

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Evaluación de coagulantes químicos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Arly Kimberly Guerra Condori

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, agosto del 2022

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE COAGULANTES QUÍMICOS ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN CONDICIONES ALTOANDINAS”** del autor **Arly Kimberly Guerra Condori** tiene un índice de similitud de 17% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca a los 2 días del mes de agosto del año 2022.



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

176

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 02 día(s) del mes de agosto del año 2022, siendo las 12:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Nancy Lurasi Rafael, el secretario: Msc. Rose Adeline Gallata Chura y los demás miembros: Msc. Joel Gallata Gallata

y el asesor: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Evaluación de coagulantes químicos ($Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ y $Al_2(OH)_5Cl$) en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas

de el(los)/a(las) bachiller(es): a) Arly Kimberly Guerra Londoño
b)

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental
(Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(la)(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Arly Kimberly Guerra Londoño

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente
[Firma]
Asesor
[Firma]
Candidato(a) (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Secretario

Miembro

Candidato(a) (b)

DEDICATORIA

A Dios fuente de sabiduría

A mis queridos padres Nilda y Jefferson por su
amor y apoyo incondicional

A mis queridos hermanos Jossy, Joseph y Nayely

.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiar mis pasos para poder cumplir cada una de mis metas.

A mis amados padres por brindarme sus palabras de aliento y amor incondicional en todo momento e impulsarme a culminar la investigación.

Al Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, mi asesor, por haber sido guía y mentor para la realización de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

DECLARO:	ii
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE ANEXOS	11
SÍMBOLOS UTILIZADOS.....	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
CAPÍTULO I.....	15
EL PROBLEMA	15
1.1. Identificación del Problema	15
1.2. Justificación de la investigación.....	16
1.3. Presuposición filosófica	17
1.4. Objetivos.....	18
1.4.1. Objetivo general	18
1.4.2. Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO II.....	19
REVISIÓN DE LA LITERATURA	19
2.2. Fundamentos del objeto de estudio.....	19
2.2.1. Tratamiento de agua potable	19
2.2.2. Procesos dentro del tratamiento del agua.....	19
2.2.3. Zonas de Coagulación.....	22
2.2.4. Floculación.....	23
2.3. Tipos de floculación	23
2.3.1. Floculación Pericínética.....	24
2.3.2. Floculación Ortocinética	24
2.3.3. Factores Que Influyen En La Floculación:	24

2.3.4. Características Químicas.....	26
2.3.5. Características Biológicas.....	26
2.3.6. Legislación para el tratamiento de agua potable.....	27
2.3.7. Normas Nacionales	27
2.3.8. Normas Internacionales.....	28
2.4. Resultados anteriores de investigación	29
2.4.1. Antecedentes Internacionales	29
2.4.2. Antecedentes Nacionales.....	32
CAPITULO III	35
MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.1. Materiales, Insumos, Equipos y Formatos.....	35
3.1.1. Materiales	35
3.1.2. Equipos e Insumos.....	35
3.2. Métodos de Análisis y Procedimiento	36
3.2.1. Tipo de agua a utilizar en la Prueba de Jarras.....	36
3.2.2. Prueba de Jarras.....	36
3.2.3. Preparación de la solución de $Al_2(SO_4)_3$, PAC, Cloruro Férrico	36
3.2.4. Tipo de Investigación.....	37
3.2.5. Variables en Estudio	37
3.3. Esquema experimental de los Tratamientos.....	39
3.4. Análisis e Interpretación de Datos	40
3.4.1. Análisis Factorial con dos Factores	40
3.5. Esquema Procedimiento Experimental	41
3.5.1. Etapa Pre – Experimental.....	42
3.5.2. Etapa Experimental.....	42
3.5.3. Etapa Final (Gabinete)	42
CAPITULO IV.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43

4.1. Resultados de pruebas de sulfato de aluminio, PAC y Cloruro Ferrico a 10°C	43
5.1. Analisis de datos Estadistico	51
CAPÍTULO V.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1. Conclusiones.....	52
5.2. Recomendaciones.....	53
REFERENCIAS	54
ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Físico de Calidad de Agua para Consumo Humano.....	28
Tabla 2. Estándares de Calidad Ambiental de Agua	28
Tabla 3. Materiales que se Utilizaron en la Investigación	35
Tabla 4. Insumos y Equipos	35
Tabla 5. Diseño para los ensayos de Laboratorio	39
Tabla 6. Resumen Estadístico de la significancia de los factores en la remoción de la Turbidez	51
Tabla 7. Estadísticos de contraste ^{a,b}	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación Esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de Coloides mediante polímeros.....	21
Figura 2. Diagrama de Remoción de Turbiedad.....	22
Figura 3. Esquema de Procedimiento Experimental.....	41
Figura 4. Curva esquemática de Turbiedad vs concentración de Coagulante de Sulfato de Aluminio, PAC,Cloruro Férrico a 10°C	45
Figura 5. Curva esquemática de Turbiedad vs concentración de Coagulante de Sulfato de Aluminio, PAC,Cloruro Férrico a 15°C	47
Figura 6. Comportamiento del Potencial de Hidrogeno de Sulfato de Aluminio,PAC,Cloruro Ferrico a 10°C	49
Figura 7. Comportamiento del Potencial de Hidrogeno de Sulfato de Aluminio,PAC,Cloruro Ferrico a15°C	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos Experimentales a 10°C Y 15°C de prueba de jarras.....	56
Anexo 2. Método de prueba de jarras.	62
Anexo 3. Método para Potencial de Hidrogeno.....	69
Anexo 4. Resultados Estadísticos.....	70
Anexo 5. Panel Fotográfico de prueba de jarras.....	72

