible, asociada a la necesidades del mercado en pro de atender una demanda insatisfecha. Por ende se busca la aplicación de mecanismos que permitan aprovechar al máximo los recursos de manera que los procesos constituyan herramientas cada vez más rentables en un sentido económico y ambientalista.

Cuando no se consideran dentro de los procesos los diferentes desperdicios que pueden generar los sistemas productivos, se hace difícil la evaluación de parámetros fundamentales tales como: el impacto ambiental y el impacto económico que dicha pérdida genere. Por lo tanto, el argumento en el que se basa el presente trabajo de investigación es en analizar como el grado de polimerización influye en las propiedades fisicoquímicas para la actuación del PACI como agente coagulante en el tratamiento de agua para reducir los tiempos de fabricación, manejar una base de datos experimental del mismo, estimar la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo y abastecer el mercado de forma más oportuna.

La implantación de esta propuesta aseguraría el ahorro económico para la empresa con las misma calidad del producto para los clientes, lo que a su vez se traduce en ganancias, ya que se considera hacer más eficiente el proceso de producción reduciendo los tiempos de reacción de acuerdo a la relación costo-beneficio y a la eficiencia que presente el PACI como coagulante a una menor concentración en el tratamiento de agua, lo cual lleva implícito una disminución en la materia prima, menor cantidad de toma de muestras durante el proceso lo que reflejaría una reducción en el gasto de reactivos para los análisis físico químico durante el procesos de producción, el incumplimiento en la frecuencia del muestreo, disponibilidad más rápida del producto en el mercado, uso y manejo más seguro del producto por parte de los clientes.

## **1.5 Alcance**

El desarrollo de esta investigación está enfocado fundamentalmente en evaluar las propiedades fisicoquímicas del PACl variando su grado de polimerización y determinar su eficiencia como coagulante primario en el proceso de tratamiento y clarificación de agua través de una simulación en prueba de jarras valorando el porcentaje de remoción de partículas coloidales presentes en el agua, este estudio se realizó en las instalaciones de la empresa Hessa Chemical ubicada en Mariara estado Carabobo.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

El presente capítulo muestra detalladamente algunos antecedentes de la investigación, tomando en consideración los aportes realizados, también se desarrollan las bases y fundamentos teóricos que sustentan el trabajo, además se incluyen las bases legales y definición de términos básicos.

#### **2.1 Antecedentes**

Con relación al tema de estudio, se encontraron diversos trabajos de investigaciones con fines semejantes a los perseguidos a esta investigación a continuación se refieren las siguientes:

Tolkou y Zouboulis (2015), sintetizaron y caracterizaron coagulantes inorgánicos y compuestos alternativos, como resultado de la incorporación de polisilicatos y sales férricas en la estructura de cloruro de polialuminio (PACl) generalmente aplicada en el proceso de coagulación-floculación (C/F), con el fin de aumentar su eficacia para el tratamiento de agua y aguas residuales. El nuevo producto se llamó cloruro férrico silicato de polialuminio (PSiFAC), se sintetizó en diversas condiciones experimentales y dos métodos de preparación diferentes (de copolimerización, o de polimerización compuesto). Las principales propiedades típicas de los coagulantes preparados fueron examinados: pH, turbidez, conductividad y distribución de las especies de Al (por ejemplo Keggin  $Al_{13}$ ), empleando la técnica ferrón la composición, la estructura y la morfología de los coagulantes compuestos fueron

estudiados en detalle usando la aplicación de técnicas de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los resultados muestran que los nuevos materiales compuestos tienen alto contenido de  $Al_{13}$  (51%). El estudio de los espectros de FT-IR exhiben picos intensivos, entre otros, en alrededor de 1098- 1100 y 831 a 833  $cm^{-1}$ , que se puede atribuir al estiramiento, flexión y vibración de los enlaces Fe-OH-Fe y Al-OH-Al, respectivamente, en el coagulante, lo que indica la existencia de la polimerización.

Las micrografías SEM mostraron estructuras amorfas en la superficie del coagulante compuesto, así como el aferramiento de los cristales en forma de bloque, probablemente debido al NaCl formado. En general, el FTIR y análisis SEM de las diferentes muestras PSiFAC indican que el método de preparación no tiene ningún efecto sobre la estructura y la morfología de las muestras, pero demuestran ciertas diferencias en sus propiedades fisico-químicas.

Esta publicación guarda relación con la presente investigación debido a que el objetivo principal de la misma es aumentar la eficiencia del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua, agregando a la estructura del mismo, compuestos que mejoren sus propiedades fisicoquímicas y hagan al PACl un compuesto químico con mayor rango de trabajo y mayor aplicabilidad en las diferentes industrias.

Hernández *et al.* (2013), realizaron un estudio sobre la clarificación de agua del arroyo el Hueleque de la ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, usando cal, sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio; siendo los dos primeros los más usuales para el tratamiento de aguas residuales y hasta la fecha los más utilizando en las plantas de tratamiento y el segundo es una nueva generación de clarificantes poliméricos; se determinaron parámetros como: pH, temperatura, turbidez, salinidad, sólidos disueltos totales, conductividad, además del oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes fecales.

Para el CaO como coagulante se pudo observar que la menor turbidez fue a una concentración de 3000 ppm y la clarificación aún no es total, el valor registrado es de

9.31 NTU, con un pH de 9.61, temperatura de 26°C, conductividad de 562  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , salinidad de 0.3%, sólidos disueltos totales de 272 ppm. La concentración óptima sobre el agua residual del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  es de 400 ppm, con un pH de 6.99, temperatura de 26 °C, conductividad de 874  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , salinidad de 0.4%, sólidos disueltos totales de 456 ppm, OD de 1.822 ppm,  $\text{DBO}_5$  de 15 ppm, DQO de 33 ppm, 9000 UFC/100 ml de coliformes totales, lo cual demuestra que es un proceso caro.

La concentración de floculación con el  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_25\text{H}_2\text{O}$  es pequeña (1 ppm), eficaz y eficiente, ya que logró remover toda la materia presente en el agua residual obteniéndose una turbidez de 0 NTU en menor tiempo, con pH de 7.24, temperatura de 26 °C, conductividad de 958  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , salinidad de 0.5%, sólidos disueltos totales de 456 ppm, OD de 2.22 ppm,  $\text{DBO}_5$  de 8 ppm, DQO de 18 ppm y 1800 UFC/100 mL de coliformes totales. El CaO presenta muy baja actividad floculante, con una cantidad elevada del mismo. En el caso del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , se pudo observar que su actividad floculante es buena, sin embargo se requieren de cantidades elevadas. Para el  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_25\text{H}_2\text{O}$  mostró tener una actividad floculante muy buena debido a que las cantidades óptimas para su tratamiento son muy bajas.

Se puede concluir que el agua del arroyo Hueleque, muestra que los parámetros de turbidez, pH, salinidad, conductividad, SDT, OD,  $\text{DBO}_5$ , DQO, coliformes totales y coliformes fecales del agua residual, no presentaron la misma eficiencia para la cal (CaO) mostrando una muy baja actividad floculante, ya que logro su mínima turbidez con una cantidad muy elevada del mismo, por tal motivo es costoso. En el caso del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , se observa que su actividad floculante es buena, sin embargo se requieren de cantidades elevadas para lograr llegar a su punto óptimo, y esto hace que los gastos operativos sean altos. El hidroxicloriguro de aluminio [ $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_25\text{H}_2\text{O}$ ] mostro tener una actividad floculante muy buena debido a que las cantidades óptimas para su tratamiento son muy bajas y por lo tanto resulta ser más económicas.

Cabe destacar que existe una relación entre el estudio investigación mencionado anteriormente y el presente trabajo de investigación debido a que estos evalúan la efectividad de los coagulantes verificando la remoción de partículas coloidales presentes en el agua comparándolas con el costo operacional que incide sobre el

proceso de tratamiento de agua, es decir determinar el beneficio económico que traería consigo la reducción del tiempo de producción del PACl.

Shala *et al.* (2013), realizaron un estudio analítico a escala de laboratorio mediante pruebas de jarras de tratamiento de aguas en Hormozgan, el estudio estuvo enfocado en la elección de PACl, lodo reciclado, PACl más lodo reciclado para la eliminación de la turbidez y coliformes, la eficiencia de estos factores de eliminación se determinó mediante análisis de covarianza y Duncan (valor  $P < 0.05$ ). Los resultados mostraron que hubo una mejora en turbidez y remoción de coliformes de 97.12% y 91.35% respectivamente, que se obtuvo con PACl 10 ppm, más 10 mL / L lodos reciclados.

Mediante el uso de la dosis óptima de reciclado de lodo asentado en esta planta de tratamiento, se obtuvo 20% de reducción del consumo de PACl equivalente a 192.3 kg por día y de 69.7 toneladas por año, que es notable cantidad ya que la disminución del consumo de sustancias coagulantes en las plantas de tratamiento de agua, tiene una gran importancia en los costos operacionales de la misma y se considera ingeniería económica.

La publicación mencionada anteriormente establece una relación congruente con el presente tema de investigación ya que buscan aumentar o mantener la eficiencia que se obtiene al utilizar el policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua a un menor costo, lo cual va acorde al manejo eficiente de los recursos, desde un punto de vista de sustentabilidad y repercusión económica.

Cogollo (2010), realizó un estudio del proceso de clarificación en sistemas de tratamiento de aguas industriales usando un coagulante inorgánico polimerizado (hidroxicloruro de aluminio), señalando los principales coagulantes convencionales utilizados en el tratamiento de aguas y se aborda el policloruro de aluminio (PACl) como compuesto fundamental en la clarificación de aguas; se especifican los aspectos técnicos y operativos que se deben considerar al momento de implementar un proceso de clarificación de aguas usando un PACl como coagulante.

Dependiendo de las características fisicoquímicas del agua cruda, se requiere la adición o no de un acondicionador de pH, el cual debe seleccionarse atendiendo

requerimientos de fácil manejo, solubilidad completa y economía. Los resultados del estudio mostraron que, en general, el sistema de clarificación usando hidroxocloruro de aluminio como coagulante presenta una menor variabilidad desde el punto de vista de la calidad físicoquímica del agua tratada con respecto al proceso con sulfato de hidróxido de aluminio, variación pH (%) de 2.4 del sulfato de aluminio a PACl 0.6, remoción turbiedad (%) de 59.5 del sulfato de aluminio a PACl de 73.5, variación alcalinidad total(%) 13.7 a 2.2 respectivamente, variación dureza total (%) 18.8 a 1.8 y variación aluminio residual (%) 8.3 a 33.3; por consiguiente, se necesita aumentar las dosis de sulfato de aluminio para obtener valores de turbiedad aún más bajos, con el riesgo subsecuente del aumento del aluminio residual en el agua clarificada.

La relación existente entre la investigación antes mencionada con el presente trabajo de investigación está basada en la utilización de policloruro de aluminio como referencia de la efectividad que este posee en la remoción de partículas coloidales en comparación a otros coagulantes también altamente utilizado en la diferentes industrias y en las plantas de tratamiento de agua, por consiguiente refleja el aumento progresivo del uso del PACl como coagulante en proceso de tratamiento de agua.

Fengting *et al.* (2010), agregan que el policloruro de aluminio (PACl) es uno de los coagulantes más comunes de agua y de tratamiento de aguas residuales. Se ha implementado un nuevo estándar nacional chino de PACl, en donde la concentración de sustancias insolubles, hierro y metales pesados debe ser controlado estrictamente, la investigación se basa sobre la preparación de policloruro de aluminio de alta pureza. En este trabajo se presentó un nuevo método para preparar PACl de alta pureza que contiene alto contenido de óxido de aluminio ( $> 10\%$ ), alta alcalinidad ( $> 90\%$ ), y baja sustancias insoluble ( $<0,04\%$ ), hierro ( $<300$ )  $\text{mgL}^{-1}$  y metales pesados, las muestras tomadas desde el río Huangpu se utilizaron para evaluar el rendimiento del coagulante de alta pureza PACl en comparación con PACl convencional.

Los resultados demuestran que para todo el intervalo de dosis estudiadas de PACl de alta pureza se elimina más turbidez que PACl convencional. Por tal motivo, cuando la dosis de PACl de alta pureza fue mayor de  $4 \text{ mgL}^{-1}$  mostró una gran

capacidad de eliminación de absorbencia UV 254; esto podría ser en parte atribuido al efecto de carga del potencial zeta. El proceso de preparación de PACl de alta pureza se desarrollo con aluminio de calcio y la bauxita, este se adapta a una amplia gama de condiciones con refrigeración o calentamiento, que puede ser beneficioso para ahorrar energía.

La relación que guarda esta publicación con el presente trabajo de investigación es la analogía que presenta con respecto al grado de pureza o de concentración del policloruro de aluminio para ser utilizado como coagulante primario en el tratamiento de agua, teniendo como aspecto fundamental la remoción y disminución de metales pesados a demás de otras impurezas que se encuentran en el agua de acuerdo.

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Generalidades del agua**

Las aguas residuales son aquellas aguas provenientes de un uso en actividades que pueden ser de carácter doméstico o de producción en cualquier industria. Según, Sawyer *et al.* (2001) "el tratamiento de aguas residuales industriales son uno de los mayores retos en la práctica de la ingeniería, debido a la gran variedad de residuos producidos por estas".

Se denomina agua potable al agua "bebible" que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades. El término se aplica al agua que ha sido tratada para su consumo humano según unos estándares de calidad determinados por las autoridades locales e internacionales. Las actuales plantas de tratamiento de agua se proyectan para suministrar de manera continua agua que satisface los estándares de agua potable. Para conseguir esto intervienen cuatro consideraciones principales: selección de fuentes, protección de la calidad del agua, métodos de tratamiento por aplicar y prevención de la contaminación.

Las principales operaciones unitarias que intervienen en el proceso de tratamiento de agua son las de tamizado, coagulación/floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Las operaciones de tratamiento de agua llevan a cabo una o más de tres tareas fundamentales: separación de sustancias particuladas como arena y arcilla,

materia orgánica, bacterias y algas; extracción de sustancias disueltas como las que causan mal olor y dureza; extracción o destrucción de bacterias y virus patógenos. "La selección de los procesos de tratamiento depende del tipo de fuente de agua y de la calidad que se desea", Glynn y Gary (1999).

La coagulación consiste en neutralizar la carga, generalmente electronegativa, de los coloides presentes en el agua, quedando estos en condiciones de formar flóculos, este proceso se consigue introduciendo en el agua un producto químico denominado coagulante, pero antes de entrar en el estudio de los coagulantes y de su forma de desestabilizar las suspensiones coloidales, es necesario considerar los factores que determinan que las partículas permanezcan en suspensión, así como también aquellos que producen la floculación.

Por estabilidad se entiende la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión durante mucho tiempo, mientras que por inestabilidad se expresa la tendencia de dichas partículas a flocularse siempre que entren en contacto entre sí. "Los dos parámetros que más influyen en el proceso de la coagulación son el pH y la temperatura, esto es un proceso esencialmente químico" (Barrenehea, 2004).

Un coagulante polimérico puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeras, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica. El tipo de polímeros que se forme depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial.

Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso molecular (104 a 107) que se aplican en muy pequeñas concentraciones (0.01 a 1 mg/L) lo que compensa parcialmente su alto precio. La razón para usar bajas dosis está en la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen. La poliacrilamida, con un peso molecular de  $5.5 \times 10^6$ , produce 1013 segmentos por litro de agua con una dosis de 0.1 mg/L .

La dosis óptima de coagulantes es la que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y hace que se forme un floculo pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro. Debe observarse que no necesariamente el floculo que sedimenta rápidamente es el que queda retenido en el filtro con más facilidad. El floculo que se busca, por tanto, es aquel que da el mayor rendimiento en el conjunto de los procesos de clarificación. “La dosificación se determina con base a la información sobre el caudal de entrada y la dosis óptima de coagulante que corresponda según la calidad del agua cruda que está entrando en la planta potabilizadora”, la cual se obtiene mediante la prueba de jarra (Arboleda, 2000).

La cantidad de coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así: poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada. Alta cantidad de coagulante puede producir la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.

La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra, la dosis de coagulante requiere determinarse experimentalmente. Muchos autores dan diversas opiniones acerca de los factores que afectan o determinan el establecimiento de la dosis de coagulante, aunque están de acuerdo que existe para cada tipo de agua una dosis óptima de coagulante.

Entre los factores más resaltantes que influyen en este proceso se encuentran: el pH, la alcalinidad, la temperatura, la concentración de partículas (turbiedad), concentración del coagulante, grado de agitación (gradiente de velocidad) y tiempo de retención.

El pH es la variación más importante que debe considerarse en el proceso de coagulación. Se ha establecido un rango de pH para cada tipo de agua cruda, el cual produce buena coagulación y floculación en un corto tiempo con una dosis de

coagulante dada. La extensión del rango de pH es afectada por el tipo de coagulante y por la composición química del agua, así como la concentración del coagulante.

Cuando se utilizan coagulantes metálicos después de hidrolizarse reaccionan con la alcalinidad del agua para formar ácidos débiles y compuestos inestables que polimerizan. De no existir la alcalinidad, reaccionarían con las moléculas de agua y se producirían ácidos fuertes que tendrían a bajar el pH, por otro lado la temperatura también influye fundamentalmente en el transporte de las partículas, por su efecto en la densidad y viscosidad del agua. A mayor temperatura la probabilidad de colisiones o choque entre partículas es mayor e influyen en la posibilidad de decantación en el sedimentador.

El grado de turbiedad, o sea, la concentración de coloides, influye en el tipo de coagulante aplicar y en la dosis, aunque no exista una relación estequiometría entre una y otra. Podría pensarse que, a mayor concentración de coagulante, mayor efectividad en el proceso de coagulación. Esto, aparte de resultar antieconómico por el consumo excesivo de coagulantes y la mayor producción de lodos, puede dar resultados adversos. Para la mezcla rápida se requieren gradientes elevados para que ocurra la dispersión casi instantánea del coagulante.

Sin embargo, un gradiente excesivamente alto puede provocar la reestabilización de las partículas y no producir la floculación. La mezcla lenta, por su parte requiere de gradientes bajos para evitar la ruptura de los flóculos, pero suficiente como para promover el encuentro entre las partículas y lograr una probabilidad de choques, así como evitar una eventual precipitación en la unidad de mezcla lenta. Se requiere un tiempo de retención adecuado para la desestabilización de las partículas coloidales, así como para la promoción de los choques que provoquen la aglomeración de las partículas coloidales (Arboleda, 2000).

Un problema que se presenta está ligado a que las cantidades de coagulante aplicadas son pequeñas comparadas con el volumen de agua que se somete a tratamiento. Si existe buena turbulencia, se conseguirá una dispersión más efectiva cuanto más diluida sea la solución. Sin embargo, soluciones muy diluidas puede

hidrolizarse antes de su aplicación formando productos que no son efectivos para la coagulación (Glynn y Gary, 1999).

### **2.2.2 Generalidades del policloruro de aluminio**

Son sustancias poliméricas que se ha desarrollado con el fin de mejorar la efectividad de los coagulantes, para operar con diversos cambios y fluctuaciones en las características físicas y químicas del agua (Gray, 1995). A este producto se le atribuye una elevada eficiencia en agua de alta turbiedad, así como también un comportamiento satisfactorio en aguas contaminadas.

En la patente Estadounidense 3873686 (Beckman S.M., 1978) se describen la química de solución de los cloruros de polialuminio la cual es compleja. A pesar de que la formación de especies polinucleares de aluminio se ha estudiado hace más de un siglo, persiste todavía una gran controversia por lo que respecta a las reacciones de polimerización del aluminio y a las composiciones del producto resultante.

De ellas las que más se han extendido son diversas polibases de aluminio conocidas por el término genérico cloruro de polialuminio y que agrupa a una serie de coagulantes producidos por neutralización parcial de una disolución de cloruro de aluminio con disoluciones básicas. Esta neutralización conduce a la formación de especies de hidróxidos de aluminio, que pueden ser monoméricas, diméricas o poliméricas, dependiendo del grado de neutralización.