SÍMBOLOS UTILIZADOS

$\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	: Policloruro de Aluminio
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	: Sulfato de aluminio
CEPIS	: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia
ECA	: Estándares de Calidad Ambiental para Agua
FeCl_3	: Cloruro Férrico
IW	: Índice de Willcomb
LMP	: Limite máximos permisibles
mg/L	: Miligramo por litro, unidad de concentración (masa/volumen)
MINAM	: Ministerio del Ambiente
OMS	: Organización Mundial de la Salud
pH	: Potencial de Hidrógeno
rpm	: Revoluciones por minuto
UNT	: Unidades Nefelométricas de Turbidez

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de tres coagulantes químicos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas. El estudio evaluó la remoción de turbidez mediante la adición de diversas dosificaciones de los 3 coagulantes, se trabajó con una temperatura de 10°C y 15°C a escala de laboratorio, ciudad de Juliaca - Puno. La metodología empleada fue: “del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente”. La muestra de agua fue de 300 UNT. Para hallar la dosis optima de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ y FeCl_3 se usó un floculador de jarras. Los resultados obtenidos fueron: para el sulfato de aluminio a, 40 mg/L obteniendo un turbidez de 4 UNT, el PAC a 120 mg/L con una turbidez de 0.86 UNT, para FeCl_3 , 180mg/L con una turbidez de 1.2 UNT. Se determinó que el PAC reporta mejores porcentajes de remoción de turbiedad, hasta un 98.9% en comparación de los otros 2 coagulantes. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el D.S. 031-2010-SA. Concluyendo que es factible emplear estos coagulantes químicos como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ en el tratamiento de aguas para consumo humano en condiciones de temperaturas bajas como las que se presentan en el altiplano peruano viendo que el $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ y el FeCl_3 presentan mejores resultados bajo estas condiciones.

PALABRAS CLAVE: Coagulación, Floculación, Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, PAC, Turbiedad, pH.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the efficiency of three chemical coagulants $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 and $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ in the treatment of water for human consumption in high Andean conditions. The study evaluated the removal of turbidity by adding various dosages of the 3 coagulants, working at a temperature of 10°C and 15°C on a laboratory scale, city of Juliaca - Puno. The methodology used was: "from the Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences". The water sample was 300 UNT. To find the optimal dose of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ and FeCl_3 , a jar flocculator was used. The results obtained were: for aluminum sulfate a, 40 mg/L obtaining a turbidity of 4 UNT, the PAC at 120 mg/L with a turbidity of 0.86 UNT, for FeCl_3 , .180mg/L with a turbidity of 1.2 UNT. It was determined that PAC reports better percentages of turbidity removal, up to 98.9% compared to the other 2 coagulants. The values obtained are within the parameters established by D.S. 031-2010-SA. Concluding that it is feasible to use these chemical coagulants such as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 and $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ in the treatment of water for human consumption under low temperature conditions such as those found in the highlands Peruvian seeing that $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ and FeCl_3 present better results under these conditions.

Keywords: *Coagulation, Flocculation, Aluminum Sulfate, Ferric Chloride, PAC, Turbidity, pH.*

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del Problema

El tratamiento del agua es de vital importancia para garantizar la salud poblacional a nivel mundial. Para que un agua cumpla con la normativa de calidad debe pasar por una serie de procesos, los cuales garantizan la eliminación de distintas impurezas solubles e insolubles, no aptas para el consumo humano (OMS, 2005)

Por su parte, los procesos de coagulación y floculación, se encargan de eliminar partículas coloidales, sustancias húmicas y orgánicas, que producen color y turbiedad en el agua. El proceso de coagulación o mezcla rápida, inicia con la adición de una sal trivalente, la cual provoca la desestabilización de los coloides en suspensión por la colisión entre las cargas de las partículas. La floculación o mezcla lenta permite que las partículas ya desestabilizadas se aglomeren y ganen mayor peso específico, lo que permite su fácil sedimentación eliminando la turbiedad en el agua (Andía, 2000). Estos procesos son llevados a cabo mediante la adición de distintas sales trivalentes, siendo el más usado el sulfato de aluminio tipo B (CEPIS, 2004).

Sin embargo, el sulfato de aluminio ha sido muy cuestionado debido a que se le asocia con la enfermedad del Alzheimer, en la revisión realizada por Suay Llopis & Ballester Díez, (2002) se concluye que el sulfato de aluminio puede representar un problema para la salud pública, debido al almacenamiento del Aluminio en el cerebro a causa de una exposición continua, cuyos efectos ocurren a largo plazo, opinión compartida por Trejo & Hernández (2004).

Por otro lado, la presencia de aluminio residual en el agua generaría molestias en la población debido a la precipitación del floculo de hidróxido de aluminio en las tuberías

de distribución, lo que a su vez ocasiona el aumento de color en el agua por el hierro (WHO, 2012).

Mientras que, Flórez et al (2011) indica que el sulfato de aluminio provoca dificultades técnicas en cuanto a mantener estable el pH óptimo, si este parámetro no se encuentra dentro del intervalo adecuado, la clarificación del agua es baja, además de solubilizar el aluminio ocasionando variaciones en los valores de turbiedad, pH y alcalinidad, dureza u aluminio residual en el agua tratada.

Al mismo tiempo, existe cierta deficiencia de la eficacia de los coagulantes en condiciones altoandinas, debido a que una temperatura baja dificulta el proceso de coagulación y sedimentación del flóculo formado (Andía, 2000), resultando una remoción de turbiedad baja, debido a la anulación del movimiento browniano e incremento en la viscosidad del agua lo que dificulta la agitación pericinetica de las partículas, por lo que la floculación ortocinética es ineficiente (CEPIS, 2004).

Por lo antes expuesto, es necesario experimentar con nuevos insumos que resulten menos dañinos para la salud poblacional y que a su vez garanticen una eficiencia en los procesos de coagulación - floculación en condiciones altoandinas. Flórez et al., (2011), enfatiza que: “Son una nueva generación de coagulantes inorgánicos pre polimerizados incluyendo policloruros de aluminio (PAC’s), clorhidrato de aluminio (ACH) y polisulfatos de aluminio (PAS), los cuales han mostrado mejor desempeño que los coagulantes convencionales”. Siendo así, el objetivo de la presente investigación “evaluar las propiedades coagulantes de tres químicos (sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio) en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas”.

1.2. Justificación de la investigación

El objetivo principal de la potabilización del agua, es la protección de la salud pública; eliminando y reduciendo a una concentración mínima los componentes dañinos. Para ello la medición de características como turbiedad son fundamentales para conocer el grado de calidad del agua potable, con la presente investigación se contaría con un aporte hacia el cuidado de la salud que es uno de los temas de mayor jerarquía a nivel mundial. Asimismo, brindar un aporte hacia el conocimiento sobre la efectividad de distintos insumos químicos como agentes coagulantes y su eficacia en el tratamiento de agua potable en condiciones altoandinas. Por lo tanto, es importante optimizar los

procesos de tratamiento para reducir al mínimo la presencia de residuos químicos en el agua tratada, además de cumplir con el reglamento de calidad de agua para consumo humano.

1.3. Presuposición filosófica

Indudablemente el agua es un recurso fundamental para la supervivencia del ser humano, “Todos los manantiales vivos alimentan sus raíces, que si corona de frescura se divide a la distancia en medio de la llanura calcinada y desamparada; también que el viajero que siente morir acelera su paso para llegar hasta la sombra fresca y el agua vivificante que reconfortara al hombre” (White, 2013).

Sin embargo, con la llegada de la industrialización el agua se ha convertido en un bien explotado a gran escala, dejando muchos cuerpos de agua dulce prácticamente secos. Además, las industrias contaminan este recurso con la descarga de sus aguas residuales: Isaías 24:5 “La tierra se contaminó bajo sus moradores; porque traspasaron las leyes, falsearon el derecho y quebrantaron el pacto sempiterno”

Con esta gran problemática que aqueja a todas las naciones, se han realizado distintas investigaciones para recuperar la calidad del agua, con la aplicación de distintos insumos químicos o naturales, Génesis 1:31 “Dios entregó a la pareja edénica la tierra con la responsabilidad de labrarla y cuidarla”. creó la tierra para que fuese el hogar del hombre y goce de la creación del señor en todos sus aspectos. Según Génesis (2:15) “Y Jehová Dios procedió a tomar al hombre y a establecerlo en el jardín del edén para que lo cultivara y lo cuidara”.

En la biblia podemos encontrar muchos versículos que hablan del agua, de su importancia, su significado y sus beneficios para el desarrollo de la vida de las personas.

La problemática sobre la contaminación de aguas y la pérdida de su calidad es un factor que está perdurando en la actualidad, es por ello que la humanidad está impulsando estrategias para restaurar los recursos naturales que Dios creó mediante tecnologías innovadoras amigables con el medio ambiente, ya que Dios nos creó con el propósito de cuidar su creación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar los coagulantes químicos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración y dosis optima de tres coagulantes químicos (Sulfato de Aluminio, Cloruro Ferrico y Policloruro de Aluminio) mediante prueba de Jarras.
- Desarrollar las curvas esquemáticas de remoción de turbiedad y pH en función de la dosis óptima para los tres químicos (Sulfato de Aluminio, Cloruro Ferrico y Policloruro de Aluminio) con una temperatura de 10 °C y 15°C.
- Comparar los resultados de los parámetros analizados (pH, Turbiedad, Índice de Willcomb, Tiempo de formación del Floc) del agua tratada, con el reglamento de calidad del agua para consumo humano.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.2. Fundamentos del objeto de estudio.