El PACl es producido adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica  $Al(OH)_nCl_{3-n}$ , donde n toma valores que van de 1 a 2.5. El PACl se tipifica por su contenido de aluminio (porcentaje de  $Al_2O_3$ ), contenido de sulfatos (porcentaje de  $SO_4$ ) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad) (Shen y Dempsey, 1998). La basicidad se refiere al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas de PACl ( $OH/Al^+$ ), y es un índice del grado de polimerización (Sinha *et al.* 2004).

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas; dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios: dímeros  $[Al_2(OH)_2(H_2O)_8]^{+4}$  complejos polihidroxilo  $[Al_8(OH)_{20}]$ ,  $[Al_8(OH)_{22}]^{+2}$ ,  $[Al_8(OH)_{24}]$ ,

$[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{+7}$ ,  $[Al_{14}(OH)_{38}]^{+8}$ ,  $[Al_{30}Cl_9(OH)_{81}(H_2O)_{38}]^{+5}$  compuestos complejos  $[Al_{18}(OH)_{20}(H_2O)_{10}]Cl_4$  y partículas y agregados en la forma original del PACl Bochkarev *et al.*(2003). La eficiencia de la coagulación está en función de cuál o cuáles de los anteriores productos intermedios de la hidrólisis reaccionan con las impurezas del agua.

La implementación de este proceso demanda de una planificación previa; se requiere un conocimiento a fondo de las características técnicas del producto y su futuro comportamiento para poder predecir el rendimiento en el proceso. Esto se logra realizando múltiples ensayos de pruebas de jarras donde se simulan lo más cercano posible a la realidad, en condiciones de laboratorio, los procesos químicos y mecánicos que tienen lugar en el equipo de clarificación.

El policloruro o hidroxicloriguro de aluminio,  $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$ , es una sal inorgánica de aluminio multinuclear (PACl) capaz de formar con mayor rapidez y perfección, flóculos con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio mononuclear como el sulfato de aluminio. El pH óptimo de funcionamiento está entre 5.0 y 9.0 dependiendo del contenido de carbono orgánico disuelto en el agua (Romero *et al.* 2007).

El hidroxicloriguro de aluminio se presenta comercialmente como un líquido ligeramente viscoso de color ámbar claro, a veces opalescente y de sabor dulzaino astringente. Tiene la ventaja de su fácil manejo y dosificación sin dejar residuos insolubles indeseados, a diferencia de los coagulantes convencionales granulados que deben disolverse y en muchos casos dejan residuos que dañan los equipos dosificadores, Cogollo (2010). Las propiedades físicas y químicas de los PACl pueden variar considerablemente. Estos productos se encuentran en soluciones acuosas, cuyo rango de color va desde incoloras a ámbar, y de apariencia clara a turbia; tienen una gravedad específica a 25°C que varía de 1.2 a 1.35. La viscosidad medida en un viscosímetro Brookfiel a 25°C, está generalmente entre 10–50 mpa.

Diversos estudios muestran que la especie  $Al_{13}$  es la de mayor eficacia en los procesos de coagulación, por lo que la bondad de un coagulante prepolimerizado se

podrá evaluar en función de la proporción de  $Al_{13}$  que contenga. La especie  $Al_{13}$  tiene una estructura constituida por un Al tetraédrico y octaédricos, obteniéndose mejores resultados en estructura menos densa o más abiertas.

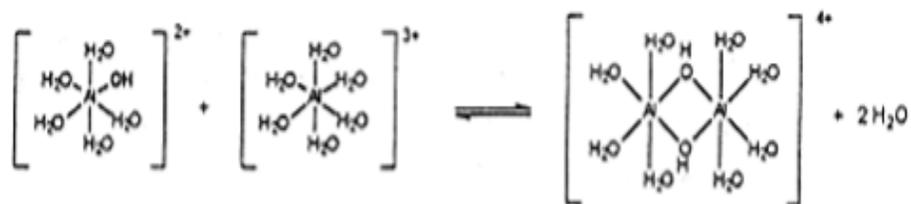
La disolución de un hidrato o sal de aluminio en deficiencia del ácido fuerte, en condiciones de presión y temperatura elevados, es el método habitual de fabricación de policloruro de aluminio, constituido por monómeros ( $Al^{3+}$ ,  $AlOH^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ), dímeros ( $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_2(OH)_x^{(6-x)+}$ ) y por la especie polimérica  $Al_{13}$ . La formación de cadenas poliméricas tiene lugar entre las especies iónicas mononucleares a través de puentes de oxígeno. Se distinguen dos tipos de procesos, en la figura 2.1, se muestra las reacciones de olación y oxolación. :

Olación: el dímero se forma por la unión de dos acuocomplejos de  $Al^{3+}$  a través de grupos OH, con el consiguiente desplazamiento de 2 moléculas de agua. La presencia de otros grupos hidroxilo en los monómeros iniciales puede conducir a la posterior formación de cadenas poliméricas.

Oxolación: a partir de los polímeros formados por olación se produce la eliminación de protones, con la correspondiente acidificación del medio y la aparición de enlaces en los que el oxígeno comparte únicamente ligandos con el  $Al^{3+}$ .

Ambos procesos son reversibles y afectados por la acidez, temperatura del medio, concentración de Al y tiempo en disolución. La fórmula general de los coagulantes de aluminio prepolimerizados es:  $Al_m(OH)_n^{(9m-1)+}$  expresándose su basicidad en función de la relación molar  $r=OH/Al$ . Los análisis de Parthasarathy y Buffle (1999), indican que los hidróxidos de  $Al^{3+}$  poliméricos constituyen el 80% del aluminio total en la solución hidrolizada, siendo la especie dominante  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  como lo muestra la tabla 2.1 donde se representan algunas de las diferentes especies mono y polinucleares, por otro lado Bottero *et al.*(1982) describen la proporción de monómeros,  $Al_{13}$  y  $Al(OH)_3(s)$  en función de la basicidad o relación molar  $r=OH/Al^{3+}$ , en la figura 2.2, se muestra la distribución de las especies del Al en función de su relación molar. Para valores de r entre 0.5 y 2.3 la suma de los dos primeros es casi del 100%; por encima de 2.3 empiezan a observarse la aparición de precipitados.

a) Olación



b) Oxolación

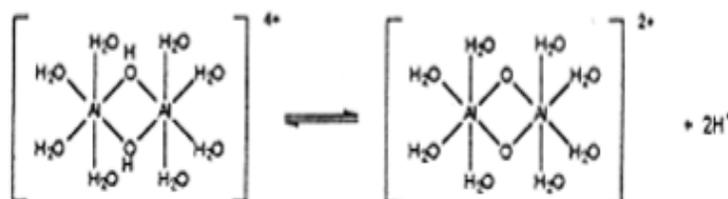


Figura 2.1 Reacciones de polimerización de las sales de aluminio: olación y oxolación.

Fuente: Johansson, 1960.

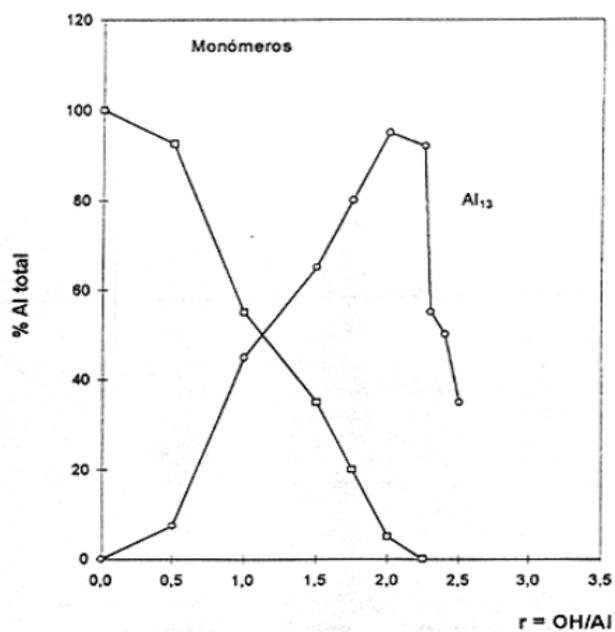


Figura 2.2 Distribución de las diferentes especies de Al en función de  $r=(\text{OH}/\text{Al})_m$ .

Fuente: Bottero *et al.* 1982.

Tabla 2.1 Se representan algunas de las diferentes especies mono y polinucleares descritas, así como sus propiedades.

	OH/Al	Basicidad (%)	Carga/ion	Carga/Al
$Al_3^+$	0	0	3	3
$Al(OH)_2^+$	1	33	2	2
$Al(OH)_2^+$	2	66	1	1
$Al_2(OH)_2^{4+}$	1	33	4	2
$Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$	2.46	82	7	0.54
$(Al_{13})_n$	>2.46	>82	<7	<0.54
$Al(OH)_3$	3	100	---	---

Fuente: Bottero *et al.* 1982.

### 2.2.3 Pruebas de jarra

Estas pruebas se emplean en la evaluación de un tratamiento aplicado para disminuir los sólidos suspendidos y otras materias no sedimentables, por medio de una coagulación seguida de una sedimentación por gravedad. La prueba consiste en simular la clarificación y operación en un equipo que contiene 6 jarras (beaker) de 1000 mL con sus respectivos agitadores, en la figura 2.3, se muestra el equipo de pruebas de jarras.

En la prueba se comparan las múltiples puestas a las mismas condiciones hidráulicas los efectos de la intensidad del mezclado rápido y lento así como las combinaciones químicas como la duración de éstos. En la prueba de jarra se determina en el programa químico óptimo en cuanto al tipo de coagulante y floculante, dosis y orden de agregado, así como también el pH, tamaño de flóculo, características de su sedimentación, tiempo de formación del flóculo, claridad final del agua y simulación de la recirculación de lodo si es necesario (LIPESA, 2005).

Durante el proceso de coagulación-floculación se toman en cuenta tres parámetros importantes: tiempo de aparición del floculo, tamaño del floculo e índice de floculación de Willcomb. El tiempo que tarda en aparecer los primeros flóculos durante el proceso coagulación-floculación, éste se determina con un cronómetro y se

registra verificando si apareció en un tiempo inferior o superior al minuto:  $<1$  o  $>1$ , respectivamente, justo cuando termina el tiempo de mezcla rápida.



Figura 2.3 Equipo de jarra de 6 puestos, RPM de 10-100, con base iluminada (Fisher 15- 443-50 y 15-443-55).

**Fuente:** Jiménez, 2001.

Este se estima, el cual no solo depende del tamaño del mismo sino también a la cantidad, y se determina justo cuando termina el tiempo de floculación correspondiente a la mezcla lenta. Las características del floculo se determinan a través del índice de Willcomb, y se estima cuando culmina el tiempo de sedimentación y antes de captar las muestras, la tabla 2.2 muestra el índice de floculación de Willcomb.

Tabla 2.2 **Índice de floculación de Willcomb.**

N° de índice	Índice de Willcomb
0	Floculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Floculo muy pequeño, casi imperceptible.
4	Disperso. Floculo bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Floculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floculo que deposita fácil pero no completamente.
10	Bueno. Floculo que deposita fácil y completamente.

**Fuente:** Arboleda, 2000.

#### 2.2.4 Análisis estadísticos

Uno de los primeros pasos que se realizan en cualquier estudio estadístico es la tabulación de resultados, es decir, recoger la información de la muestra resumida en una tabla, que se denomina distribución de frecuencias, en la que cada valor de la variable se le asocian determinados números que representan el número de veces que ha aparecido, su proporción con respecto a otros valores de la variable, etc. De acuerdo a lo expresado por Walpole y Myers (1999), “se llama distribución de frecuencias a un agrupamiento de datos en clases acompañada de sus frecuencias: frecuencias absolutas, frecuencias relativas o frecuencias porcentuales” es decir la manera en cómo están agrupadas las variables. En caso de que las variables estén al menos en escala ordinal aparecen opcionalmente las frecuencias acumuladas absolutas, y frecuencias acumuladas porcentuales,

Dentro del análisis estadístico el diseño experimental es una secuencia de pasos tomados de antemano (planeados) para asegurar que los datos se obtendrán adecuadamente, lo que permitirá un análisis objetivo contundente a conclusiones validas del problema investigado.

Se analiza los datos a través del cuadro de análisis de varianza el cual es un arreglo dado por las fuentes de variación, seguido de los grados de libertad, de las sumas de

cuadrados, de los cuadrados medios de cada componente, así como del valor F y su probabilidad de significación.

Una definición muy completa de diseño factorial es la que ofrece McGuigan, (1996), en la que establece que "un diseño factorial completo es aquel en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes,". Lo anterior establece que los diseños factoriales se utilizan para manipular las variables independientes simultáneamente y permite evaluar por separado los efectos de cada variable independiente al igual que la interacción entre ellas. Un diseño factorial puede utilizar dos o más variables independientes con cualquier cantidad de niveles o valores para determinar estadísticamente sus efectos (Rodríguez y Perez, 1995).

### **2.2.5 Normas nacionales e internacionales sobre el agua**

Las normas internacionales para el agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1974, establecen una diferencia entre la calidad del agua que se suministra por medio de una red de distribución y la que no se suministra en esta forma, partiendo del principio de que esta última le resulta impracticable mantener los mismos patrones de calidad que a la primera. Debe observarse también que la calidad del agua que se produce en la planta no es necesariamente la misma de la que se distribuye en la red, por cuanto pueden presentarse contaminaciones en ella (American Water Works Association, 2010).

En Venezuela, los valores máximos de componentes del agua que representan un peligro para la salud aparecen en las "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable", en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 1998 número S.G.-018-98. La tabla 2.3. muestra los componentes organolépticos de la calidad del agua potable.

Tabla 2.3 Componentes relativos de la calidad organoléptica del agua potable.

Componente	Unidad	Valor deseable, menor a	Valor máximo aceptable
Color	UCV	5	15
Turbiedad	UNT	1	5
Olor o sabor	-	Aceptable para la mayoría	
Sólidos disueltos totales	mg/L	500	1000
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	250	500
Ph	--	6.5-8.5	9.0
Aluminio	mg/L	0.1	0.2
Cloruro	mg/L	250	300
Cobre	mg/L	1.0	2.0
Hierro total	mg/L	0.1	0.3
Manganeso total	mg/L	0.1	0.5
Sodio	mg/L	200	200
Sulfato	mg/L	250	500
Cinc	mg/L	3.0	5.0

**Fuente:** Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable, 1998.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

El presente capítulo detalla pacientemente el tipo de investigación elegida, la metodología aplicada, estrategias de recolección de información, técnicas de análisis de datos y las fases ejecutas; todo esto con la finalidad de asegurar la validez de la investigación.

#### **3.1. Tipo de estudio y de investigación**

Según Palella y Martins (2004), define el tipo de investigación como aquella que: “se refiere a la clase de estudio que se va a realizar. Orienta sobre la finalidad general del estudio y sobre la manera de recoger la información”, el presente estudio se ubica en el modelo de una investigación experimental, según Fidas (2012) una investigación experimental “es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”. Por lo tanto, este estudio está enmarcado en una investigación experimental, ya que los datos serán sometidos a estímulos, para analizar como se ve influenciada la variable respuesta (coagulación) en función de la variable perturbada (grado de polimerización), los datos serán extraídos en forma directa de la realidad donde ocurren los hechos, a través del uso de instrumentos para recolectar la

información. Siguiendo el mismo orden de ideas, la presente investigación es de tipo descriptiva, este es definido por el autor Fidias (2012), expresa que “la investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento”, por otra parte (Bavaresco, 2004), “las investigaciones descriptivas consisten en describir y analizar sistemáticamente características homogéneas de los fenómenos estudiados en la realidad”.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto el tipo de investigación descriptiva se relaciona con la presente investigación debido a que los datos recolectados directamente en la planta de fabricación de PACl, son observados en las condiciones donde se llevan a cabo los hechos en su ambiente cotidiano, para posteriormente caracterizar, describir, analizar e interpretar los resultados de estas indagaciones y evaluar la influencia del grado de polimerización en la eficiencia del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua.

### **3.2 Diseño de la investigación**

A este respecto Fidias (2012) indica que “el diseño de la investigación es la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado”, siguiendo el mismo orden de ideas las estrategias a llevar a cabo la presente investigación se realizará a través de las siguientes actividades relacionadas a los objetivos de la investigación:

#### **3.2.1 Diagnóstico de la situación actual del proceso de producción del policloruro de aluminio**

Se realiza una revisión bibliográfica de cada una de las etapas del proceso de fabricación del PACl, a través del manual de proceso, manuales de laboratorios, normas, reglamentos, diagramas de tuberías e instrumentación (DTI), diagramas de flujo de proceso, planos de diseños de equipos de procesos, de igual manera se realiza un reconocimiento de las variables de diseño y de operación de los equipos y de las características fisicoquímicas que debe presentar el producto.

Se realizan visitas guiadas a la planta con el personal de operaciones y de proceso que intervienen en el proceso de producción de PACl, recolectando información de las actividades diarias que ahí se llevan a cabo, conjuntamente con un reconocimiento in situ de los equipos de proceso y las variables manipuladas y controladas.

De acuerdo a las instrucciones que se encuentran en el manual de procesos se realiza la actividad de recolección de datos a través de la observación directa y se hace un registro de las variables manipuladas y de operación, teniendo en cuenta el tiempo de reacción para la toma de muestra de PACl correspondiente.

### **3.2.2 Caracterización de las propiedades físicas químicas del policloruro de aluminio a diferentes grados de polimerización**

Se efectúa un reconocimiento in situ de los equipos e instrumentos que son utilizados para realizar los diferentes análisis fisicoquímicos de las muestras que provienen de la planta de producción.

Se realizan tres (3) lotes de producción de manera aleatoria de la cual se toma 1 muestra de los mismos, con una frecuencia periódica de 12 horas, manteniendo iguales condiciones para garantizar la precisión requerida, con a finalidad promediar el valor obtenido de las características del PACl y obtener la desviación estándar de la muestrea como una medida del error, tomando cantidades representativas de 250 mL directamente en planta, según como lo indica el manual de proceso Hessa (2008), se procedió a realizar la caracterización de la misma, a través de los siguientes procedimientos:

El PACl se presenta en forma de líquido, es una solución clara, ligeramente ámbar, libre de sedimentos o materia extraña visible, el policloruro de aluminio es un producto ácido, de pH menores de 4. El procedimiento según la ANSI/AWWA B408-98, (2010) para evaluar este parámetro consiste en tomar 100 mL del producto en un beaker, introducir el electrodo del medidor de pH en la muestra y realizar la lectura. La densidad debe encontrarse entre 1.30 g/mL a 1.34 g/mL. Para determinar este parámetro se realizan los siguientes pasos: se ajusta la muestra a una temperatura de

25+/-1°C, se mide 250 mL de muestra en un cilindro graduado, y se introduce el densímetro y se toma la lectura, (ANSI/AWWA B408-98, 2010).

La turbidez en los policloruros no debe exceder de 50 NTU. En el procedimiento de este parámetro se toma un volumen de 100 mL de muestra, se introduce en la celda del turbidímetro y se realiza la lectura, (ANSI/AWWA B408-98, 2010).