2.2.1. Tratamiento de agua potable

Las plantas de tratamiento cuentan con distintos equipos electrónicos y mecánicos, que realizan diversos procesos para eliminar agentes patógenos e impurezas perjudiciales para la salud humana. Con todo esto se garantiza la producción de un agua potable óptima para el consumo humano. Para lograr este objetivo el agua debe pasar por diversos procesos: sistema de rejillas, desarenadores, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Sunass, 2004).

2.2.2. Procesos dentro del tratamiento del agua

A) Coagulación

El proceso de coagulación consiste en añadir una sal trivalente al agua cruda en una dosis óptima, lo que garantiza la neutralización de la carga, adsorción y atrapamiento de la partícula suspendida. Esta acción genera que la partícula gane un mayor peso específico facilitando su rápida sedimentación, dejando un agua más clara. Para que este proceso se lleve a cabo eficazmente en una planta de tratamiento se debe evaluar la dosis y pH óptimos a pequeña escala, con la ayuda de un equipo de prueba de jarras. Primeramente, se evalúan dosis crecientes del coagulante, la dosis óptima es aquella que alcanzó una reducción suficiente de turbiedad y color. Los valores de pH óptimos pueden evaluarse de forma similar, modificando este parámetro. La coagulación asegura la eliminación de sustancias orgánicas unidas a materia húmica o adsorbidas sobre partículas (OMS, 2006).

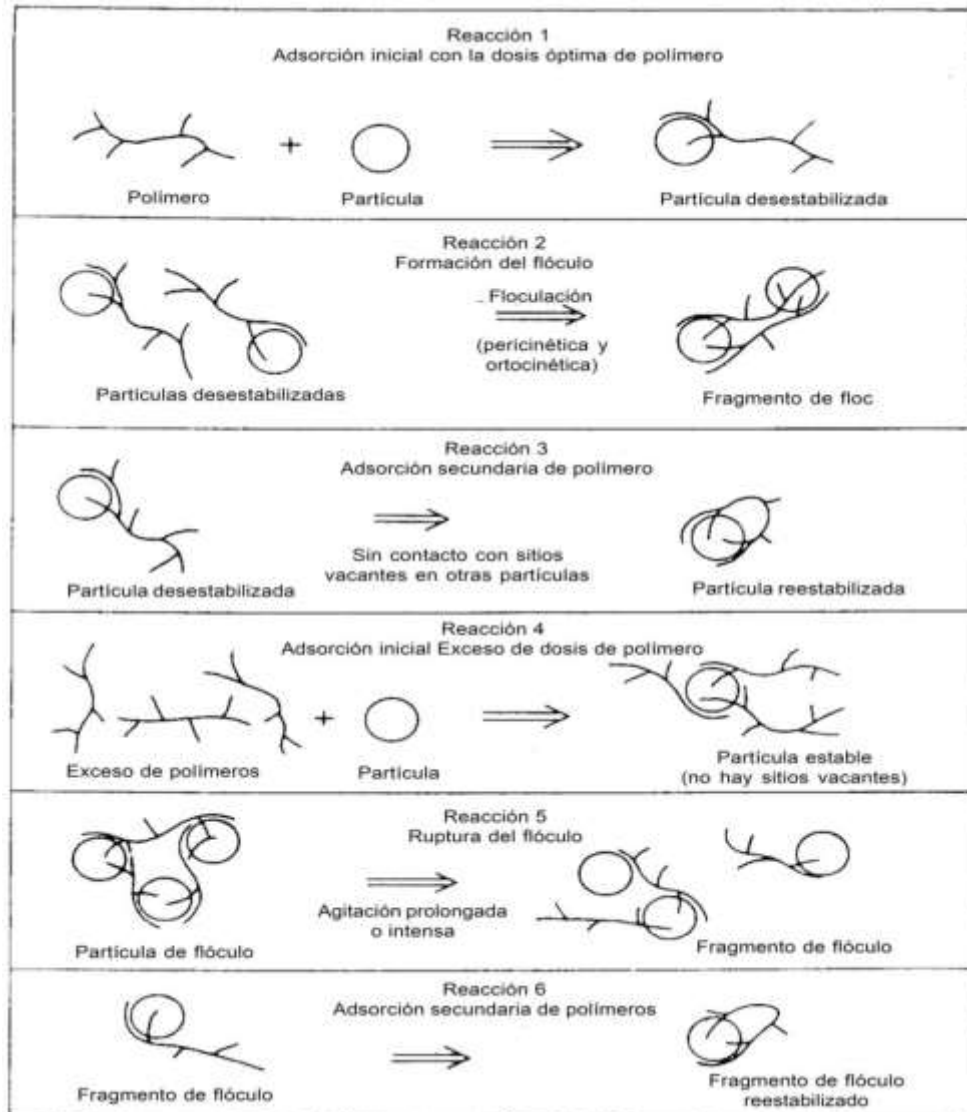
Mecanismos de coagulación

Estos mecanismos resultan de la alteración de la fuerza iónica por la acción de sales de aluminio o hierro sobre las partículas coloidales o sustancias húmicas presentes en el agua cruda (CEPIS, 2004).

- **Compresión de la doble capa:** Este fenómeno obedece a la desestabilización coloidal por la acción de un coagulante, el cual genera la reducción de la repulsión eléctrica entre partículas por la conversión de cargas, generando que estas se acerquen con ayuda de la energía de Van der Waals.
- **Adsorción y neutralización:** En esta fase la formación de complejos hidroxilados formados por dosis bajas de aluminio puede ser adsorbidos por los coloides provocando la desestabilización, a mayores dosis de coagulantes las partículas coloidales se reestabilizan.
- **Barrido:** Esta acción ocurre cuando se sobrepasan la solubilidad de los hidróxidos metálicos, lo que provoca una rápida sedimentación.
- **Adsorción y formación del puente:** Se sigue un total de seis reacciones para explicar este mecanismo: primero: el polímero interactúa con la superficie de las partículas coloidales en suspensión. Segundo: si existiera alguna partícula con sitios de adsorción vacíos, puede unirse a la primera. Tercero: al no existir partículas libres el polímero se dispersa y adsorbe a la partícula original produciendo la reestabilización de partículas. Cuarto: La superficie de la partícula original ya se encuentra saturada. Quinto-Sexto: Una intensa agitación rompe las uniones coloidales o reestabiliza las partículas.

Figura 1.

Representación Esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de Coloides mediante polímeros.



Fuente: CEPIS (2004).

2.2.3. Zonas de Coagulación

Durante la etapa del proceso de coagulación, la reacción del coagulante con el agua genera la presencia de distintas zonas (Andía,2000).

Zona 1: Si la dosis de coagulante no es la óptima, no se produce la coagulación.

Zona 2: Con la aplicación de una dosis óptima se produce la aglutinación de los coloides.

Zona 3: Al elevar la dosis de coagulante, los coloides se reestabilizan y no se produce la coagulación.

Zona 4: Aplicando dosis aún más elevadas de coagulante se produce una supersaturación, provocando la precipitación del coagulante haciendo un efecto de barrido, arrastrando las partículas suspendidas.

Figura 2.

Diagrama de Remoción de Turbiedad



Fuente: (Andía, 2000)

Factores que influyen en la coagulación

Ciertos parámetros y características intervienen en el proceso de coagulación y floculación, para Barrera (2014) estos factores serían los siguientes:

- **Temperatura:** Una temperatura baja produce el aumento de la viscosidad del agua lo que dificulta la agitación pericinéctica de las partículas, anulando a su vez la floculación ortocinéctica, no siendo posible la aglomeración de las partículas menores a un micrón.
- **Características del agua cruda:** El proceso de coagulación se lleva de manera eficiente en agua con turbiedades altas y que además presente una alta gama de partículas, lo que facilitaría las reacciones químicas con el coagulante.
- **pH:** Cada insumo químico tiene un pH óptimo, si el agua a tratar no cuenta con un adecuado pH puede requerirse altas dosis de coagulante.
- **Dosis óptima del coagulante:** La aplicación de dosis bajas de coagulante no aseguran la neutralización de las cargas coloidales. Y la aplicación de dosis altas de coagulante genera la reestabilización de la carga coloidal provocando que la sedimentación dure mucho tiempo, por lo que la remoción de turbiedad en ambos casos es mínima.
- **Influencia de la mezcla:** Aplicar una agitación homogénea garantiza que el coagulante se disperse de manera uniforme, lo que asegura la reacción química con las partículas coloidales en suspensión.
- **Alcalinidad:** Se relaciona con el pH, convirtiéndose en otro factor importante en la coagulación.

2.2.4. Floculación

Este proceso inicia después de añadido el coagulante y finalizado la mezcla rápida. Aquí es necesario dotar una mezcla lenta que garantice la formación de flóculos sedimentables y evitar que se rompan (Andia, 2000).

2.3. Tipos de floculación

Se presentan dos tipos de floculación, los cuales serán descritos a continuación:

2.3.1. Floculación Pericínética

Este tipo de floculación consiste en el movimiento de partículas que se produce por medio del movimiento browniano; la floculación Pericínética sólo influye en partículas con tamaños inferiores a un micrón, es decir que sólo actúa al inicio del proceso de floculación.

2.3.2. Floculación Ortocinética

Este tipo de floculación se genera a partir del movimiento que las partículas realizan a diferentes direcciones y velocidades, lo cual aumenta la probabilidad de colisión entre las mismas; la floculación ortocinética ocurre después de la pericínética.