El contenido de aluminio como porcentaje de  $Al^{+3}$  se calcula la cantidad de muestra a utilizar según el total esperado de aluminio. Se pesa la muestra con una apreciación de 0.01 g, luego se transfiere a un matraz aforado de 500 mL y se diluye hasta 200 mL, se adiciona 25 gotas de ácido sulfúrico concentrado, 50 mL de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) 0.05 M, previamente estandarizada y se mezcla. Se adiciona 25 mL de buffer acetato de amonio, se calienta el contenido a ebullición por 2 a 3 minutos, se enfría la solución a temperatura ambiente y posteriormente se le agregan gotas de indicador anaranjado de xileno si es líquido y si es en polvo seco se agregan entre 0.1 a 0.2 g, se titula el exceso de EDTA con sulfato de zinc previamente estandarizado, el cambio de color que se observa es de amarillo a rojo púrpura, posteriormente se calcula el porcentaje de aluminio, (ANSI/AWWA B408-98, 2010):

$$Al^{+3} = \frac{(1 - M * V) * 67.45}{PM} \quad (3.1)$$

Donde:

$Al^{+3}$ : contenido de aluminio en peso (%)

M: molaridad del sulfato de zinc (M)

V: volumen gastado de sulfato de zinc (mL)

PM: peso molecular de la muestra (g)

67.45: relación de peso molecular (adim)

El porcentaje de materia activa y %  $Al_2O_3$  se determina según el procedimiento de la norma (ANSI/AWWA B408-98, 2010), donde se pesa 4.0 gr dentro de un beacker de 100 mL adicionando 15 mL de Acido clorhídrico (HCl) y se lleva a ebullición, la

misma se trasvasa a un balón aforado de 250 mL y se completa el aforo, se toma 250 mL con una pipeta volumétrica y se coloca en un erlenmeyer de 250 mL para adicionar 10 mL de EDTA y 30 mL de solución buffer, se coloca a ebulir y se le adiciona 25 mL de alcohol etílico y 2 mL de ditizona, titulando con sulfato de zinc hasta obtener un cambio de color de verde azul a violeta claro.

$$\%Al_2O_3 = \frac{(1 - M * V) * 127.5}{PM} \quad (3.2)$$

Donde:

$\%Al_2O_3$ : óxido de aluminio en peso (%)

127.5: relación de peso molecular (adim)

$$\%IA = \frac{(Al_2O_3) * 219.42}{102} \quad (3.3)$$

Donde:

$\%IA$ : ingrediente activo (%)

219.42: peso molecular del PACl

102: peso molecular del  $\%Al_2O_3$

El porcentaje de cloruro se determina pesando aproximadamente 0.2 g de la muestra en un vaso de precipitado de 100 mL con 40 mL de agua destilada para disolverse la muestra, se agregan 8 gotas de indicador 2.7 diclorofluoresceína 0.1 % en etanol, se ajusta el pH de la muestra, agregando gota a gota hidróxido de sodio 0.1 N, hasta que la solución tome un color verde fluorescente, se valora la muestra con  $AgNO_3$  0.1 N, donde el final de la titulación, está representado por un cambio de color verde fluorescente a rosado fuerte, (ANSI/AWWA B408-98, 2010):

$$\%Cl = \frac{V * N_2 * 3.5453}{PM} \quad (3.4)$$

Donde:

%Cl: cloruro (%)

V: volumen gastado del nitrato de plata (mL)

N<sub>2</sub>: normalidad del nitrato de plata (N)

Para el porcentaje de basicidad, se toma 2.5 de muestra en un erlenmeyer de 250 mL previamente tarado (pesado vacío), luego se pesa con la muestra, para conocer la cantidad de muestra en gramos, se le agregan 100 mL de agua destilada, 10 mL de HCl 1 N, el erlenmeyer se coloca sobre la plancha de calentamiento para calentar hasta ebullición. Después de ebullición por 5 minutos se baja de la plancha y se deja enfriar a temperatura ambiente, con agitación constante, se adiciona 25 mL de KF al 50 %, 4 gotas de indicador fenolftaleína y se titula con NaOH 0.5 N. El punto final viene dado por un color rosado y persiste por 1 minuto, se calcula el porcentaje de OH dada por, por la cual se determina posteriormente el grado de polimerización, para la determinación de la basicidad se debe realizar un blanco.

$$\%OH = \frac{V_b + V_m \cdot 1.7}{PM} \quad (3.5)$$

Donde:

%OH: iones hidróxido (%)

V<sub>b</sub>: volumen gastado de hidróxido gastado por el blanco en la titulación (mL)

V<sub>m</sub>: volumen gastado de hidróxido gastado por la muestra en la titulación (mL)

$$\%Basicidad = \frac{\%OH \cdot 52.91}{\%Al^{+3}} \quad (3.6)$$

### 3.2.3 Análisis la influencia del grado de polimerización en la efectividad del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua

Por medio de un diseño de experimento se analiza la hipótesis de la influencia que tiene el grado de polimerización del PACl como coagulante primario en el tratamiento de agua, la variable dependiente o de respuesta es el porcentaje de remoción de

turbiedad debido a que es la característica más resaltante al momento de analizar la coagulación de las partículas coloidales en el proceso de tratamiento de agua y las variables independientes o factores, el grado de polimerización del PACl y las dosis PACl, con seis (6) para la dosis optima.

El experimento está basado en el grado de polimerización que se produce cada 12 horas en 1 reactor o lote de producción, realizando 3 corridas, de manera que el estudio sea representativo y analizar si el grado de polimerización tienen influencia en la coagulación de partículas coloidales presente en el agua de pozo de Guatire (la recolección de toma de agua se realizó a tres profundidades diferentes, recolectando un total de 70 L de la misma, la cual fue utilizada en su totalidad el mismo día) a través de un ensayo de porcentaje de remoción de la turbiedad por medio de un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores se analizaron las medias.

En el análisis de varianza del diseño completamente aleatorizado se utiliza la verificación de los siguientes supuestos: la normalidad de los errores o residuos a través de la prueba mediante el estadístico Anderson-Darling y la homogeneidad de las varianzas con el estadístico de Bartlett, con un nivel de significación del 0.05%, una vez verificados el cumplimiento de los supuestos mencionados, se analiza si los factores (grado de polimerización de PACl y dosis de PACl) influyen directamente sobre la variable respuesta (porcentaje de remoción de turbiedad).

De acuerdo a lo anteriormente expresado se comparan las medias de los tratamientos, teniendo como hipótesis nula que no hay diferencia en las medias de la remoción de las partículas coloidales en el agua en estudio, y como hipótesis alternativa que si existe diferencia en las medias de la remoción de las partículas coloidales en el proceso de coagulación para el tratamiento de agua a diferentes grados de polimerización tal como lo muestra la ecuación 3.7 y 3.8, efectuando el cálculo de los estadísticos de prueba de Fisher, tomando en cuenta que la varianza muestral se calcula con la ecuación 3.9, aceptando un nivel de significación del 0.05.

$$H_0: \mu_{5\text{ppm}} = \mu_{10\text{ppm}} = \mu_{15\text{ppm}} = \mu_{20\text{ppm}} = \mu_{25\text{ppm}} = \mu_{30\text{ppm}} \quad 3.7$$

$$H_a: \mu_{5\text{ppm}} \neq \mu_{10\text{ppm}} \neq \mu_{15\text{ppm}} \neq \mu_{20\text{ppm}} \neq \mu_{25\text{ppm}} \neq \mu_{30\text{ppm}} \quad 3.8$$

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad 3.9$$

En el mismo orden de ideas, la prueba de jarra se realiza a través de un equipo de jarras programable dispuesto de 6 beacker, con una capacidad de 1 L cada uno, el agua en estudio proviene de un pozo ubicado en la ciudad de Guatire, para la dosis de PACl se prepara una solución en un balón aforado de 1L con 1(±0.01g) de PACl para cada corrida y cada toma de muestra del proceso, lo que quiere decir que cada mL de esta solución es igual a 1 parte por millón (ppm); las dosis correspondientes para esta prueba de jarras, tomando como referencia estudios anteriormente realizados con PACl, fueron 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm, 30 ppm.

El equipo de prueba de jarra se programa para un tiempo de mezcla rápida de 60 segundos a 80 revoluciones por minutos (rpm), el de mezcla lenta a 15 minutos a 10 rpm, y la sedimentación a 30 minutos a 0 rpm, para posteriormente determinar el índice de Willcomb, el porcentaje de remoción de la turbiedad, el color y el pH de cada ensayo y así obtener la dosis óptima, y el efecto del grado de polimerización a través de la basicidad del policloruro de aluminio o la relación OH/Al, como coagulante primario en el tratamiento de agua.

Se toma como dosis óptima y como primer criterio, la dosis de PACl produzca el mayor porcentaje de remoción de turbiedad y color residuales al menor costo de operación; aunque los criterios del tamaño del floculo producido y el tiempo de formación del floculo sirven para confirmar la elección, estos no siempre determinan cual es la mejor dosis óptima.

Para el logro de este objetivo se emplean los procedimientos establecidos en los métodos estándar (AWWA, 1990), y verificar los cambios presentados en las propiedades fisicoquímicas del agua a través de los siguientes análisis:

La determinación del pH (AWWA 4500pH-B,1990) se ha utilizando un medidor de pH que consta de un electrodo de vidrio, el instrumento se calibra a pH 7 con solución buffer al pH respectivo. Para la medición de esta variable se toma 50 mL de

la muestra de PACI, la cual se agita suavemente y se le introduce el electrodo de vidrio; transcurrido 1 minuto se lee el valor del pH en la escala del instrumento para el agua cruda, clarificada y filtrada.

El color aparente (AWWA 2120-B, 1990) se determina por comparación visual de la muestra en soluciones coloreadas de concentraciones conocidas, se utiliza un comparador en la escala platino-cobalto (unidades de color) con los tubos de Nessler de 50 mL, luego se coloca en el comparador entre dos patrones (los patrones son valores conocidos de color que van desde la unidad de color 5 hasta la de 50 de 5 en 5), en el caso de aguas con gran cantidad de materia orgánica disuelta en la misma, en muchas ocasiones es necesario efectuar una dilución de la muestra, tomando un volumen determinado y luego llevándolo a 50 mL con agua destilada, luego se compara con los patrones, y ese valor obtenido se multiplica por el factor de dilución que se calcula mediante la (AWWA, 1990).

El método para la determinación de la turbiedad está basado en un turbidímetro (método AWWA 2130-A), se agita la muestra y se vierte en el tubo del turbidímetro, y finalmente se lee directamente la turbiedad (NTU) a partir de la escala del instrumento.

Considerando los resultados obtenidos anteriormente se realiza un análisis a través de gráficas donde se visualicen como varían las propiedades del agua con respecto a las concentraciones de PACI y así determinar la dosis óptima del agua tratada.

### **3.2.4 Determinación los beneficios económicos de la reducción del tiempo de producción del PACI en relación a la eficiencia técnica del producto y su grado de polimerización**

Se compara la eficiencia del PACI de acuerdo a la evaluación técnica y a la dosis determinada anteriormente, con los parámetros que actualmente es colocado en el mercado, se evalúa la factibilidad de producir PACI a un grado de polimerización menor, teniendo en cuenta el tiempo de reacción, relación horas hombres trabajadas, disminución de reactivos empleados, posibles reducción en las materias primas, entre otros desperdicios así como también el costo de oportunidad en el mercado, para

determinar la relación costo-beneficios que se generaría al implementar esta mejora en el proceso de producción.

### **3.3 Población y muestra**

*Grima et al. (1995)* define:

Universo o población, son palabras utilizadas técnicamente para referirse al conjunto total de elementos que constituyen un área de interés específico. Lo que constituye la población total está delimitado por problemáticas de tipo teórico. Si la referencia es hacia individuos humanos, el universo o población estará constituido por la población total de la humanidad, o por la población de un país, o la de un área determinada, etc., según sea la definición del problema de investigación.

Además señala sobre la muestra: “subconjunto del conjunto total que es el universo o población, o sea una muestra es una parte de un conjunto o población”.

Considerando estos planteamientos, se aplicó la fórmula de Sierra (1995) para poblaciones finitas, la cual permite determinar del total de la población, la muestra adecuada, para ello debe señalarse como población a la batería de 3 reactores (a los cuales se le realizan análisis físico químicos cada 12 horas) en total de la planta de producción de policloruro de aluminio de Hessa Chemical C.A la misma dispone en la actualidad de una capacidad productiva de 1800TM/mes, la muestra o subconjunto delimitando, en este caso será aleatoria ya que se seleccionará al azar para que cada miembro tenga igual oportunidad de ser incluido, esta muestra será representada por una cantidad definida de reactores utilizados como instrumentos de estudios para la recolección de datos y verificación de variables, tratando de asegurar que los elementos de la muestra sean lo suficientemente representativos de la población y que los misma permita hacer generalizaciones seleccionando un 5% de incertidumbre con respecto a la población en cuestión.

Se tiene entonces que:

$$n = \frac{(4 + Npq)}{E^2(N-1) + 4pq} \quad (3.10)$$

Dónde:

n: tamaño de la muestra

N: tamaño de la población

p: probabilidad de éxito=50%

q: probabilidad de fracaso =50%

E<sup>2</sup>: error seleccionado por el investigador

4: constante

Por lo tanto se garantizará que en el presente estudio realicen con muestras representativas con un 95% de confianza de la población de los batches que se producen, y así tener la cantidad de datos suficientes para realizar los ensayos y pruebas necesarias para posteriormente estadísticos y llevar un registro de los datos obtenidos.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

De acuerdo al propósito de esta investigación, la información ha sido estructurada, ordenada, clasificada y analizada adecuadamente mediante recursos técnicos y procesos estadísticos, con la finalidad de obtener los resultados que proporcionen una mejor interpretación de los hechos, es decir, encontrar la relevancia de la información en función de los objetivos trazados para el proyecto de investigación.

#### **4.1 Diagnóstico de la situación actual del proceso de fabricación del policloruro de aluminio**

La fabricación del policloruro de aluminio se llevó a cabo en un reactor tipo batch, con paredes internas recubiertas con fibra de vidrio para evitar la corrosión, el mismo posee una chaqueta térmica de 18.5 cm de espesor, de manera que disminuya la pérdida de calor en el sistema y mantener la temperatura de reacción 95 °C, a una presión de 1 atm; la capacidad productiva es de 6000 kg de PACl por cada batch, llevándose acabo de forma manual la operación de carga, descarga y control del reactor.

La alimentación al reactor se inicia con una carga de 3000 kg de aluminio en forma de lingotes de 34 kg, la tabla 4.1, muestra el contenido de pureza que presentan dichos lingotes de aluminio, estos resultados son obtenidos a través de un espectrómetro de masa como lo indica al procedimiento basado en la norma ANSI H35.1, (2010).

Tabla 4.1 **Contenido de pureza del aluminio.**

<b>Composición</b>	<b>Porcentaje en masa (%)</b>	<b>Especificación</b>
Aluminio	0.99120	0.9999
Hierro	0.00220	0.0020
Sílice	0.00070	0.00050
Zinc	0.00008	0.00005
Cobre	0.000005	0.000003
Otros	0.005815	0.00440

Una vez distribuido el aluminio en el reactor, se toma agua proveniente del sistema de distribución nacional, donde la dureza es mostrada en la tabla 4.2, teniendo como referencia la norma COVENIN 2771-91 para la determinación de la dureza en el agua, esta agua posteriormente es suavizada y añadida al reactor hasta tapar el nivel de la estructura apilada de aluminio superpuesta sobre el reactor, con el fin de que el ácido clorhídrico (en la tabla 4.3, se muestran los resultados del análisis fisicoquímico para el HCl, según el procedimiento de la ASTM E224) que se agrega posteriormente, no caiga directamente sobre estos, con la objetivo de que ocurra una disociación de éste en el medio acuoso, formando un ion hidronio y un ion cloruro (Hopp, 2005), para que consecutivamente esté ion cloruro actué sobre el aluminio, como lo muestra la ecuación 4.1.

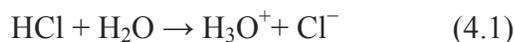


Tabla 4.2 **Porcentaje de dureza del agua de planta Hessa Chemical C.A.**

<b>Agua</b>	<b>Dureza (mg/L de CaCO<sub>3</sub>) (promedio)</b>	<b>Dureza (mg/L de CaCO<sub>3</sub>) (Especificación)</b>
Dura (sist. de dist. nacional)	110	250
Suavizada	6	50

Tabla 4.3 **Propiedades fisicoquímicas del ácido clorhídrico.**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor Obtenido</b>	<b>Especificación</b>
Densidad (densímetro) a 25 C	1.140	1.138
Concentración %	27.27	27.00
Hierro (ppm)	0	0
Aspecto	Líquido lig. amarillo	Líquido lig. amarillo

Para la obtención de un policloruro de aluminio de calidad, es necesario que los lotes de aluminio, estén previsto de un alto porcentaje de contenido de aluminio, con pocas trazas de hierro y sílice; lo que indica que el porcentaje de pureza grado polimérico del aluminio es un factor importante para garantizar que gran parte del ácido clorhídrico reaccione con el Al<sup>+3</sup>, para evitar la formación de subproductos o productos no deseados, ya que estos son directamente proporcionales a la relación Al/Cl, la turbiedad del PACl, el contenido de hierro y el aspecto del líquido.

Siguiendo el mismo orden de ideas, en la figura 4.1, se muestra los lingotes de aluminio, los cuales tienen una forma geométrica rectangular, estos pesan aproximadamente 34 kg cada uno, al visualizar los lingotes de aluminio se puede evidenciar que la geometría de estos brindan poca área de contacto (solo seis caras planas sobre la superficie del aluminio) para que el ácido clorhídrico pueda reaccionar sobre dicha área superficial, por lo tanto al no disponer los lingotes de aluminio de una gran área superficial, impide que el ácido reaccione sobre el metal de manera eficiente lo que genera una disminución de la posibilidad de que la reacción se dé con mayor velocidad.

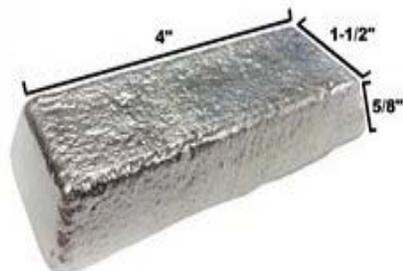


Figura 4.1 Forma geométrica de los lingotes de aluminio.

**Fuente:** Hessa, 2017.

Al entrar en contacto el ácido clorhídrico con el aluminio se aprecia un desprendimiento de calor a través de un flujo de vapor, como lo muestra la ecuación 4.2, lo que indica que está ocurriendo una reacción espontánea y exotérmica con liberación de hidrógeno a la atmósfera (Chang y Colleague, 2002), la temperatura del reactor se controla a través de la adición de agua suavizada manteniendo el nivel del reactor de acuerdo a la cantidad de producto terminado planificado, cada 12 horas se realiza una toma de muestra puntual en un recipiente rotulado de 250 mL, con la finalidad de evaluar el avance de la reacción.



Por medio de los análisis físicoquímicos que se realizan in situ se controla y evalúa el proceso de fabricación, se aprecia que el porcentaje de cloruro, indica el contenido de iones cloruros en el sistema, por lo tanto éste es de gran relevancia para que se lleve a cabo la reacción, ya que una vez agotado se culmina la misma; por

otra parte la gravedad específica o el aumento de la densidad en el sistema es el principal indicador de la formación del policloruro de aluminio, al igual que variación de la temperatura en el reactor, destacando que estas dos últimas variables son ajustadas por medio de un flujo de agua suavizada a través de una válvula manual, y el porcentaje de cloruro es corregido por medio de la adición de ácido clorhídrico.

De acuerdo a lo anteriormente planteado se determina que el sistema está expuesto a considerables perturbaciones: la manipulación del operador, calidad del agua, concentración del ácido, pureza del aluminio, temperatura ambiental, entre otras, lo que conlleva a fluctuaciones en las variables críticas del mismo, haciendo más difícil el control del proceso, trayendo consigo de manera implícita, que el sistema se restablezca de manera lenta y progresiva, en cada periodo de toma de muestra, lo que se traduce en un incremento en el tiempo de fabricación del batch del policloruro de aluminio a 72 horas, de acuerdo a estudios realizados y a la experiencia recabada por la empresa Hessa Chemical, lo que también conlleva a un aumento en los gastos operativos.

## **4.2 Caracterización las propiedades fisicoquímicas del policloruro de aluminio a diferentes grados de polimerización**

De acuerdo al diseño de la investigación planteado en el capítulo III, se realizó la caracterización del policloruro de aluminio en las diferentes etapas del proceso de fabricación del mismo, efectuando tres corridas o lotes de fabricación para el reactor en estudio, manteniendo siempre iguales condiciones en cada una de estas, con la finalidad de mitigar los errores intrínsecos del proceso. A continuación se presentan los ensayos de caracterización del policloruro de aluminio.

### **4.2.1 Determinación de la gravedad específica**

La gravedad específica es el principal parámetro físico utilizado para medir el progreso de la reacción del policloruro de aluminio, la variación de la misma indica que hay un cambio en el sistema, debido a que toma como referencia la densidad de las materias primas que están involucrada en dicha reacción (HCl y Agua), por lo

tanto un incremento de la gravedad específica en el sistema, da como resultado la formación de una sustancia (PACl) con mayor densidad a las que inicialmente se encontraban en el mismo.

Conforme a la metodología basada según (ANSI-AWWA, 2010) a  $26\pm 1^{\circ}\text{C}$ , se realizó la determinación de la gravedad específica del policloruro de aluminio, tal como lo muestra la tabla 4.4, donde en la misma se puede observar el aumento de la gravedad específica en función del tiempo de fabricación, evidenciando un delta de gravedad específica mucho mayor entre las primeras 36 horas de proceso, debido a la turbulencia generada por la entropía del sistema ( $\Delta S = 257,2 \text{ J/mol K}$ ) según los datos suministrados por Chang y Colleague (2002) para una reacción similar entre el ácido clorhídrico y el aluminio, lo cual favorece a la transferencia de materia, por lo tanto como es de esperarse que la velocidad de formación del PACl sea mayor, en las primeras horas con respecto a las últimas 36 horas restantes.

Siguiendo el mismo orden de ideas se puede señalar que la gravedad específica es una propiedad que debe mantenerse en control dentro del proceso ya que al agregar cualquier otro fluido, sea agua para mantener el control de nivel dentro del reactor o ácido clorhídrico, se verá afectada la gravedad específica del PACl, lo que lleva consigo una variación en el sistema. Cabe destacar que los resultados obtenidos son muy parecidos a los encontrados por Romero (2007) donde las gravedades específicas de los policloruros de aluminio obtenidos por un método distinto al expuesto en esta investigación se encontraron entre (1.11-1.22) g/mL.

**Tabla 4.4 Gravedad específica del PACl en función del tiempo de fabricación.**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Valor medio Gravedad Específica</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	1.12	0.03
24	1.21	0.06
36	1.26	0.05
48	1.29	0.01
60	1.32	0.01
72	1.34	0.01

#### 4.2.2 Determinación del porcentaje de cloruro

El porcentaje de cloruro indica la cantidad que existe en un tiempo determinado de ion cloruro en el sistema en estudio, este ion cloruro se obtiene al momento en que el ácido clorhídrico, un ácido fuerte se pone en contacto con el agua, ocurriendo un proceso autoionización, tal como lo demuestra la ecuación 4.1. El ácido clorhídrico se considera reactivo límite dentro del sistema de reacción, ya que el mismo es iniciador de la reacción para la formación del PACl, donde esté ataca directamente al aluminio ( $Al^{+3}$ ), generando de esta manera un desprendimiento de energía en forma de calor.

La titulación de la muestra problema se realizó con nitrato de plata de concentración 0.1002674 N según lo señalado por el departamento de laboratorio de la empresa Hessa Chemical C.A, por lo tanto la tabla 4.5, muestra los valores obtenidos del porcentaje de cloruro, arrojando como resultado que la variación de dicha propiedad dentro del sistema se mantiene alrededor de 6.32-8.43 % durante el proceso de formación de policloruro de aluminio, señalando que 8.43% coincide con el valor obtenido por Rivas (2011), en el análisis realizado a una muestra de PACl de un proveedor, para evaluar las propiedades fisicoquímicas de las dosis de los productos químicos utilizados en una planta potabilizadora.

La poca variación que experimenta el porcentaje de cloruro en gran parte del tiempo de la fabricación del PACl, se debe al análisis fisicoquímico que se realiza in-situ, lo cual conlleva a un ajuste de esta propiedad de manera oportuna, a través de la adición periódica del ácido clorhídrico al sistema, la adición de HCl se realiza con la finalidad de mantener la formación del producto, por lo tanto por medio del calor de formación que se produce se mantiene la temperatura de reacción en 90 °C. En el rango de porcentaje de cloruro que se observa en este análisis realizado al PACl, se demuestra que el policloruro de aluminio es un producto con un gran porcentaje de acidez, es decir un compuesto totalmente ácido.

Tabla 4.5 **Porcentaje de cloruro.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio % de Cloruro</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	6.32	0.56
24	7.44	0.36
36	7.71	1.14
48	7.67	0.24
60	8.04	0.42
72	8.43	0.28

#### **4.2.3 Determinación del óxido de aluminio**

La determinación del óxido de aluminio se realizó de acuerdo a lo planteado en el procedimiento que se presentan en (ANSI-AWWA, 2010), por consiguiente es de esperarse que para un sistema en estudio con las condiciones y características correspondientes al actual, la presencia de óxido de aluminio indique la cantidad de aluminio que se oxida por la presencia de átomos oxígenos, actuando el aluminio como un agente reductor; por lo tanto en la tabla 4.6, se observa el porcentaje de óxido de aluminio presente en el sistema, el mismo se encuentra comprendido entre 16.57-23.87 %, valores que son muy parecidos a obtenidos en los estudios realizados por Cáceres (2009), donde establece que en solución, y dependiendo del proceso empleado, el policloruro de aluminio tiene un contenido de dióxido de aluminio de 10 a 23 %, y en estado sólido puede alcanzar un contenido de 44 % de  $Al_2O_3$ .

Tradicionalmente, el contenido de aluminio y la pureza son expresadas en términos de equivalente de alúmina, u óxido de aluminio,  $Al_2O_3$ ; por lo tanto según lo planteado por Murillo (2011), 9% como aluminio es equivalente a 17% como  $Al_2O_3$ ; es por ello que resulta importante resaltar que los valores que se obtuvieron en este experimento, muestran que la diferencia del porcentaje de aluminio entre un punto y otro es 1.89- 2.88 %, es decir el porcentaje de formación de óxido de aluminio cada 12 hora es relativamente constante.

Adicionalmente se puede deducir que las primeras 24 horas de reacción son críticas para el sistema ya que la reacción ocurre de manera violenta haciendo difícil

su estabilización, por lo tanto el sistema en estudio pueden verse afectado por perturbaciones externas, tales como las mencionadas anteriormente (manipulación de los operarios, aumento en la temperatura, o exceso de agua en el nivel de trabajo, entre otras), alterando de tal manera al mismo, por lo tanto se observan de este modo una desviación estándar alta, en comparación con las demás tomas de muestras.

Tabla 4.6 **Porcentaje de óxido de aluminio.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio % de Dióxido de Aluminio</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	16.57	8.72
24	14.68	9.34
36	18.54	3.43
48	21.42	0.89
60	22.86	0.98
72	23.87	0.18

#### **4.2.4 Determinación del ingrediente activo**

Gutsche (1979), define al ingrediente activo como " el compuesto químico causante del efecto tóxico referido al 100%", por su parte A Food Labeling Guide (2008), FDA por sus siglas en inglés especifica que el ingrediente activo es el componente de la fórmula responsable del efecto deseado por el cliente, por lo tanto el porcentaje de ingrediente activo indica la concentración de policloruro que está contenida en dicha solución. El PACI es un polímero hidratado, considerando que la presentación comercial del PACI por lo general tiene un contenido de ingrediente activo entre 48.9- 51.6 % según lo requerido por los clientes y los parámetros establecidos por la empresa, lo que demuestra que al menos la mitad de dicho producto es una solución en sólidos de PACI.

De acuerdo a resultados que se encuentran en la tabla 4.7, el porcentaje de ingrediente activo para una reacción de 72 horas se encuentran entre 31.59 y 51.38 % mostrando una desviación estándar de las medias considerablemente altas entre cada una de las corridas, de lo que se puede interpretar que el contenido de ingrediente activo es directamente proporcional al contenido de óxido de aluminio y agua presente en el

sistema, por lo tanto al aumentar el oxido de aluminio manteniendo el mismo nivel de trabajo de agua, como está establecido en el manual de proceso de producción, se evidencia un aumento del ingrediente activo. Es importante resaltar que Rivas (2011) realizó un análisis a una muestra de PACI de un proveedor, para evaluar las propiedades fisicoquímicas de las dosis de los productos químicos utilizados en una planta potabilizadora, obteniendo un valor de 49.48 % de ingrediente activo, valor que se encuentra dentro del rango de los resultados obtenidos en la investigación presente.

Siguiendo el mismo orden de ideas la desviación estándar tan alta con respecto a la media que se observa presente en esta propiedad, se debe a que en las primeras horas de proceso, se genera un incremento de la temperatura en el reactor por encima de los 90 °C, debido al calor de reacción, por lo tanto se debe añadir de manera abrupta y repentina agua al sistema para evitar la evaporación del ácido clorhídrico y subproductos no deseados, lo que ocasiona una variabilidad notable en cada lote de producción.

Cabe destacar que el contenido de ingrediente activo es un parámetro de gran importancia a la hora de transportar y almacenar el policloruro de aluminio, ya que el mismo tiende a formar cristales de PACI al momento de estar directamente con el aire y al bajar la temperatura, debido a la deshidratación que esté experimenta, por lo tanto al formar cristales de PACI se hace difícil la operación de transportar de un tanque a otro el fluido, observándose daños en las tuberías por obstrucción, taponamientos en los tanques y roturas de sellos en las bombas.

**Tabla 4.7 Porcentaje de ingrediente activo.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio % de Ingrediente Activo</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	35.64	18.76
24	31.59	20.09
36	39.89	7.37
48	46.08	1.91
60	49.17	2.11
72	51.38	0.39

#### **4.2.5 Determinación del porcentaje de aluminio**

La tabla 4.8, resume los resultados obtenidos para la determinación del porcentaje de aluminio ( $Al^{+3}$ ) en el policloruro de aluminio, en la misma se aprecia que el contenido de ( $Al^{+3}$ ) va aumentando a medida que progresa la reacción, debido a que el PACl contiene concentraciones variables de cloruro de aluminio y esta concentración es expresada por convención como "porcentaje en peso de Al".

Los resultados demuestran que este porcentaje de aluminio ( $Al^{+3}$ ) para las reacciones en estudios, se encuentran entre (8.77-12.64 %) lo que coincide con expresado por Rivas (2011), donde indica que el porcentaje de ( $Al^{+3}$ ) de una muestra es de 12.24%, estos resultados obtenidos además demuestran que siguen el mismo patrón reflejados por porcentaje de óxido de aluminio e ingrediente activo, demostrando una relación directa con los inicialmente señalados, además que se ve afectado por las misma perturbaciones explicadas anteriormente, lo que se evidencia a través de desviaciones estándar de las primeras 24 horas de proceso.

De acuerdo a lo expuesto por Murillo (2011), en su trabajo de investigación, donde indica que la importancia del contenido de aluminio radica en que el ( $Al^{+3}$ ) puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal, ya que de esta manera es como se desestabiliza la carga en el proceso de coagulación, aglomerando las partículas coloidales a través de éste, dándole peso al flóculo para que el mismo sedimente, tal como lo muestra la figura 4.2. Por tal motivo es fundamental optimizar los procesos de tratamiento con el fin de reducir al mínimo la presencia de residuos de aluminio en el sistema, para que el agua que se esté tratando, se encuentre dentro de los parámetros establecidos de aluminio residual permisibles a nivel nacional e internacional.

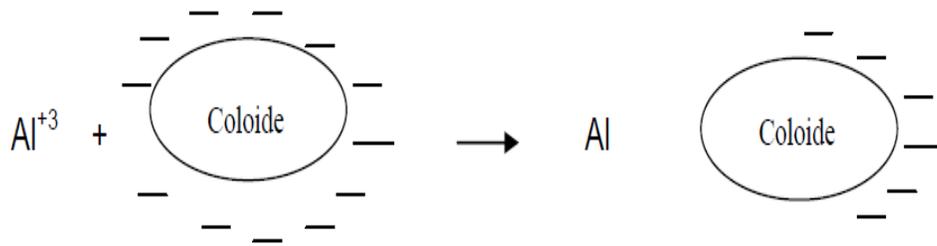


Figura 4.2 Combinación del  $Al^{+3}$  en el proceso de desestabilización una partícula coloidal.

**Fuente:** Morillo (2011).

Tabla 4.8 **Porcentaje de aluminio ( $Al^{+3}$ ).**

Tiempo Horas	Valor medio % de Aluminio	Desviación Estándar de la media
12	8.77	4.61
24	7.77	4.94
36	9.81	1.81
48	11.33	0.47
60	12.09	0.52
72	12.64	0.09

#### 4.2.6 Determinación de la relación atómica

Una vez obtenidos los resultados del porcentaje del contenido de  $Al^{+3}$  y el de cloruro, se define la relación atómica como la proporción que existe en el sistema entre el  $Al^{+3}$  y el ion cloruro  $Cl^{-}$ , como se aprecia en la tabla 4.9, la desviación estándar del valor medio se encuentran por debajo de la unidad lo que indica que no existe mucha dispersión entre los diferentes resultados, manteniendo una relación atómica promedio entre (1.39- 2.00) %.

Siguiendo el mismo orden de ideas, los resultados demuestran que por cada átomo de ion cloruro existen dos átomos de  $Al^{+3}$ , concluyendo que este parámetro se mantiene dentro de una variabilidad considerablemente baja, manteniéndose relativamente constante, pudiendo decir que las cantidades mínimas de materias

primas presentes en el sistema en estudio, se mantienen dentro de los medidas establecidas para la producción de policloruro de aluminio, tal como era de esperarse.

Tabla 4.9. **Determinación de la relación atómica.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio Relación atómica</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	1.78	0.85
24	1.39	0.92
36	1.67	0.21
48	1.94	0.14
60	1.98	0.11
72	2.00	0.09

#### **4.2.7 Determinación de la basicidad**

La basicidad es una propiedad que relaciona la cantidad promedio de iones de OH<sup>-</sup> por átomos de aluminio y está íntimamente relacionada con el grado de polimerización del PACl, esto debido a los diferentes monómeros y dímeros que se forman al momento de reaccionar las materias primas ya mencionadas para la fabricación del policloruro de aluminio, influyendo en las mismas, las condiciones de acidez, temperatura del sistema, concentración y el grado de dilución.

De este modo cabe destacar la importancia de la presencia de iones de OH<sup>-</sup> para el proceso de polimerización del PACl, tal como se aprecia en la fórmula expuesta por Aguilar *et al* (2002)  $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$  (donde  $0 < m < 3n$ ) del policloruro de aluminio el ion OH<sup>-</sup> cuenta con una considerable proporción dentro del polímero. En la tabla 4.10, se muestra el valor promedio de porcentaje de OH<sup>-</sup> para el policloruro de aluminio, con valores promedio del mismo entre 1.61 y 17.52 % con una desviación estándar de la media menor a 4.4.

Tabla 4.10 **Porcentaje de OH.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio % OH</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	1.61	0.75
24	6.25	3.02
36	10.32	2.40
48	5.73	1.30
60	16.52	4.40
72	17.52	3.71

Sobre la base de lo considerado anteriormente la basicidad del policloruro de aluminio, en la tabla 4.11, se muestra el porcentaje de basicidad es decir la relación existente que entre el  $\text{OH}^-$  y el Al (ver también tabla 4.11), comprendido en una rango promedio entre 10.37% y 73.32% resultados que coinciden con los parámetros exigidos por la American Water Works Association donde la misma indica que el contenido de basicidad puede ir desde el 10 al 83%.

Tabla 4.11 **Basicidad del policloruro de aluminio.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio Basicidad (%)</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	10.37	2.38
24	45.69	8.78
36	57.31	19.34
48	26.63	5.10
60	71.86	16.69
72	73.32	15.27

En atención a los puntos mínimos que muestra la figura 4.3, se puede observar a través de las misma que el porcentaje de basicidad (que da un referente al índice del grado de polimerización) es directamente proporcional al porcentaje de  $\text{OH}^-$  en el sistema ya que al comparar ambas curvas, se muestra que una variación del ion  $\text{OH}^-$  influye en la relación que integra dicho ion con el átomo de aluminio y por su puesto con el grado de polimerización.

Por tanto, se puede interpretar el descenso del porcentaje de  $\text{OH}^-$  o de basicidad como la aparición de precipitados en el sistema, tal como hace mención Torra *et al*

(1998) en su investigación, donde indica que el  $Al^{+3}$  puede combinarse con el  $OH^-$  que se encuentra en el agua, lo que da formación a hidróxidos de aluminios, como lo muestra la ecuación 4.3, siendo éste de carácter coloidal, por lo tanto adsorbe iones positivos que una vez combinados con las impurezas o partículas cargadas presentes en el agua, llevan consigo la formación de precipitados.

Como se ha mencionado anteriormente la relación  $OH^-/Al$  indica el grado de polimerización del PACl, por lo tanto se puede observar en la figura 4.4, un aumento de la concentración polimérica a medida que incrementa dicha relación hasta alcanzar  $r=(OH^-/Al)=0.50$ , esto debido a una disminución de los iones  $OH^-$  en el sistema, lo anteriormente mencionado es similar a los resultados obtenidos por Shen y Dempsey (1998) donde se puede apreciar un continuo incremento lineal en la concentración del polímero con el incremento del  $OH^-$ , presente hasta alcanzar una relación molar de  $(OH^-/Al)$  2.5, como lo muestra la figura 1.2.



Tabla 4.12 **Relación (OH<sup>-</sup>/Al) en función de las horas de proceso.**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Valor medio r=(OH<sup>-</sup>/Al)</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	0.20	0.05
24	0.86	0.17
36	1.08	0.36
48	0.50	0.10
60	1.36	0.31
72	1.38	0.29

#### **4.2.8 Potencial Hidrógeno (pH)**

Kiely (1999), define el pH como una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Por lo tanto el ácido clorhídrico (pH= 0.1) una de las principales materias primas para la producción del policloruro de aluminio es considerado un ácido fuerte debido a que su constante de disociación ácida es de ( $pK_a = - 6.3$ ) según Jolly (1984), lo que indica que se disocia totalmente en una solución acuosa, destacando además

que esté es agregado constantemente al sistema, es por ello como lo muestra la tabla 4.13, que PACI presenta un pH comprendido entre ( 3.63-4.03) con una desviación estándar de la media  $\leq 0.30$ , por consiguiente el PACI es considerado un producto ácido, que de acuerdo a la industria en la que se vaya a emplear sea papel o cosmético el mismo debe ser neutralizado, caso que no ocurre cuando este está destinado para el tratamiento del agua.

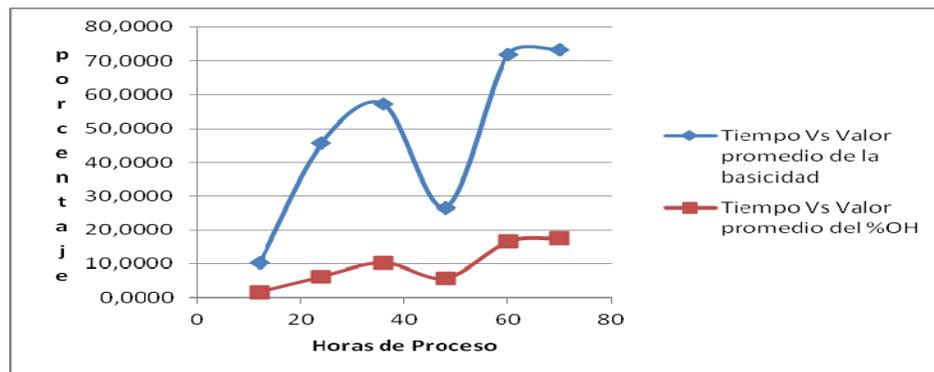


Figura 4.3 Comparación de las curvas del ion OH y la basicidad.