2.3.3. Factores Que Influyen en La Floculación:

- ***Tiempo de detención***

La velocidad de aglomeración de las partículas se encuentra directamente relacionada con el tiempo de detención de las mismas.

- ***Gradiente de velocidad***

El gradiente de velocidad es un factor que depende de la velocidad de aglomeración de las partículas objetivo del tratamiento y tiene un límite máximo permitido que evita el rompimiento del floc.

- ***Concentración y naturaleza de las partículas***

La velocidad como se genere el floc, es directamente proporcional tanto a la concentración de partículas presentes en el recurso a tratar como del tamaño inicial de las mismas.

B) Sedimentación

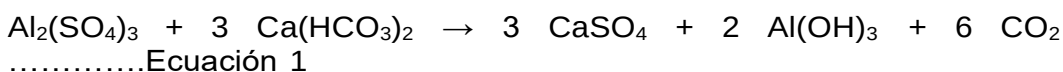
Una vez terminado los procesos de coagulación-floculación es necesario que el agua tratada se mantenga en reposo, con la finalidad de que los flóculos formados puedan sedimentar, dejando un agua libre de turbiedad y color (CEPIS, 2004).

C) Insumos usados en los procesos de coagulación-floculación

Según el CEPIS (2004), los productos químicos más usados en el tratamiento de agua son el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , el sulfato ferroso y férrico y el cloro-sulfato férrico, los cuales se describen a continuación.

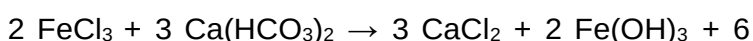
- **Sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$:** Este insumo puede estar en forma sólida o líquida, es derivado de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas tienden a ser muy ácidas (2 y 3.8). En las pruebas de laboratorio es recomendable emplear soluciones con los coagulantes que se emplean en las plantas y no reactivos purificados de laboratorio. La solución patrón debe prepararse a una concentración de 10 % y renovarse después de 1 ó 2 meses.

Reacción química del sulfato de aluminio con la alcalinidad:



- ✓ **Cloruro férrico FeCl_3 :** Se puede adquirir en forma sólida o líquida, siendo la forma líquida más usada en las plantas de tratamiento, es muy corrosivo frente al acero. Al igual que el sulfato de aluminio es recomendable no usar un reactivo purificado en laboratorio, la solución patrón también debe prepararse al 10 % de concentración.

Reacción química del sulfato de aluminio con la alcalinidad:



CO_2Ecuación 2 Ambos insumos reaccionan con la alcalinidad

y pH del agua por lo cual muchas veces es necesario modificar estos parámetros. Para elevar la alcalinidad se puede aplicar hidróxido de calcio- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Carbonato de sodio- Na_2CO_3 , bicarbonato sódico- NaHCO_3 . Y para elevar el pH se puede aplicar hidróxido de sodio (NaOH), ácido clorhídrico-HCl, Ácido sulfúrico H_2SO_4 , entre otros.

- ✓ **Policlорuro de aluminio (PAC):** Es un coagulante que se ha investigado en los últimos años para aplicaciones en plantas de tratamiento, debido a su alta carga eléctrica y masa molecular. Este insumo se encuentra en forma líquida y puede ser preparado a partir de sustancias que contengan aluminio (Garcés,

2010). En la investigación hecha por Exall, Kristen, Vanloon & Gary (2000), se muestra que el PAC es más resistente a las variaciones de temperatura del agua que la alúmina.

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas, dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios (Bochkarev, Kurbatov, & Kondrat'ev, 2003):

- ✓ Dímeros: $[\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8]^{4+}$
- ✓ Complejos polihidroxilo: $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{22}]^{2+}$,
 $[\text{Al}_8(\text{OH})_{24}]$, $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$, $[\text{Al}_{14}(\text{OH})_{38}]^{8+}$,
 $[\text{Al}_{30}\text{Cl}_9(\text{OH})_{81}(\text{H}_2\text{O})_{38}]^{5+}$
- ✓ Compuestos complejos: $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}(\text{H}_2\text{O})_{10}]\text{Cl}_4$
- ✓ Partículas y agregados en forma original del PAC.

Beneficios del PAC:

- ✓ Deja menos aluminio residual en el agua tratada
- ✓ Remueve mejor la turbiedad y color
- ✓ Reducción de lodos de un 25-75%
- ✓ Menor costo de operación

2.3.4. Características Químicas

Diversos compuestos se encuentran disueltos en el agua, procedentes de la naturaleza o la actividad industrial. Pueden resultar beneficios o dañinos considerando su composición y el nivel de concentración a la que se encuentran dichos compuestos. Una cantidad elevada de hierro y magnesio causa color en el agua. La dureza se debe a la presencia de calcio y magnesio y un agua dura requiere gran cantidad de jabón para producir espuma Henry & Heinke (1999).