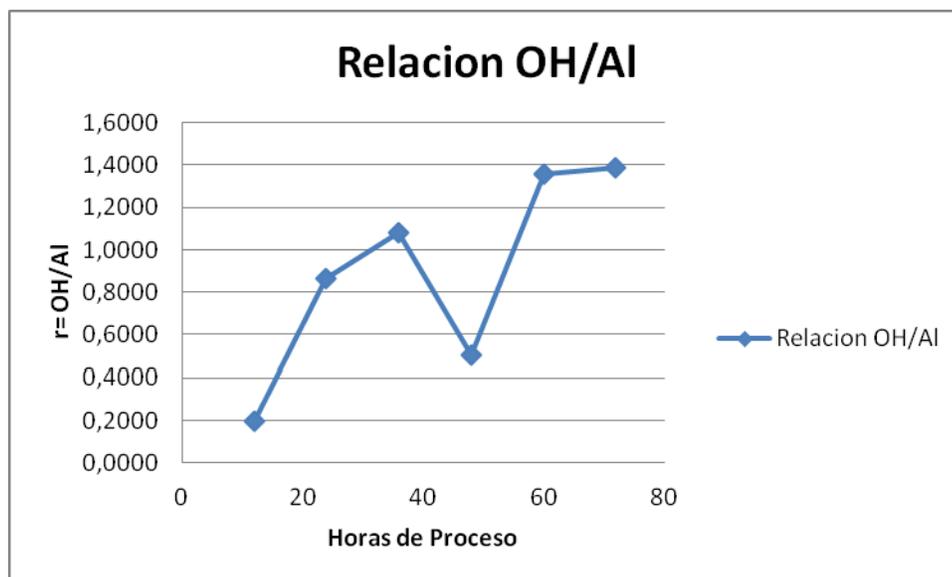


Figura 4.4 Relación  $\text{OH}^-/\text{Al}^+$  en función del tiempo.

Tabla 4.13 pH del policloruro de aluminio.

Tiempo (h)	Valor medio pH	Desviación Estándar de la media
12	4.00	0.30
24	3.63	0.20
36	3.86	0.20
48	3.80	0.10
60	4.03	0.25
72	4.00	0.17

Siguiendo el mismo orden de ideas se puede visualizar a través de la figura 4.5, que existe una fluctuación del pH entre las diferentes horas del proceso, debido a las perturbaciones ya descritas en el proceso de fabricación del PACl, como por ejemplo por la adición de agua al sistema para mantener el nivel o la del mismo ácido para mantener el progreso de la reacción, lo cual este hecho hace que el pH del mismo pueda bajar o aumentar de una toma de muestra otra, sin mostrar ninguna tendencia como pasa con las otras propiedades del sistema en estudio, por lo que no es una variable que pueda evidenciar el progreso de la reacción.



Figura 4.5 pH del policloruro de aluminio Vs tiempo de fabricación del PACl.

#### 4.2.9 Contenido de Hierro

El contenido de hierro que presente en el sistema está asociado al grado de impurezas comprendido en el aluminio, destacando que el hierro es el que se encuentra en mayor proporción después del Al en los lingotes de aluminio,

aproximadamente el porcentaje de hierro en la colada es de 0.00220%. Por lo tanto resulta conveniente mencionar que el hierro al igual que el aluminio posee un estado de oxidación de (+3) y una electronegatividad de 1.8, lo cual lo hace un fuerte competidor para reaccionar con el ácido clorhídrico.

Siguiendo el mismo orden de ideas y realizando el procedimiento para la determinación del porcentaje de hierro descrito en el capítulo anterior, se muestran en la tabla 4.14, los resultados obtenidos del contenido de hierro expresados en partes por millón, los mismos se encuentran en un rango con un valor promedio entre (120.60-65.45) ppm, con un grado de dispersión entre las medias bastante alta, el cual se presume, que se deba al desprendimiento de las capas de impurezas de los lingotes de aluminio, que van quedando en el reactor.

Tabla 4.14 **Contenido de Hierro.**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Valor medio Contenido de Hierro (ppm)</b>	<b>Desviación Estándar de la media</b>
12	121	74
24	90	29
36	74	11
48	85	21
60	73	14
72	65	20

El contenido de hierro durante las primeras horas de reacción resulta bastante alto con respecto a las últimas, disminuyendo en su totalidad casi hasta en un 50%, este descenso del contenido de hierro se puede interpretar como un consumo del mismo dentro de la reacción, ya que de no reaccionar se mantendría o aumentaría la cantidad de hierro durante todo el proceso, por el contrario el mismo muestra una tendencia a disminuir en función transcurre el proceso de fabricación como se muestra en la figura 4.6, tiempo Vs valor medio del contenido de hierro. Lo anteriormente planteado concuerda con lo expuesto por Torra, Bisbal, Valero y Tous (1998) que en ciertas condiciones se pueden generar polímeros de pequeños tamaño del tipo  $Fe_2(OH)_2^{+4}$ ,  $Fe_3(OH)_4^{+5}$  y  $FeO(OH)_4^{+6}$ , y que en un margen de pH entre 4.5 y 8 la

especie predominante es el  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ , mientras que el  $\text{Fe}^{+3}$  es siempre un componente minoritario en presencia de  $\text{Fe}(\text{OH})_3(s)$ .

Así pues, no se pudo constatar de manera fisicoquímica la existencia de algún subproducto que suscitara en el momento en que se llevó a cabo la presente investigación debido a la falta de recursos. Esto pudiera suceder pues en la combinación entre el hierro y el ácido, existe la posibilidad de que el hierro, proveniente de la impureza del aluminio, al transcurrir las horas se sedimente en el fondo del reactor, sin poder ser detectado en el tiempo de fabricación debido a la diferencia de altura que se presenta entre la válvula para la toma muestra y el piso del reactor ( $\Delta 10 \pm 1 \text{cm}$ ).

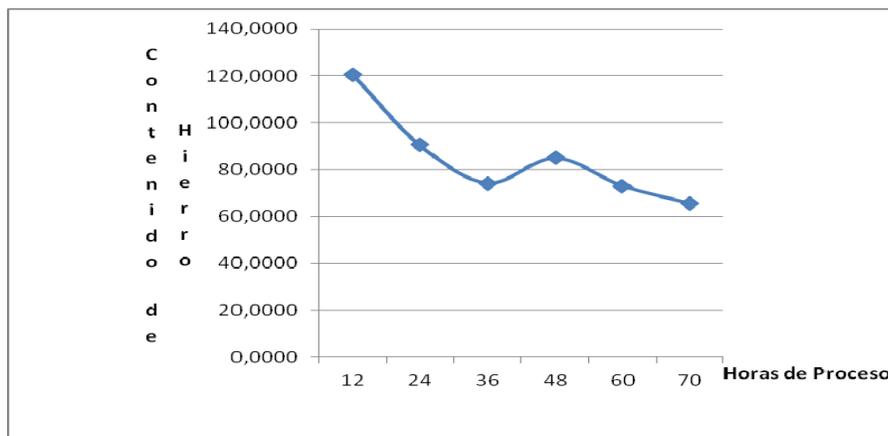


Figura 4.6 Contenido de hierro Vs tiempo de fabricación del PACI.

#### 4.2.10 Turbidez

La turbidez está asociada a la medida de la pérdida de transparencia de una solución causadas por la presencia de partículas insolubles en suspensión, coloidales o muy finas, difíciles de decantar y filtrar; la medición de la turbidez del policloruro de aluminio se realizó de acuerdo a lo planteado en el procedimiento que se presentan en la norma (ANSI-AWWA, 2010), expuesto en el capítulo 3, en la tabla 4.15, se muestran los resultados obtenidos para dicha medida, donde se aprecian un valor medio de la turbidez del PACI desde (16.556-40.95) NTU con una desviación estándar de la media mayor a 20, destacando que los resultados de turbiedad

obtenidos en esta investigación se encuentran entre los parámetros establecidos por la AWWA (1998), es decir entre 10 - 100 NTU.

Tabla 4.15 **Turbidez del Policloruro de Aluminio.**

<b>Tiempo Horas</b>	<b>Valor medio Turbidez (NTU)</b>	<b>Desviación Estándar de la media (NTU)</b>
12	17	21
24	18	19
36	25	28
48	31	33
60	35	34
72	41	35

En la figura 4.7, se muestra la tendencia del policloruro de aluminio aumentar la turbidez en función del tiempo, la turbidez asociada al PACl se debe principalmente al porcentaje de impurezas contenidas en las coladas de los lingotes de aluminio, siendo el sílice el principal causante de las partículas insolubles en suspensión en la solución, además del hierro y otras partículas en menor proporción que pueden estar contenidas en el agua de proceso.

Siguiendo el mismo orden de ideas debido a que la turbidez de policloruro de aluminio aumenta en función del tiempo, por lo tanto se puede inferir que a medida que va transcurriendo el tiempo el ácido clorhídrico va atacando las capas de aluminio, lo cual va dejando al descubierto la masa de sílice contenidos en dichos lingotes, lo que genera que estas partículas coloidales se suspendan en el sistema, adicionalmente la evidencia demuestra, que al momento de agregar el ácido clorhídrico al reactor para iniciar la reacción es importante que este se disocie completamente en el agua, ya que sí el mismo cae directamente en los lingotes de aluminio se forma un compuesto lechoso o blancuzco que tiene a precipitar en el reactor lo que conduce a un incremento de las partículas insolubles, traduciéndose en un aumento de la turbidez.

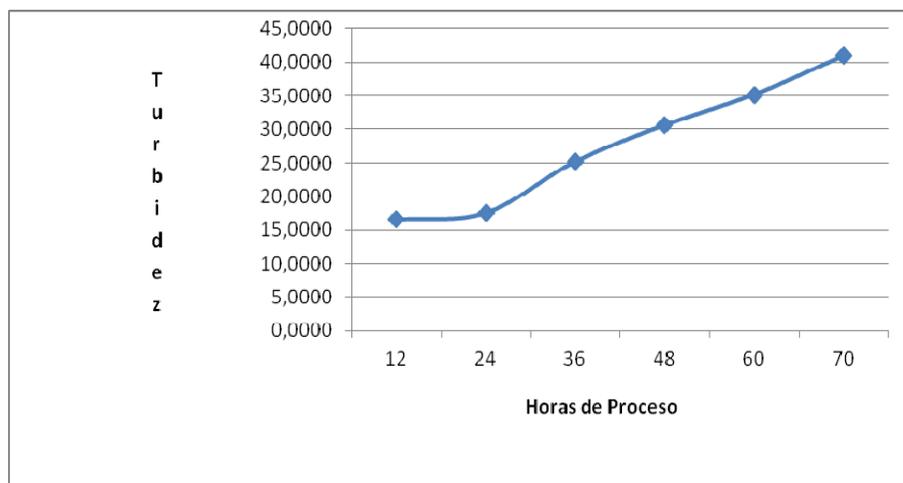


Figura 4.7 Turbidez Vs tiempo de fabricación del PACl.

### 4.3 Análisis de la influencia del grado de polimerización del policloruro de aluminio como coagulante primario en el tratamiento de agua

Los parámetros obtenidos del agua cruda (agua problema) se muestran en la tabla 4.16, donde se puede apreciar que los mismo se encuentra hasta cinco veces más por encima de los rangos establecidos en la gaceta oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela S.G.-018-98, en la " Norma sanitarias de calidad del agua potable".

Tabla 4.16 Comparación de los parámetros del agua problema Vs los parámetros establecidos por la Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (1998).

	Turbidez (NTU)	pH	Color (U.C.)
Parámetros permisibles por la norma para el agua potable	0-5	6.5-8.5	0-15
Agua cruda (agua problema)	34.8	7.5	78

En la primera prueba de jarra se tomaron 3 corridas del reactor, realizando el promedio de las misma, para el estudio a las 12 horas de proceso correspondiente a una  $r(\text{OH}^-/\text{Al})= 0.1980$  determinando el porcentaje de remoción de la turbidez y del color, tal como se muestran en las figuras 4.8 y 4.9, los resultados del pH y el índice de Wilcomb se encuentran en las tablas C12 hasta la C17, ubicado en el apéndice C.

En función de las dosis aplicadas en el agua cruda, se evidencia que el porcentaje de remoción más altos de la turbiedad y el color son de 33.24 % y 34.62 % respectivamente, correspondiente a 23.23 NTU y 51 U.C lo que indica que los valores de dicha propiedades no se encuentran dentro de los límites permitidos por la norma Venezolana.

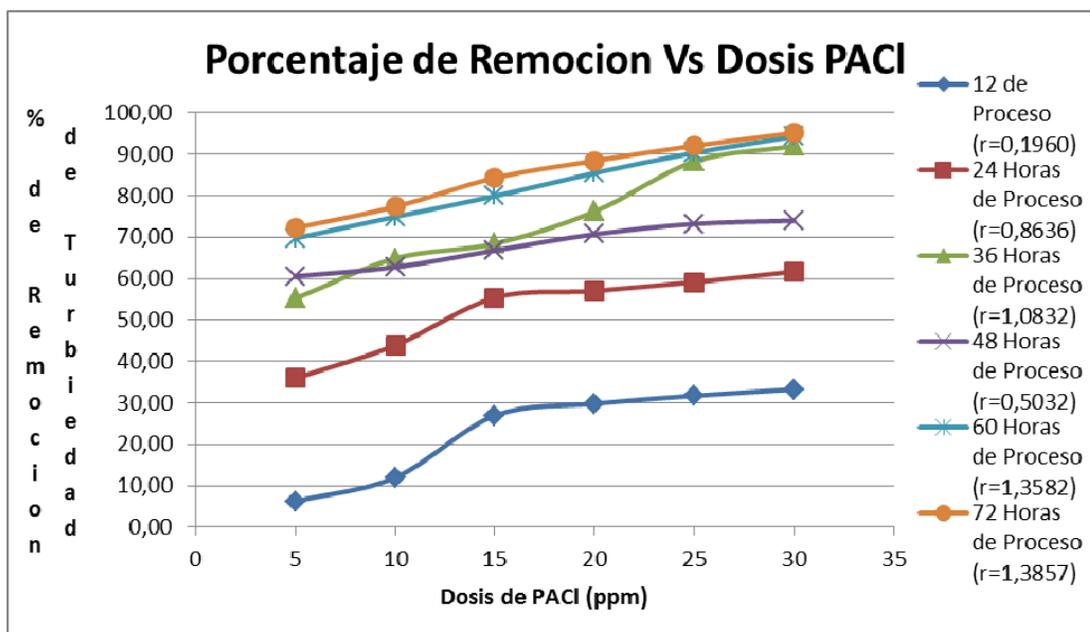


Figura 4.8 Porcentaje de remoción de turbidez y color Vs dosis de PACI a las 12 horas de proceso.

En el segundo ensayo se realizó con las muestras promedios del reactor a las 24 horas de proceso la cual tiene una  $r(\text{OH}^-/\text{Al})=0.8636$ , los mayores porcentajes de remoción de turbiedad y del color del agua en estudio, obteniendo de 60.69 % y 66.24 % respectivamente. Correspondientes a 13.33 NTU para la turbidez y 26.33 UC para el color, valores que se encuentran muy cercanos a los permitidos.

Para el ensayo correspondiente a las corridas del reactor, a las 36 horas de procesos tienen una  $r(\text{OH}^-/\text{Al})=1.0832$ , donde el mayor porcentaje de remoción para la turbidez es de 91.95 %, este último porcentaje es correspondiente a una turbidez de 2.80 NTU, por otra parte el mayor porcentaje de remoción del color fue de 85.47 %, correspondiendo a un valor de 11 UC, incluso a partir de las dosis con 25 ppm de

PACl los valores de turbidez y color en este ensayo se encuentran dentro de las especificaciones sanitarias anteriormente mencionadas.

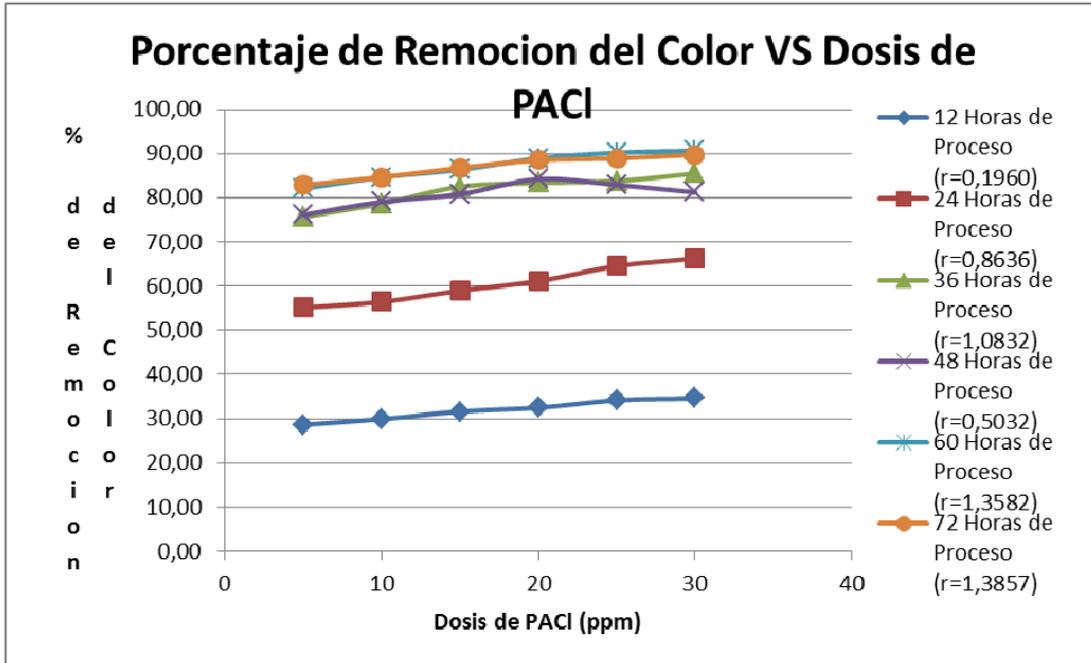


Figura 4.9 Porcentaje de remoción del y color Vs dosis de PACl.

Para la prueba de jarra correspondiente a estudio de la reacción a las 48 horas, presenta una  $r(OH/Al)=0.5032$ , se aprecian en la figuras 4.09 y 4.10 que para la remoción de la turbidez se obtuvo una remoción de 73.95 %, correspondiente a 9.07 NTU para el porcentaje más alto, y 81.20 % de remoción para el color, correspondiente a 14.67 UC de color respectivamente.

Es importante resaltar que a pesar de que los valores obtenidos en la prueba de jarra, para este caso se encuentran dentro de los parámetros permisibles para el color mas no así para la turbiedad, además las figuras anteriormente mencionada muestra el comportamiento registrado, con respecto al color y la turbidez, la cual exhibe una caída del porcentaje de remoción o un delta de variación de la remoción muy pequeño entre un punto y otro, tendencia que no experimentan las otras curvas, esto se puede

atribuir a los precipitados formados en la solución de PACl en el reactor, al otorgarle cierto aspecto blanquecino y turbio.

La prueba de jarra realizada para el reactor a las 60 horas de proceso, el cual tiene un  $r(\text{OH}^-/\text{Al})=1.3580$ , en las figuras anteriormente mencionadas se aprecian el porcentaje de remoción que alcanza la turbidez 94.25 % correspondiente este último porcentaje al 2 NTU, de igual manera se puede apreciar el porcentaje de remoción del color el cual se encuentra en 90.60 %, correspondiendo a 7.33 UC para el mayor porcentaje, cabe destacar que a partir de las dosis con 25 ppm de PACl los valores de turbidez y color en este ensayo se encuentran dentro de los límites permisibles. La trayectoria que sigue la curva es muy parecida a una línea recta, la cual indica que al agregar mayor cantidad de PACl al sistema mayor remoción de la turbidez se obtiene.

A las 72 horas de proceso se realizó la última toma de muestra, esto de acuerdo a los parámetros comerciales del producto, partiendo del mismo, con un  $r(\text{OH}^-/\text{Al})=1.3857$ , obteniendo como resultados arrojados por la prueba de jarra, el mayor porcentaje de remoción de la turbidez es de 95.11 % correspondiendo le un valor de 1.70 NTU y para la remoción del color en 89.74 % para un valor de 8.00 UC para el mayor porcentaje, es importante destacar que a partir de las dosis con 20 ppm de PACl los valores de turbidez y color en este ensayo se encuentran dentro de las especificaciones sanitarias exigidas, de igual modo estos valores son muy parecidos al ensayo anterior debido a las cercanías de las propiedades que presentan.

De tal manera que la dosis óptima según las pruebas de jarras realizadas, tomando como base aquella dosis, que logra colocar los parámetros de la turbidez y del color dentro de las especificaciones exigidas por la norma ya mencionada en párrafos anteriores, teniendo una menor cantidad de gastos de recursos tanto para los clientes como para la organización que lo produce, es la muestra de la reacción a las 36 horas de proceso con una dosis para las características del agua en estudio de 25 ppm de policloruro de aluminio.