2.3.5. Características Biológicas

Existen microorganismos en el agua de origen natural, otros deben su presencia al vertido de agua residuales o por el lavado de suelos contaminados por las

precipitaciones. Las características físicas y químicas del agua interfieren en el desarrollo microbiológico, por ejemplo, una temperatura cálida hará que la materia orgánica se desarrolle más rápido. La presencia de hongos, mohos y levaduras indican que existe materia orgánica en descomposición. En tratamiento de aguas se deben considerar la eliminación de algas y bacterias (Barrera, 2014).

2.3.6. Legislación para el tratamiento de agua potable

- **Estándar de calidad ambiental (ECA)**

ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes agua, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente, y según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (MINAM, 2005).

Mediante Decreto Suprema D.S. N° 004-2017-MINAM, se establecieron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, con la finalidad de tener los niveles y/o concentraciones optimas y adecuadas para el agua en sus cuatro categorías, sin que estas signifiquen ningún riesgo para las personas, fauna acuática o actividades que se realicen a base de este recurso. Este D.S brinda los valores consolidados para los parámetros de turbidez, pH, temperatura, etc.

2.3.7. Normas Nacionales

En el Perú, hay un marco legal relacionado al cuidado del medio ambiente y al tratamiento de las aguas residuales.

- **Constitución política del Perú**_(1993): Capitulo II, Artículo 7-A, Toda persona tiene derecho de acceder al agua potable y al mismo tiempo el estado promueve el manejo sostenible de este recurso.
- **Ley 26338 - Ley General de Servicios de Saneamiento, 1994:** Los servicios de saneamiento son de necesidad y utilidad pública de interés nacional, y tiene la finalidad de proteger la salud de la población y el ambiente. Además de garantizar la continuidad y calidad del servicio que presta.

- **Reglamento de la calidad de agua para consumo humano D. S N° 031-**

2010-SA: Dicho reglamento se aprobó con el fin de gestionar, vigilar, controlar, supervisar y fiscalizar los requerimientos físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos del agua para consumo humano, además de difundir y acceder a esta información (MINSA, 2011).

La finalidad del Reglamento es la disposición con relación a la gestión de la calidad del agua para consumo humano con la finalidad de garantizar su inocuidad, prevenir los factores de riesgos sanitarios, así como proteger y promover la salud y bienestar de la población.

Tabla 1

Parámetros físicos de calidad de agua para consumo humano

Parámetros	Unidad de medida	LMP
Turbiedad	UNT	5
Temperatura	°C	-----
Ph	Valor de Ph	6.5 – 8.5

Fuente: DS N° 031-2010-SA.

Nos muestra parámetros físicos del reglamento de la calidad del agua para consumo humano como la turbiedad, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

- ***Decreto Supremo N°004-2017-MINAM. ECA para agua potable.***

En la tabla 2 se presenta los ECA para agua potable, el decreto supremo brinda los valores consolidados para los parámetros de turbidez, pH, temperatura, etc.

Tabla 2.

Estándares de Calidad Ambiental de Agua

		AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS A LA PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE		
		A1	A2	A3
PARAMETRO	UND			

		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
Fisicoquímicos				
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de PH	6,5-8,5	5,5-9.0	5,5-9,0
Temperatura	°C	3	3	**
Turbiedad	UNT	5	100	**

Fuente: DS. N°004-2017 MINAM.

2.3.8. Normas Internacionales

- **Norma Española - Real Decreto 902/2018. Establecen los Criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.**

Donde se establecen que se realice una evaluación de riesgos, basándose en las Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud o normas internacionales tales como UNE-EN 15975-2, relativa a la “Seguridad en el suministro de agua potable. Directrices para la gestión del riesgo y las crisis”, donde nos dice que la Turbidez del agua debe ser de 1,0 UNF (Unidad Nefelométrica de Turbidez) de conformidad con la norma UNE-EN ISO 7027.

- **Norma Chilena – NCh 409/1 de 2005 Agua Potable.**

Se establece que los valores para el tipo I agua para consumo humano establece que la Turbidez del agua debe ser menor o igual a 2.UNT para asegurar la inocuidad del agua para consumo Humano.

2.4. Resultados anteriores de investigación

2.4.1. Antecedentes Internacionales

En los últimos años, diversos autores han investigado distintos insumos químicos

que puedan ser empleados en los procesos de coagulación-floculación.

Cerón (2016) realizó una investigación que tuvo como objetivo “evaluar el comportamiento de los coagulantes y determinar la dosis óptima en función de parámetros de turbiedad para la potabilización de agua de la planta de EMPOOBANDO E.S.P” (p. 21). Se preparó concentraciones al 10% p/v de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ TIPO B sólido y 10% v/v para PAC, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ TIPO B líquido y FeCl_3 . Se realizó un muestreo simple del río Blanco entre los meses de abril a agosto y diciembre. Los parámetros iniciales fueron: pH=7.01-8.40, turbiedad= 4.00-25.60 UNT y color= 19.80-30.60 UPC. Con un equipo de prueba de jarras se evaluó cinco dosis: 10, 20, 30, 40 y 50 ppm para los cuatro insumos. El PAC mostro mejores resultados en cuanto a remoción de turbiedad (1 UNT), con una dosis óptima de 20 ppm, el pH no reporto variación con respecto al inicial debido a la acción buffer del PAC, para los otros tres insumos la dosis óptima fue de 30 y 40 ppm obtenido una remoción de 40 ppm.