Siguiendo el mismo orden de ideas, en esta investigación se realizó un análisis de varianza, con la finalidad de determinar si el grado de polimerización del PACl influye sobre el proceso de coagulación de partículas coloidales, exactamente sobre la

turbidez del agua, efectuando un diseño factorial de  $2^k$ , teniendo como tratamiento primario los tiempos del proceso de fabricación del PACI, el cual está relacionado con la  $r=(OH^-/Al)$  que a su vez es una función del grado de polimerización del PACI y la dosis de producto suministrada a diferentes niveles (5ppm, 10ppm, 15 ppm, 20ppm, 25 ppm, 30 ppm), como tratamiento secundario. Con un nivel de significancia del 5% se verifican los supuestos del modelo de diseño completamente aleatorizado (la normalidad de los residuos y la homogeneidad de las varianzas), lo que permite el análisis de las medias, y por consiguiente la aceptación o rechazo de la hipótesis nula de este experimento, la cual consiste en que, si el grado de polimerización y la dosis suministrada no influyen sobre la variable turbiedad (expresada en % de remoción de turbiedad), la medida de las medias serán iguales, o por otro lado la hipótesis alterna será que al menos un grado de polimerización muestra diferencia significativa sobre la variación del porcentaje de la remoción de la turbiedad. En la tabla 4.17, se muestra la estructura los tratamientos y niveles para un diseño factorial de dos variables.

Tabla 4.17 **Diseño factorial  $2^k$ .**

<b>Tratamientos</b>	<b>Dosis de PACI</b>					
<b>Horas de proceso</b>	<b>5 ppm</b>	<b>10 ppm</b>	<b>15 ppm</b>	<b>20 ppm</b>	<b>25 ppm</b>	<b>30 ppm</b>
12 (r=0.1960)	6.23	11.97	26.92	29.79	31.70	33.24
24 (r=0.8636)	35.92	43.87	55.36	56.99	59.10	60.69
36 (r=1.0832)	55.17	64.85	68.39	76.15	88.22	91.95
48 (r=0.5032)	60.54	62.74	66.76	70.69	73.18	73.95
60 (r=1.3582)	69.73	74.90	79.88	85.44	90.32	94.25
72 (r=1.3857)	72.22	77.30	84.29	88.41	92.05	95.11

El análisis de varianza de dos factores fue realizado con la ayuda del programa comercial "minitab 15" , en la tabla 4.18, se muestran los resultados del verificación supuesto de la normalidad de los residuos, obteniendo un P-valor de 0.070 el cual resulta mayor que el nivel de significancia de 0.05, de tal manera no se rechaza la

hipótesis nula, por lo tanto se cumple el supuesto de normalidad, como se muestra en la figura 4.10 , siguiendo el mismo orden de ideas de igual manera en la tabla 4.19, se muestra los resultados obtenido de la verificación del supuesto de la homogeneidad de la varianza, donde el P-valor es de 0.414 lo que indica que éste es mayor al valor de nivel de significancia de 0.05, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula, es decir hay homogeneidad de varianza.

Tabla 4.18 Normalidad de los residuos

H <sub>0</sub> : hipótesis nula	Los residuos se distribuyen normalmente
H <sub>a</sub> : hipótesis alternativa	Los residuos no se distribuyen normalmente
Nivel de significación	0.05
Estadístico de prueba Anderson-Darling	0.680
P-Valor	0.070
Decisión	No se rechaza la hipótesis nula.

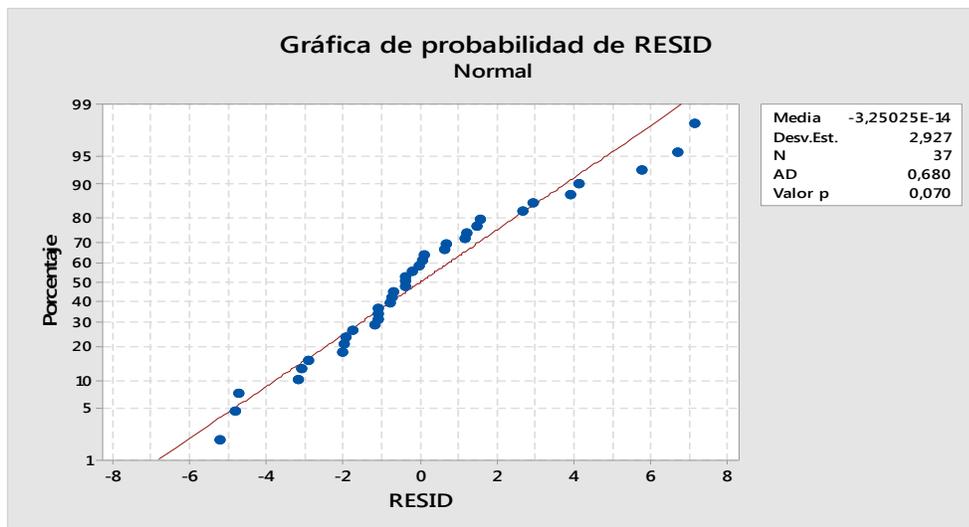


Figura 4.10 Distribución de la normalidad de los residuos.

Tabla 4.19 **Homogeneidad de la varianza**

H <sub>0</sub> : hipótesis nula	Todas las varianzas son iguales
H <sub>a</sub> : hipótesis alternativa	Al menos una varianza es diferente
Nivel de significación	0.05
Estadístico de prueba de Bartlett	5.01
P-Valor	0.414
Decisión	No se rechaza la hipótesis nula.

Una vez verificados los supuesto del modelo se realizó el análisis de las medias del porcentaje de remoción de partículas coloidales, en la tabla 4.20, se muestran los resultados del análisis de varianza, en ella se puede evidenciar la relación existente entre la variación de las medias con respecto a dichos tratamientos, por lo tanto se puede notar que de acuerdo a las horas de proceso, que relaciona el grado de polimerización, el p-valor calculado es de 0.00 lo que resulta un valor menor que el nivel de significancia (0.05), con un estadístico de Fisher de 311.25, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, es decir el grado de polimerización si tiene influencia sobre la coagulación de partículas coloidales en el proceso de tratamiento de agua, y al menos una de las medias es diferente a las demás.

Tabla 4.20 **Varianza para porcentaje de Remoción de Turbiedad (unidades codificadas).**

H <sub>0</sub> : hipótesis nula	Todas las medias de la varianza del porcentaje de remoción son iguales
H <sub>a</sub> : hipótesis alternativa	Al menos una media es diferente
Nivel de significación	0.05
Estadístico de prueba de Fischer	311.25
P-Valor	0.000
Decisión	Se rechaza la hipótesis nula.

Siguiendo el mismo orden de ideas, debido a que al menos una media refleja una diferencia entre los tratamiento se realizó un test de Tukey, la tabla 4.21, muestra la interacción entre cada uno de los factores, se puede observar que existe una diferencia significativa entre las mismas, ya que las medias que no comparten una

letra son significativamente diferentes, a un nivel de significancia del 5%, por lo tanto se concluye que si hay una diferencia significativa entre los grados de polimerización del PACl y la remoción de las partículas coloidales, en la figura 4.11 y 4.12 se muestra que el factor que más influye en la coagulación de partículas coloidales es el grado de polimerización el cual está relacionado con las horas de procesos de fabricación del PACl, y en menor grado la dosis de PACl que se le agrega al agua tratada.

Tabla 4.21 **Interacción entre cada uno de los factores**

Grado de polimerización	N	Media	Agrupación			
1.3857	7	84.8287	A			
1.3582	6	82.4233	A			
1.0832	6	74.1217		B		
0.5032	6	67.9767			C	
0.8636	6	51.9883				D
0.1960	6	23.3083				E

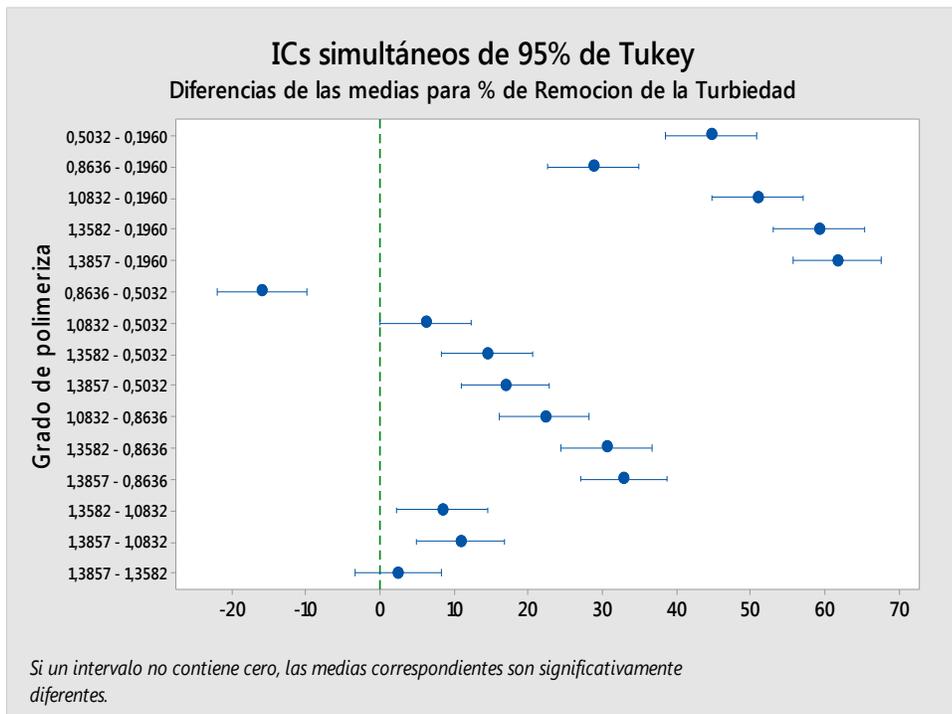


Figura 4.11 Diferencias de las medias para el porcentaje de la remoción de acuerdo al grado de polimerización.

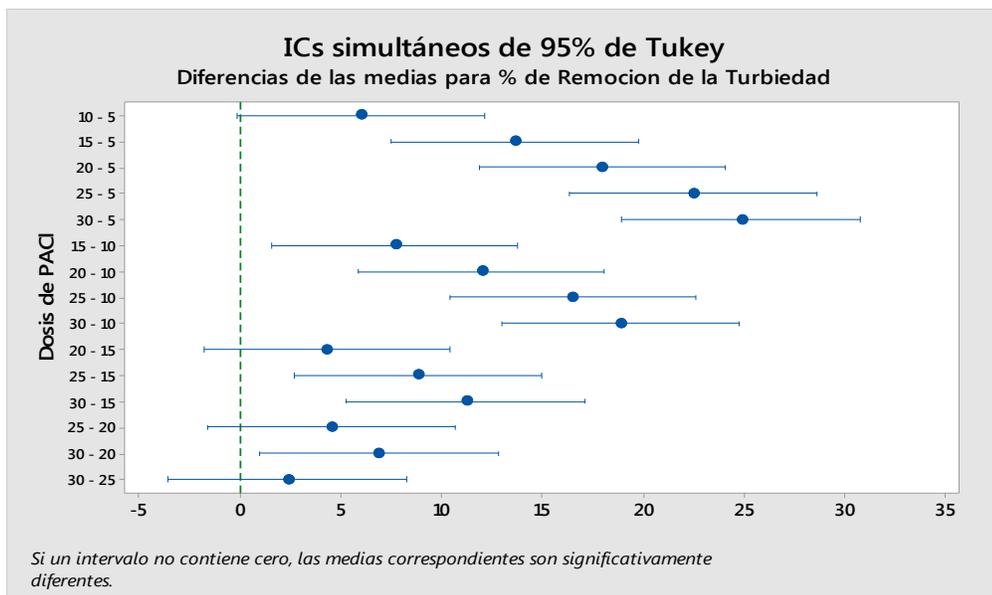
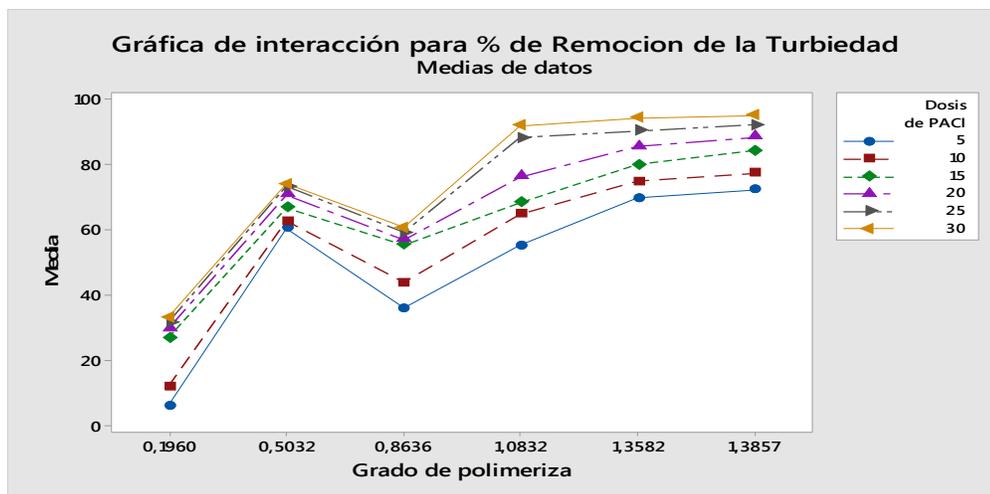


Figura 4.12 Diferencias de las medias para el porcentaje de remoción contra dosis del PACI.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto en la figura 4.13 se muestra la interacción existente entre el grado de polimerización y la dosis con la mayor eficiencia en la remoción de partículas coloidales al menor gasto operacional, para obtener un porcentaje de remoción de la turbiedad acorde a las normas del tratamiento de agua para el consumo humano, en la misma se puede apreciar que la dosis optima es de 25ppm para un grado de polimerización de 1.0832 correspondiente a un porcentaje de remoción de la turbiedad de 88.22 % equivalente a 4.10 NTU, lo que concuerda con Figura 4.13 Interacción entre los factores y el porcentaje de remoción de la turbiedad.



#### 4.4 Determinación los beneficios económicos de la reducción del tiempo de producción del policloruro de aluminio de acuerdo a la relación eficiencia técnica del producto y grado de polimerización.

En este objetivo se contó con la ayuda del departamento de administración y finanzas de la organización HESSA CHEMICAL, con la finalidad de validar cuales son los costos directos e indirectos que intervienen en la fabricación de policloruro de aluminio, y así proceder a calcular las relaciones costo beneficios correspondidas de acuerdo a la dosis óptima ( $r=1,0832$ ; y 25 ppm de PACI) y los tratamientos planteados, basados en los resultados obtenidos para así comparar estos con los de la situación actual. En la tabla 4.22, se muestra los costos totales por cada kilogramo de PACI fabricado y los beneficios por ingresos de ventas.

Tabla 4.22. **Relación costo beneficios situación actual.**

	Costos totales	Bs/kg	Beneficios	Bs/kg	
Costos Directos	Mano de obra directa	42.78	Ingresos por ventas	783.19	
	Materia prima	171.37			
	Reactivos de laboratorio	36.4			
Costos Indirectos	Mano de obra indirecta	40.55			
	Carga fabril	86.32			
Gastos de operación y gastos ajenos	gastos de Administración	45.83			
	gastos de ventas	39.4			
	gastos de operación y gastos financieros	57.74			
	Total	520.39		Total	783.19
	Relación costo beneficios	1.50			

Siguiendo el mismo procedimiento de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de jarras y la caracterización del PACI se calculan los costos y beneficios que generarían la reducción de las horas de procesos (en 36 horas) si se adoptarán los parámetros para el policloruro de aluminio reflejados para dicho tiempo, en la tabla 4.23, se muestra la relación costo beneficio que traería consigo la reducción en el tiempo de fabricación.

Los resultados demuestran que se obtendría una mayor que la relación de costo-beneficios, con el hecho al disminuir las horas de procesos del PACI sin verse afectadas las propiedades que el mismo posee como coagulante primario que el proceso de tratamiento de agua, este aumento en dicha relación se ve correspondida a una disminución en los gastos totales, debido a que la reducción en las horas de proceso trae consigo menor cantidad de horas hombres trabajadas, menor gastos de reactivos, mayor rendimiento de la materias primas y recursos utilizados, lo que a su vez se traduce en mayor productividad anual, adicionalmente de las mejoras implícitas o intangibles en el sistema económico de la organización.

Tabla 4.23 **Relación costo beneficios situación futura (r=1,0832; 25 ppmde PACI).**

	Costos totales	Bs/kg	Beneficios	Bs/kg	
Costos Directos	Mano de obra directa	36.69	Ingresos por ventas	783.19	
	Materia prima	144.37			
	Reactivos de laboratorio	22.4			
Costos Indirectos	Mano de obra indirecta	34.71			
	Carga fabril	86.32			
Gastos de operación y gastos ajenos	gastos de Administración	45.83			
	gastos de ventas	39.4			
	gastos de operación y gastos financieros	57.74			
	Total	467.46		Total	783.19
	Relación costo beneficios	1.67			

Por lo tanto tal y como lo expresa Blank y Tarquin (2006), los resultados señalan que este ajuste en los parámetros generaría una factibilidad técnico - económica mucho más aceptable, por lo tanto la misma puede representar una excelente opción y alternativa al momento de minimizar los costos de producción y ser más competitivos en el mercado.

## CONCLUSIONES

1. La sensibilidad del sistema de las variables de operación influyen directamente en el proceso de fabricación de PACI, las variables críticas son: el porcentaje de pureza de aluminio, y la adición de agua al sistema.
2. Las propiedades fisicoquímicas del policloruro de aluminio fabricado de acuerdo al procedimiento estudiado, se encuentra dentro de los parámetros especificados por los clientes y al igual que con las especificaciones técnicas para el proceso de tratamiento de agua.
3. Durante las primeras 36 horas de procesos se observa una variación significativa en las propiedades del PACI, mientras que en las horas posteriores el progreso de la formación del PACI es más lento.
4. De acuerdo al análisis ANOVA, para la determinación de la variación de las medias de la turbiedad, el grado de polimerización del policloruro de aluminio influye sobre la coagulación de partículas coloidales en el proceso de tratamiento de agua
5. Existen diferencias significativas presentes según la dosis y el porcentaje de basicidad o relación ( $\text{OH}^-/\text{Al}$ ) en el proceso de remoción de turbiedad.
6. La reducción del tiempo de fabricación de policloruro de aluminio a través del ajustes de los parámetros fisicoquímicos del mismo, aumentarían la relación de costos beneficios para la organización.
7. El aumento de la relación costo beneficio se ve favorecida por la disminución de los costos de materia prima, horas hombres trabajadas y disminución de los reactivos de laboratorios.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la aplicación de este trabajo de investigación, al igual que se realicen diversas pruebas de jarras a diferentes clientes.
2. Se aconseja aumentar el área superficial de aluminio reduciendo el tamaño de los lingotes del aluminio, para obtener más superficie de contacto, para que el ácido clorhídrico pueda reaccionar, y así tener una mayor velocidad de reacción.
3. Se sugiere colocar un sistema de control automatizado, para el control de nivel del reactor.
3. Se plantea evaluar la influencia de la presencia hierro contenido en los lingotes de aluminio, tanto en el proceso de fabricación del policloruro de aluminio como en el tratamiento de agua potable.
4. Se propone desarrollar e investigar nuevas aplicaciones del policloruro de aluminio en diversas industrias.
5. Se sugiere realizar estudios con materia prima alternativa para la fabricación del policloruro de aluminio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Water Works Association (AWWA). (2010). *Catalog no: 42408*.pages:32.
- American Water Works Association (AWWA). (1990). *Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies*. 4a edición. McGraw - Hill. USA.
- Aguilar, M., Sáez, J., Llorens, M., Soler, A. y Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físicoquímico de aguas residuales, coagulación-floculación*. Primera edición. España.
- ANSI/AWWA. (2010). *Standard for Polyaluminium chloride*. ANSI/AWWA B408-98.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *Aluminum 3500-B. Eriochrome Cyanine R Method, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *Chloride 4500-C. Nitrate Mercuric method, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *Color 2120-B. Visual comparison method, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *Hardness 2340-C. EDTA Titrimetric Method, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *pH 4500-B. pH method, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association and American Water Works (APHA, AWWA). (1998). *Turbidity 2130-A. Introduction, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Edición 20.EUA: Editorial board.
- American Public Health Association (APHA). (1998): *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20.ª ed., Washington, D.C. (EE. UU.).
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2002). *Standard Test Methods for Analysis of Hydrochloric Acid*. Pennsylvania, Estados Unidos
- Arboleda. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tomo I, II. Tercera edición. Colombia: Editorial McGraw-Hill.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2010). *Resolución A/RES/64/292*. Nueva York.
- Ávila, B. *Introducción a la metodología de la investigación*. Edición electrónica.
- Baes, C. y Mesmer, R. (1976). *The Hydrolysis of Cations*. John Wiley & Sons. New York.

- Barrenehea, A. (2004). *Coagulación del agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente. Perú
- Bavaresco, A. (1994). *Proceso metodológico de la investigación*. Universidad del Zulia. 46
- Blank, L. y Tarquin, A. (2006). *Ingeniería económica*. Editorial McGrawHill, México, 6ta Edición.
- Beckman, S. (1978). *Técnica general para preparar clorhidroxido de aluminio*. Patente 3.873.686.USA
- Bochkarev, G., kurbatov, P. and kondratev, S. (2003). *Intensification of coagulation purification of highly colored waters*. Journal of Mining Science, 39 (1), 94-101.
- Bottero, J., Cases, J., Fiessinger, F. and Poirior, J. (1982). *Studies of hydrolyzed aluminum chloride solution. 1. Nature of aluminum species and composition of aqueous solution: J. Phys. Chem.* 84, 2933-2939
- Cogollo J., (2010). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio*. Universidad nacional de Colombia, sede Medellín.
- Cáceres, J. (2009). *Evaluacion del uso del policloruro de aluminio como coagulante primario, en la planta de tratamiento de agua potable el Cabray*. Guatemala.
- Chang R. y Colleague W. (2002). *Química*. Séptima edición. Editorial MC Graw Hill. Estados Unidos.
- Cogollo, J. (2010). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio*. Universidad nacional de Colombia, sede Medellín.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN 3058). (2002). *Policloruro de Aluminio líquido*. Venezuela.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN 2771-91). (1988). *Aguas naturales, industriales y residuales, determinacion de la dureza*. Venezuela.
- Fengting, Li., Jia-Qian, J., Shengju, W. and Bingru, Z. (2010). *Preparation and performance of a high purity poly-aluminum chloride*. Tonji University. Shanghai, PR China.
- Fidias, A. (2006). *El proyecto de investigación*. Quinta edición. Caracas: Editorial Episteme.
- Gutschem, D. y Pasto D. (1979). *Fundamento de química orgánica*. Editorial Reverste S.A. Barcelona, España.
- Glynn, H. y Gary H. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Segunda edición, Editorial Pearson Educación.
- Gray (1995). *Journal The American Water works association*.USA.
- Grima, P., Tort, J. y Mortorrell, L. (1995). *Técnicas para la gestión de la calidad*. Ediciones Díaz de Santos, S.A. Madrid, España.
- Hernández, R., González, P., Arriaga, M. (2013). *Clarificación de agua del arroyo el Hueleque de Poza Rica, Ver., utilizando cal, sulfato de aluminio e hidroxiclورو*

- de aluminio*. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Tuxpan, México.
- Hernández, R. (2006). *Metodología de la Investigación*. Cuarta Edición. México. McGraw- Hill Interamericana.
- Hessa Chemical C.A (2008). *Manual del proceso de fabricación del policloruro de aluminio*. Valencia-Venezuela.
- Hopp, V.(2005). *Fundamentos de Tecnología Química*. Editorial Reverte,S.A. España.
- Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI H35.1).(1988). *Sistemas de Designación de Condimentos para Aluminio*. Estados Unidos.
- Jiménez, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa Noriega Editores. México.
- Jolly, W. L. (1984). *Modern Inorganic Chemistry*, New York, U.S.A.: McGraw–Hill.
- Johansson, G. (1960). *On the crystal structures of some basic aluminum salts*: Acta Chem. Scand. 14, 771-773.
- Kiely, G.(1999). *Ingeniería Ambiental*.Volumen Nro. 2. España. Editorial McGraw-Hill Interamericana de España.
- LIPESA, S.A. (2005). *Manual de tratamiento químico del agua*. Venezuela
- McGuigan, F. J. (1996). *Psicología Experimental*. (6ª ed.). México, D. F.: Prentice Hall
- Montgomery, D. (2004). *Diseños y análisis de experimentos*. Segunda edición, México. Limusa Wiley.
- Murillo, D.(2011). *Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada*. Trabajo de fin de grado, Universidad tecnológica de Pereira. Colombia.
- Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. (1998). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, numero S.G-018-98*.Caracas.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1974). *Protecting surface waters for health - Managing the quality of drinkingwater sources*. Ginebra (Suiza),
- Palella, S., y Martins, F., (2004). *Metodología de la Investigación Cuantitativa*. Caracas: FEDEUPEL.
- Parthasarathy, N. y Buffle, C. (1999). *Speciation of trace metals in waters: Direct selective separation and preconcentration of free metal ion by supported liquid membrane*. Chem Anal.
- Pernitsky, D. and Edzwald, J. (2006). *Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications*. *Journal of Water Supply: Research and Technology*.
- Rivas, A.(2011). *Evaluación de la dosificación de los productos químicos utilizados en una planta de potabilización de agua*. Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui. Venezuela.

- Rochow, E. (1981). *Química orgánica descriptiva*. Editorial Reverté. España.
- Rodríguez, A., Perez, I. (1995). *La investigación experimental en ciencias sociales*. Segunda edición. Editorial Trillas. México.
- Romero, C., Solórzano, R., Abreu, O., Brizuela, L. y Pérez, Z. (2007). *Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua*. Revista Ingeniería UC, 14 (3), 16 - 23.
- Sampieri, R.; Fernández, C., Baptista, L. (2006). *Metodología de la Investigación*. (Cuarta edición). Caracas: Editorial McGraw-Hill.
- Sánchez, P. y Sanz, A. (1985). *Química analítica básica*. Universidad de Oviedo. España.
- Sawyer, C., McCarty P. and Parkin, G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. 4ta. Ed. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá, D.C., Colombia.
- Shala, M., Jalal, G., Parviz, R. and Norouz M. (2013). *Survey of clarifiers recycled sludge effect on turbidity and coliform removal efficiency by poly aluminum chloride (PACL) in hormozgan water treatment plant*. European Journal of Experimental Biology. Iran
- Shen, Y. And Dempsey, B. (1998). *Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment*. Environment International, 24 (8), 899-910.
- Sierra, R. (1995). *Técnicas de investigación Social Teoría y ejercicios*. Décima edición, Editorial Paraninfo, Madrid.
- Sinha, S., Yoon, Y., Amy, G. And Yoon, J. (2004). *Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes*. Chemosphere, 57, 1115–1122.
- Stumm, W., (1992). *Chemistry of the Solid-Water Interface: Processes at the Mineral-Water and Particle-Water Interface in Natural Systems*. 428p.
- Tolkou, A. and Zouboulis, A. (2015). *Synthesis and characterization of a novel composite pre-polymerized coagulant for water and wastewater treatment Proc. Of the Second Intl. Conf. on Advances in Bio-Informatics and Environmental Engineering*. Londres.
- Torra, A., Valero, F., Bisbal, L. y Tous, J.F. (1998). *Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales*. Tecnología del agua. Barcelona.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador UPEL. (2011). *Manual de trabajos especiales de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*. (Cuarta edición). Caracas.
- Valdivieso C., Valdivieso R. y Valdivieso O. (2011). *Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión*. Universidad privada Boliviana. Bolivia.
- Walpole R y Myers S. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Editorial Pearson. México

Yan, M., Wang, D., Qu, J., Ni, J. and Chow K. (2007). *Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* Peking University, Beijing, China.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Ingrediente\\_activo/](https://es.wikipedia.org/wiki/Ingrediente_activo/) "FDA: A Food Labeling Guide",  
abril de 2008..

# **APENDICES**

## APENDICE A

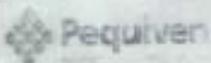
### Especificaciones de Materias Primas y Producto.

 <b>ESPECIFICACIONES MATERIA PRIMA</b>	Código: ELCHC001	
	Fecha de Revisión: 21/09/2008	
	Nivel de Revisión: 1	
Nombre: Acido Clorhídrico		
Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>
ANALISIS	PARAMETROS QUÍMICOS	
Color	Incoloro – Ligeramente Amarillento	
%Pureza	29 – 32 %	
Densidad	1,147 – 1,162	
Hierro (ppm)	Máximo 5 ppm	

FLCHC001 Rev. 1.21/09/2008

Figura A1 Especificación del Acido Clorhídrico.

**Fuente :** Hessa Chemical C.A, 2017.

	<b>PROCESO ASISTENCIA TÉCNICA</b> <b>SUBPROCESO EJECUCIÓN DE ANÁLISIS</b> <b>CERTIFICADO DE ANÁLISIS</b>		CÓDIGO: A-GT-AT-BA-R-014
			NIVEL DE REVISIÓN: 1
			PÁGINA: 1 de 1

NÚMERO DE CERTIFICADO : <u>014</u>	FECHA: <u>20-01-2017</u>
Certificate number:	Date:
PRODUCTO: <u>Acido Clorhídrico</u>	TANQUE: <u>TK-103-B</u>
Product: <u>Hydrochloric Acid</u>	Drum:

COMPONENTE Component	MÉTODO Method	ESPECIFICACIÓN Specification	RESULTADO Result
ACIDO CLORHÍDRICO, HCl Hydrochloric Acid	ASTM E224	29 – 32 %	29,04
COLOR	ASTM E224	15 APHA , máx.	<5
CLORO LIBRE, Cl <sub>2</sub> Free Chlorine	OXYCHEM, TWL 93-5	1 ppm, máx.	<1
HERRO, Fe Iron	ASTM E224	1 ppm, máx.	0,3
GRAVEDAD ESPECÍFICA @ 20 °C Specific Gravity @ 20 °C	TABLE 2.57. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK. 7 <sup>th</sup> EDICIÓN 1999. R. 2001 E	1,147 – 1,162	1,147

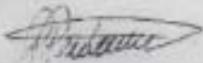
PEQUIVEN, S.A.  
 GERENCIA TÉCNICA - LABORATORIO  
  
 Pedro J. Pardo.  
 FIRMA AUTORIZADA  
 (Authorized Signature)

Figura A2 Certificado de análisis del Acido Clorhídrico .

**Fuente :** Pequiven, 2017.

 **HESSA CHEMICAL C.A.**  
Agua tratada sin residual de aluminio  
RIF. J-30108613-9  
NTT. 0436778376



**REPORTE DE ANÁLISIS  
ÁCIDO CLORHÍDRICO**

PROCEDENCIA: INDUCHEM, C.A.

Nº LOTE: HC-HCl-01-17

DENSIDAD A 25°C: 1.140  
(DENSÍMETRO)

CONCENTRACIÓN: 27.27%

HIERRO: 0 ppm

ASPECTO: Líquido ligeramente amarillo.

Observación: Aprobado para calidad cosmético nacional. El ácido se aprueba bajo condicionamiento ya que presenta concentración fuera de especificación. El dpto. de producción en total conocimiento de la situación realizara en proceso los ajustes necesarios.

FECHA DE RECEPCIÓN: 24/01/2017

**HESSA CHEMICAL, C.A.**  
COMIENTO DE LA CALIDAD

*P. Yorbel Camps* **APROBADO** Fecha: *21. 01. 17*

JEFE DE ASEG. DE LA CALIDAD  
(ENCARGADO)

*Lina Ferris*  
*Joseffo*

Planta Oficina Carretera Nacional Mariara-Mariacay  
Sector Las Vueltas Parcela 978  
Teléfono: 0243-2630220 - 2632167  
Fax Director: 0243-2633056  
e-mail: [hessa.presidencia@hessacm.com](mailto:hessa.presidencia@hessacm.com)

FLC/BC014, Rev. 4, 10/11/2014

Figura A3 Reporte del análisis de laboratorio del Acido Clorhídrico.

**Fuente** : Hessa Chemical C.A, 2017.

		Código: ELCHC001
		Fecha de Revisión: 21/09/2006
<b>ESPECIFICACIONES MATERIA PRIMA</b>		Nivel de Revisión: 1
Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>

Nombre: Aluminio.

Análisis	Especificaciones
%Pureza	99,7 %
Hierro en Aluminio	0 - 0,20 %

ELCHC001, Rev 1.21/09/2006

Figura A4 Especificaciones del porcentaje de pureza del Aluminio.

**Fuente:** Hessa Chemical C.A, 2017.

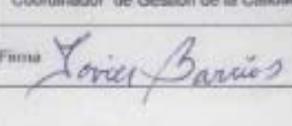
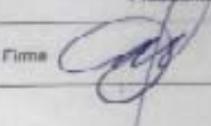
 <p><b>ESPECIFICACIONES MATERIA PRIMA</b></p>	Código: ELCHC013	
	Fecha de Revisión: 10/11/2012	
	Nivel de Revisión: 1	
Nombre: Agua		
Elaborado por Jefe de Aseguramiento de la Calidad	Revisado por Coordinador de Gestión de la Calidad	Aprobado por Presidente
Firma: 	Firma: 	Firma: 
<b>PARÁMETRO QUÍMICO</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISIS</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>
Dureza total (ppm)	Método para el análisis de la determinación de la dureza (MLCHC010)	0-150
Color	Método Visual	Incoloro

Figura A5 Especificaciones de la dureza del Agua.

**Fuente :** Hessa Chemical C.A, 2017.



**Control De Dureza Del Agua**

Fecha	Dureza		Observaciones	Nombre	Firma
	Agua cruda	Agua tratada			
08-01-16	100	112	—	Lisset	Lisset
13-01-16	86	100	—	Yonibel	Yonibel
01-02-16	83	86	—	Lisset	Lisset
22-02-16	102	121	—	Lisset	Lisset
26-02-16	96	6	—	Romaliseth	Romaliseth
01-03-16	206	31	—	Yonibel	Yonibel
04-03-16	104	4	—	Yonibel/Romaliseth	Yonibel/Romaliseth
08-03-16	114	2	—	Romaliseth	Romaliseth
11-03-16	102	4	—	Yonibel/Lisset	Yonibel/Lisset
01-04-16	92	6	—	Romaliseth	Romaliseth
05-04-16	110	6	—	Romaliseth	Romaliseth
27-06-16	106	4	—	Lisset	Lisset
13-07-16	108	3	—	Yonibel	Yonibel
19-07-16	110	6	—	Yonibel	Yonibel
24-07-16	92	6	—	Yonibel	Yonibel
17-08-16	129	4	—	Yonibel	Yonibel
20-11-16	120	7	—	Lisset	Lisset
12-01-17	110	6	—	Lisset	Lisset

FORM 038 - 01-05-03/2014

Figura A6 Registro de Control de Dureza del Agua de Producción.

Fuente: Hessa Chemical C.A, 2017.

		Código: ELCHC003
		Fecha de Revisión 21/09/2006
		Nivel de Revisión: 1
<b>ESPECIFICACIONES PRODUCTO TERMINADO</b>		
Nombre: Clorhidróxido de Aluminio Calidad Agua		
Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>	Firma <i>[Signature]</i>

ANALISIS	ESPECIFICACIONES
ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	23-24%
% CLORUROS (Cl)	7.9-8.4%
RELACION ATOMICA Al: Cl	1.9:1.0-2.0:1.0
INGREDIENTE ACTIVO	48.9-51%
HIERRO (Fe)	---
GRAVEDAD ESPECIFICA 25°C DENSIMETRO	1.332-1.341
pH en Sol. 15% PESO	4.0-4.4
% ALUMINIO P/P	12.2-12.7%
Turbidez (N.T.U)	Máx. 50

ELCHC003 Rev. 1.21/09/2006

Figura A7 Especificaciones comerciales del PACl .

**Fuente :** Hessa Chemical C.A, 2017.



**HESSA CHEMICAL C.A**  
Agua tratada sin residual de aluminio  
RIF. J-30108613-9  
NIT. 0436778376



### CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO

**PRODUCTO:** HESSHIDREX-50 WT  
**LOTE:** HC-AGU-002-17  
**EMPAQUE:** PT-04 (31328.64 kg)  
**CLIENTE:** HESSA CHEMICAL, C.A.  
**FECHA:** 23/02/2017

PARÁMETRO QUÍMICO	RESULTADOS OBTENIDOS	ESPECIFICACIONES
% ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	23.47	23-24%
% CLORUROS (Cl)	8.34	7.9-8.4%
RELACION ATOMICA Al:Cl	1.96:1.00	1.9:1.0-2.0:1.0
% INGREDIENTE ACTIVO (IA)	50.49	48.9-51.6%
HIERRO (Fe)	72.08	0-200 ppm
GRAVEDAD ESPECIFICA 25 °C DENSÍMETRO	1.332	1.332-1.341
pH AL 15% IA	4.00	4.0-4.4
% DE ALUMINIO (Al <sup>3+</sup> )	12.41	12.2-12.7%
% OH	20.00	0-20
% BASICIDAD	85.27	10-87
TURBIDEZ (NTU)	35.2	≤ 50

**HESSA CHEMICAL, C.A.**  
SECURAMIENTO DE LA CALIDAD

*P. José Luis Ramírez*  
**JEFE DE ASEG. DE LA CALIDAD  
ENCARGADO**

**APPROVED**

Plant Office: Carretera Nacional Managua-Marcos  
Sector Las Viejas Parake N°9  
Teléfono: 0243-2612222 - 2602167  
Fax Oficina: 0243-2612222  
e-mail: hessa.presidencia@hessa.com

Fecha: 23/02/17

*J. Ramírez*

FLCH010 Rev. 5. 10/11/2014

Figura A8 Certificado de Análisis químico de policloruro de aluminio .

**Fuente:** Hessa Chemical C.A, 2017.

**APENDICE B**  
**CÁLCULOS TÍPICOS**

**La demostración de los cálculos son realizados para la corrida # 1**

**Valor promedio (media) y desviación estándar de las propiedades**

$$\text{Media} = \frac{\text{propiedad de la corrida 1} + \text{propiedad de la corrida 2} + \text{propiedad de la corrida 3}}{\text{numero de corridas}}$$

$$\text{Valor promedio de la gravedad especifica} = \frac{1.110 + 1.156 + 1.094}{3} = 1.120$$

$$\text{Desviación estándar} = \sqrt{\frac{\sum(\text{prop. de la corrida } n - \text{media de la prop.})^2}{n-1}}$$

$$\text{Desviación estándar} = \sqrt{\frac{(1.110 - 1.120)^2 + (1.156 - 1.120)^2 + (1.094 - 1.120)^2}{2}} = 0.032$$

**Numero de muestra a estudiar**

$$n = \frac{(4 * N * p * q)}{E^2 * (N - 1) + 4 * p * q}$$

Dónde:

n: tamaño de la muestra

N: tamaño de la población

p: probabilidad de éxito=50%

q: probabilidad de fracaso =50%

E<sup>2</sup>: error seleccionado por el investigador

4: constante

$$n = \frac{(4 * 3 * 0.5 * 0.5)}{0.05^2 * (3 - 1) + 4 * 0.5 * 0.5} = 2.9850$$

### Contenido de Aluminio en peso

$$(\text{Al}^{+3}) = \frac{(1 - M \cdot V) \cdot 67.45}{PM}$$

Donde:

$\text{Al}^{+3}$ : contenido de aluminio en peso (%)

M: molaridad del sulfato de zinc (M)

V: volumen gastado de sulfato de zinc (mL)

PM: peso de la muestra (g)

67.45: relación de peso molecular (adim)

$$(\text{Al}^{+3}) = \frac{(1 - 0.1014 \cdot 3.20) \cdot 67.45}{4.0017} = 11.39$$

### Porcentaje de Oxido de aluminio

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{(1 - M \cdot V) \cdot 127.5}{PM}$$

Donde:

$\% \text{Al}_2\text{O}_3$ : oxido de aluminio en peso (%)

127.5: relación de peso molecular (adim)

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{(1 - 0.1014 \cdot 3.20) \cdot 127.5}{4.0017} = 21.52$$

### Ingrediente activo

$$\% \text{IA} = \frac{(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 219.42}{102} =$$

Donde:

$\% \text{IA}$ : ingrediente activo (%)

219.42: peso molecular del  $\text{PACl}$

102: peso molecular del  $\% \text{Al}_2\text{O}_3$

$$\%IA = \frac{(21.52) * 219.42}{102} = 46.30$$

### Porcentaje de Cloruro

$$\%Cl = \frac{(V * N) * 3.5453}{PM}$$

Donde:

%Cl: cloruro (%)

V: volumen gastado del nitrato de plata (mL)

N: normalidad del nitrato de plata (N)

$$\%Cl = \frac{(3.85 * 0.10026) * 3.5453}{0.2009} = 6.81$$

### Relación atómica

$$Al:Cl = \frac{(Al_2O_3) * 0.695}{Cl} =$$

$$Al:Cl = \frac{(21.52) * 0.695}{6.81} = 2.20$$

### Ion hidróxido

$$\%OH = \frac{(V_{blanco} * V_{muestra}) * 1.7}{PM}$$

Donde:

%OH: iones hidróxido(%)

$V_{blanco}$ : volumen gastado de hidróxido gastado por el banco en la titulación (mL)

$M_{muestra}$ : volumen gastado de hidróxido gastado por la muestra en la titulación (mL)

$$\%OH = \frac{(34.00 * 37.40) * 1.7}{2.50} = 2.31$$

### Basicidad

$$\% \text{ Basicidad} = \frac{(\% OH) * 52.91}{\% Al}$$

$$\% \text{ Basicidad} = \frac{(2.31) * 52.91}{11.39} = 10.74$$

## Grado de Polimerización

$$r = \frac{OH}{AI}$$

$$r = \frac{2.31}{11.39} = 0.2029$$

Modelo lineal general: % de Remoción de la Turbiedad, Dosis de PACl

Método

Codificación de factores (-1. 0. +1)

Información del factor

Factor	Tip o	Nivel es	Valores
Grado de polimeriza	Fijo	6	0,1960. 0,5032. 0,8636. 1,0832. 1,3582. 1,3857
Dosis de PACl	Fijo	6	5. 10. 15. 20. 25. 30

Análisis de Varianza

Fuente	G L	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Grado de polimeriza	5	16517,2	3303,45	278,50	0,000
Dosis de PACl	5	2887,4	577,48	48,68	0,000
Error	2 6	308,4	11,86		
Falta de ajuste	2 5	308,4	12,34	*	*
Error puro	1	0,0	0,00		
Total	3 6	20207,0			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,44406	98,47%	97,89%	96,87%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	64,108	0,568	112,89	0,000	

Grado de polimeriza

0,1960	-40,80	1,28	-31,85	0,000	1,79
0,5032	3,87	1,28	3,02	0,006	1,79
0,8636	-12,12	1,28	-9,46	0,000	1,79
1,0832	10,01	1,28	7,82	0,000	1,79
1,3582	18,32	1,28	14,30	0,000	1,79

Dosis de PACl

5	-14,14	1,28	-11,04	0,000	1,79
10	-8,17	1,28	-6,38	0,000	1,79
15	-0,51	1,28	-0,40	0,696	1,79
20	3,80	1,28	2,97	0,006	1,79
25	8,32	1,28	6,50	0,000	1,79

Ecuación de regresión

% de Remocion de la Turbiedad = 64,108 -  
40,80 Grado de polimeriza\_0,1960  
+ 3,87 Grado de polimeriza\_0,5032  
- 12,12 Grado de polimeriza\_0,8636  
+ 10,01 Grado de polimeriza\_1,0832  
+ 18,32 Grado de polimeriza\_1,3582  
+ 20,72 Grado de polimeriza\_1,3857 -  
14,14 Dosis de PACl\_5  
- 8,17 Dosis de PACl\_10 -  
0,51 Dosis de PACl\_15  
+ 3,80 Dosis de PACl\_20  
+ 8,32 Dosis de PACl\_25  
+ 10,69 Dosis de PACl\_30

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	% de Remocion de la Turbiedad	Ajuste	Resid Resid	Resid est.	
17	88,22	82,44	5,78	2,01	R
18	91,95	84,81	7,14	2,46	R
19	60,54	53,84	6,70	2,33	R

Residuo grande R

Prueba de igualdad de varianzas: RESID vs. Dosis de PACl  
Método

Hipótesis nula            Todas las varianzas son iguales  
Hipótesis alterna        Por lo menos una varianza es diferente  
Nivel de significancia    $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Dosis de PACl	N	Desv.Est.	IC
5	6	4,12012	(2,22256. 14,9230)
10	6	2,03414	(1,09730. 7,3676)
15	6	3,57534	(1,92868. 12,9498)
20	6	1,65023	(0,89020. 5,9771)
25	6	3,03137	(1,63524. 10,9795)
30	7	3,63679	(2,04379. 11,2010)

Nivel de confianza individual = 99,1667%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
--------	-----------------------	---------

Bartlett 5,23 0,388

Prueba de igualdad de varianzas: RESID vs. Dosis de PACl  
 Comparaciones para % de Remoción de la Turbiedad  
 Comparaciones por parejas de Tukey: Grado de polimeriza  
 Agrupar información utilizando el método de Tukey y una  
 confianza de 95%

Grado de polimeriza	N	Media	Agrupación
1,3857	7	84,8287	A
1,3582	6	82,4233	A
1,0832	6	74,1217	B
0,5032	6	67,9767	C
0,8636	6	51,9883	D
0,1960	6	23,3083	E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Comparaciones por parejas de Tukey: Dosis de PACl  
 Agrupar información utilizando el método de Tukey y una  
 confianza de 95%

Dosis de PACl	N	Media	Agrupación
---------------	---	-------	------------

30	7	74,7970	A
25	6	72,4300	A B
20	6	67,9117	B C
15	6	63,6017	C
10	6	55,9383	D
5	6	49,9683	D

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

ICs simultáneos de 95% de Tukey

### **Relación costo/beneficio**

$$C/B = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{V_i}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+i)^n}}$$

Dónde:

C/B: relación costo /beneficio.

V<sub>i</sub>: valor de la producción (beneficio bruto)

C<sub>i</sub>: egresos (i = 0, 1, 2, 3,4.....n)

I: tasa de descuento.

$$C/B = \frac{783.19}{520.39} = 1.50$$

## APENDICE C

### Tablas de Datos

Tabla C1 **Medición de las gravedades específicas de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 Gravedad Especifica	Corrida 2 Gravedad Especifica	Corrida 3 Gravedad Especifica	Valor medio Gravedad Especifica
12	1.110	1.156	1.094	1.120
24	1.200	1.270	1.152	1.207
36	1.272	1.312	1.210	1.265
48	1.284	1.304	1.290	1.293
60	1.338	1.322	1.310	1.323
72	1.338	1.330	1.348	1.339

Tabla C2 **Determinación de los porcentajes de cloruro de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 % de Cloruro	Corrida 2 % de Cloruro	Corrida 3 % de Cloruro	Valor medio % de Cloruro
12	6.812	6.427	5.716	6.318
24	7.856	7.230	7.221	7.436
36	8.709	7.946	6.458	7.705
48	7.890	7.423	7.705	7.673
60	8.453	7.610	8.049	8.037
72	8.450	7.951	8.427	8.276

Tabla C3 **Determinación de los porcentajes de dióxido de aluminio de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 % de Dióxido de Aluminio	Corrida 2 % de Dióxido de Aluminio	Corrida 3 % de Dióxido de Aluminio	Valor medio % de Dióxido de Aluminio
12	21.523	21.685	6.496	16.568
24	7.471	25.237	11.341	14.683
36	18.780	21.841	15.001	18.541
48	20.542	22.320	21.396	21.420
60	23.787	22.960	21.830	22.859
72	23.780	24.099	23.779	23.886

Tabla C4 **Determinación de los porcentajes de ingrediente activo de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 % de Ingrediente Activo	Corrida 2 % de Ingrediente Activo	Corrida 3 % de Ingrediente Activo	Valor medio % de Ingrediente Activo
12	46.299	46.648	13.9740379	35.641
24	16.072	54.288	24.3972799	31.586
36	40.399	46.984	32.2707282	39.885
48	44.190	48.014	46.0276389	46.078
60	51.171	49.390	46.9608442	49.174
72	51.154	51.841	51.1520442	51.383

Tabla C5 **Determinación de los porcentajes de aluminio de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 % de Aluminio	Corrida 2 % de Aluminio	Corrida 3 % de Aluminio	Valor medio % de Aluminio
12	11.3861169	11.4718601	3.43651029	8.765
24	3.952483	13.3506168	5.99980504	7.768
36	9.93509335	11.5544314	7.93605184	9.809
48	10.867403	11.8077934	11.319166	11.331
60	12.584081	12.1461202	11.5486608	12.093
72	12.58	12.7489616	12.5793652	12.636

Tabla C6 **Determinación de las relaciones atómicas de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 Relación atómica	Corrida 2 Relación atómica	Corrida 3 Relación atómica	Valor medio Relación atómica
12	2.19581191	2.3451148	0.78981917	1.777
24	0.66093174	2.42579615	1.09162645	1.393
36	1.4986705	1.9103555	1.6143283	1.674
48	1.80955117	2.08972724	1.93000343	1.943
60	1.95584461	2.09687389	1.88490923	1.979
72	1.95586982	2.10664116	1.96120462	2.008

Tabla C7 **Contenido de hierro de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 Contenido de hierro	Corrida 2 Contenido de hierro	Corrida 3 Contenido de hierro	Valor medio Contenido de hierro
12	108.63	199.79	53.39	120.603
24	95.06	116.55	59.75	90.453
36	78.03	83.03	61.48	74.180
48	103.66	88.91	62.35	84.973
60	69.85	88.57	60.77	73.063
72	69.85	82.58	43.93	65.453

Tabla C8 **Determinación de los porcentajes OH de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 % OH	Corrida 2 % OH	Corrida 3 % OH	Valor medio % OH
12	2.31033656	1.69660679	14.1309995	6.046
24	4.14352499	9.7061407	4.89306416	6.248
36	7.54558541	11.6745189	11.7433317	10.321
48	4.28057554	6.79809653	6.11339753	5.731
60	19.5620905	18.529905	11.4837317	16.525
72	19.56	19.758757	13.2404042	17.520

Tabla C9 **Determinación de las basicidades de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 Basicidad	Corrida 2 Basicidad	Corrida 3 Basicidad	Valor medio Basicidad
12	10.7358732	7.82501391	217.566985	78.709
24	55.4673878	38.4665302	43.1500729	45.695
36	40.1845166	53.4599042	78.2932993	57.313
48	20.8407888	30.4618549	28.5762984	26.626
60	82.2491689	80.7185552	52.6125285	71.860
72	82.2670588	82.0016462	55.6903927	73.320

Tabla C10 **Relación r Vs horas de Proceso de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 r=OH/Al	Corrida r=OH/Al	Corrida r=OH/Al	Valor medio r=OH/Al
12	0.2029	0.1479	0.2372	0.1960
24	1.0483	0.7270	0.8155	0.8636
36	0.7595	1.0104	1.4797	1.0832
48	0.3939	0.5757	0.5401	0.5032
60	1.5545	1.5256	0.9944	1.3582
72	1.5548	1.5498	1.0525	1.3857

Tabla C11 **Potencial de Hidrogeniones (pH) de los lotes en estudio.**

Tiempo Horas	Corrida 1 pH	Corrida 2 pH	Corrida 3 pH	Valor medio pH
12	4.3	4	3.7	4.000
24	3.8	3.7	3.4	3.633
36	3.7	4.1	3.8	3.867
48	3.7	3.8	3.9	3.800
60	3.8	4.3	4	4.033
72	3.8	4.1	4.1	4.000

Tabla C12 Prueba de Jarreas del PACl a las 12 horas de proceso.

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH		Color (U.C)		Aspecto
34.8		7.5		78		Verdoso
Tipo de Mezclado	tiempo (min)		velocidad (rpm)		volumen de jarras (L)	
Mezcla rápida	1		80		1	
Mezcla lenta	15		10			
Sedimentación	30		0			
Dosis						
Corrida # 1 (12 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	32.6	30.9	28.7	26.3	25.7	24.8
pH	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1
Color	55	55	53	52	50	50
tiempo de formación del floc (min)	2.46	2.41	2.39	2.36	2.3	2.3
índice de Wilcomb	2	2	2	2	2	2
Corrida # 2 (12 Horas)	5 ppm	10 Pm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	32.2	29.8	22.5	22.1	21.2	20.9
pH	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.2
Color	55	54	53	54	53	53
tiempo de formación del floc (min)	2.3	2.22	2.16	2.17	2.13	2.1
índice de Wilcomb	2	2	2	2	2	2
Corrida # 3 (12 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	33	31.2	25.1	24.9	24.4	24
pH	7.3	7.3	7.2	7.2	7.2	7.1
Color	57	55	54	52	51	50
tiempo de formación del floc (min)	2.51	2.47	2.35	2.4	2.3	2
índice de Wilcomb	2	2	2	2	2	2

**Tabla C13 Prueba de Jarreas del PACl a las 24 horas de proceso.**

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH		Color (U.C)		Aspecto
34.8		7.5		78		Verdoso
Tipo de Mezclado	tiempo (min)		velocidad (rpm)		volumen de jarras ( L)	
Mezcla rápida	1		80		1	
Mezcla lenta	15		10			
Sedimentación	30		0			
Dosis						
Corrida # 1 (24 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	22.9	18.5	16	15.3	14.8	13.4
pH	7.1	7.1	6.9	6.9	6.9	6.8
Color	34	32	28	26	22	21
tiempo de formación del floc (min)	2.05	1.98	1.9	1.9	1.7	1.4
índice de Wilcomb	2	4	4	4	4	6
Corrida # 2 (24 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	21.7	19	10	9.6	8.8	8.3
pH	7.2	7.1	7.2	7	6.9	6.9
Color	28	28	26	24	20	18
tiempo de formación del floc (min)	1.95	1.88	1.8	1.8	1.73	1.65
índice de Wilcomb	4	4	4	4	4	4
Corrida # 3 (24 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	22.3	21.1	20.6	20	19.1	18.3
pH	7.1	6.9	7.1	7.2	7	7.1
Color	43	42	42	41	41	40
tiempo de formación del floc (min)	2.13	1.97	1.9	1.87	1.82	1.74
índice de Wilcomb	2	4	4	4	4	4

**Tabla C14 Prueba de Jarreas del PACl a las 36 horas de proceso.**

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH	Color (U.C)		Aspecto	
34.8		7.5	78		Verdoso	
Tipo de Mezclado	tiempo (min)		velocidad (rpm)		volumen de jarras (L)	
Mezcla rápida	1		80		1	
Mezcla lenta	15		10			
Sedimentación	30		0			
Dosis						
Corrida # 1 (36 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	19.5	12.6	11.2	8.1	5	4.5
PH	7.1	7	7.1	6.9	6.9	6.8
Color	17	15	12	12	12	11
tiempo de formación del floc (min)	1.59	1.48	1.4	1.48	1.32	1.28
índice de Wilcomb	4	6	6	6	6	6
Corrida # 2 (36 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	10.5	8.9	7.2	6.2	2	1.1
PH	6.9	6.9	7	7.1	7.1	6.8
Color	12	10	7	6	7	7
tiempo de formación del floc (min)	1.35	1.28	1.2	1.19	1.12	1.1
índice de Wilcomb	6	6	6	8	8	8
Corrida # 3 (36 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	16.8	15.2	14.6	10.6	5.3	2.8
PH	7.1	7.1	7.1	6.9	7	7.1
Color	28	25	22	21	19	16
tiempo de formación del floc (min)	1.95	1.86	1.78	1.66	1.37	1.3
índice de Wilcomb	4	4	4	4	6	6

**Tabla C15 Prueba de Jarreas del PACl a las 48 horas de proceso.**

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH	Color (U.C)		Aspecto	
34.8		7.5	78		Verdoso	
Tipo de Mezclado	tiempo (min)		velocidad (rpm)		volumen de jarras ( L)	
Mezcla rápida	1		80		1	
Mezcla lenta	15		10			
Sedimentación	30		0			
Dosis						
Corrida # 1 (48 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	14.7	13.7	12.9	11.4	10.1	10.3
pH	7.1	7.1	6.9	6.9	7.1	7
Color	18	16	15	13	15	16
tiempo de formación del floc (min)	1.32	1.28	1.2	1.15	1.15	1.15
índice de Wilcomb	6	6	6	8	8	8
Corrida # 2 (48 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	13.3	12.7	10.6	8.9	7.7	7.3
pH	7	7.1	7	7	7.2	7.2
Color	15	13	12	9	9	11
tiempo de formación del floc (min)	1.38	1.25	1.2	1.18	1.11	1.11
índice de Wilcomb	6	6	8	8	8	8
Corrida # 3 (48 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	13.3	12.5	11.4	10.3	10.2	9.6
pH	7.1	7.1	7	7	6.8	6.8
Color	23	20	18	15	16	17
tiempo de formación del floc (min)	1.32	1.22	1.17	1.15	1.1	1.1
índice de Wilcomb	6	6	8	8	8	8

Tabla C16 **Prueba de Jarreas del PACl a las 60 horas de proceso.**

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH	Color (U.C)		Aspecto	
34.8		7.5	78		Verdoso	
Tipo de Mezclado	tiempo (min)	velocidad (rpm)		volumen de jarras ( L)		
Mezcla rápida	1	80		1		
Mezcla lenta	15	10				
Sedimentación	30	0				
Dosis						
Corrida # 1 (60 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	8.1	5.2	3.4	2.2	1.2	0.9
pH	6.8	6.8	6.7	6.7	6.7	6.6
Color	13	11	10	8	8	7
tiempo de formación del floc (min)	1.15	1.15	1.12	1.12	1.12	1.1
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8
Corrida # 2 (60 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	11.3	10.2	8.5	6.3	4.3	2
pH	7.1	7	7	7	6.9	6.8
Color	14	12	12	10	7	7
tiempo de formación del floc (min)	1.18	1.14	1.14	1.14	1.1	1.1
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8
Corrida # 3 (60 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	12.2	10.8	9.1	6.7	4.6	3.1
pH	6.9	7	6.9	6.9	6.8	6.8
Color	15	13	10	8	8	8
tiempo de formación del floc (min)	1.2	1.14	1.14	1.12	1.12	1.12
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8

Tabla C17 Prueba de Jarreas del PACl a las 72 horas de proceso.

Propiedades del agua en estudio(agua a tratar)						
Turbidez (NTU)		pH		Color (U.C)		Aspecto
34.8		7.5		78		Verdoso
Tipo de Mezclado	tiempo (min)		velocidad (rpm)		volumen de jarras (L)	
Mezcla rápida	1		80		1	
Mezcla lenta	15		10			
Sedimentación	30		0			
Dosis						
Corrida # 1 (72 Horas)	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	8.1	5.2	3.4	2.2	1.2	0.9
pH	6.8	6.8	6.7	6.7	6.7	6.6
Color	13	11	10	8	8	7
tiempo de formación del floc (min)	1.15	1.15	1.12	1.12	1.12	1.1
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8
Corrida # 2 (72 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	10	9.1	6.7	4.4	2.9	1.2
pH	7.1	7.1	7	7	6.9	6.8
Color	14	13	12	11	10	8
tiempo de formación del floc (min)	1.15	1.1	1.1	1.1		1.1
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8
Corrida # 3 (72 Horas)	5 ppm	10 pmm	15 ppm	20 ppm	25 ppm	30 ppm
Turbidez (NTU)	10.9	9.4	6.3	5.5	4.2	3
pH	7	7	6.9	6.8	6.7	6.7
Color	13	12	9	8	8	9
tiempo de formación del floc (min)	1.14	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
índice de Wilcomb	8	8	8	8	8	8