Otra investigación relacionada al tema fue llevada por (Perez ,2017) con el objetivo de “evaluar la sustitución de un agente coagulante en el proceso de coagulación-floculación en la potabilización de agua en la empresa EAF SAS ESP” (p.21). Empleando, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ líquido, PAC líquido y FeCl_3 al 1%. La muestra de agua cruda tuvo valores iniciales de: 2.19 a 3.54 UNT de turbiedad, 23.1 a 30.1 Los ensayos de prueba de jarras se realizaron en distintas repeticiones y dosis para cada insumo. La dosis óptima para el $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ fue de 8 mg/L con una remoción de turbiedad de 92% y aluminio residual menor a 0.2 mg/L. El PAC reporto valores de turbiedad por debajo de la norma debido a la adición de cal, disminuyendo también el pH. Con el FeCl_3 se obtuvo remociones de turbiedad de 88% a dosis de 10 mg/L y hierro residual por debajo del LMP. Se concluye que el $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ es la mejor alternativa de sustitución frente al sulfato de aluminio en cuanto a dosis y costos de operación que este implica.

De manera semejante, Bermúdez, Ramírez, & Moya, (2009), llevaron a cabo su investigación con el fin de “evaluar el proceso de coagulación-floculación a escala de laboratorio cuando se emplea como agua residual madre la obtenida a la salida del proceso de tratamiento biológico en la textilera Desembarco del Granma de Villa Clara”. El ensayo de prueba de jarras se realizó a dosis 20, 40, 60, 80, 100 mg/L para el sulfato de aluminio y de 40, 80, 120, 160, 200 mg/L para el cloruro férrico hexahidratado, variando el pH de 4 a 9 unidades. Se obtuvo una remoción de 94.89 % de turbiedad a pH de 7 y dosis de 40 mg/L para el sulfato de aluminio. La remoción con el cloruro férrico fue de 77.5 % y 80 % a pH de 4 y 5 respectivamente y dosis de 40 mg/L. Se concluye que el sulfato de aluminio reporta mejores resultados en remoción de turbiedad. Así mismo el proceso de coagulación se lleva mejor a pH cercanos al neutro, y a medida que se incrementa la dosis de coagulante disminuye el porcentaje de remoción de turbiedad.

En la investigación de Murillo (2011), se tuvo la finalidad de “determinar la influencia de los coagulantes: sulfato de aluminio líquido (SAL) y policloruro de aluminio (PAC), de diferentes casas productoras, en el aluminio residual del agua tratada” (p. 20). Se tomaron muestras del río Otún, fuente de provisión de la PTAP, con valores iniciales de: 2.30 UNT a 41.50 UNT y pH= 7.38 a 8.10. Para determinar la dosis óptima se usó un equipo de jarras, aplicando distintas dosis para cada insumo. La remoción de turbiedad y pH con SAL de las tres casas productoras no varió mucho en sí. Se obtuvieron valores de remoción entre el 50 % y el 80% a turbiedades mayores a 8 UNT. Los valores de pH varían de 6.38 a 7.19, debido a las reacciones del Al^{+3} con el agua. Con respecto al aluminio residual para el proveedor A hay 6 aluminios fuera de la norma, 8 para el B y 7 para el C. De los 30 ensayos con PAC 14 se encuentran salidos de la norma para la turbiedad, 7 de ellos son del proveedor C, el pH no presentó variaciones, el PAC del proveedor C presenta aluminios residuales más altos en una de

las pruebas.

Por otro lado, Paz, (2010) tuvo el objetivo de “determinar la dosis de reemplazo mínima de Policloruro de Aluminio como ayudante de coagulación que permita un buen desempeño” (p.20). Se trabajó con dos niveles de turbiedades entre 2 a 43.3 UNT y un color de 20 a 235 UPC, se aplicó dosis de 15,18 y 23 ppm de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y se combinaron con 6 y 8 ppm de PAC. Los resultados después de la prueba de jarras mostraron que la dosis optima de remplazo es de 23 ppm de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ con 8 ppm de PAC, obteniendo una turbiedad de 2 UNT.

En este mismo orden de ideas se puede citar a Alvarado, Pérez, & Saba, (2015), quienes llevaron a cabo una investigación con la finalidad de “implementar el coagulante policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio líquido para mejorar el proceso de potabilización” (p, 35). Para determinar la dosis óptima de los coagulantes se realizó prueba de jarras. El $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se dosificó entre 10 y 60 ppm, y el PAC en variaciones de 5 a 30 ppm, en una jarra de 1000 ml. Los resultados indicaron que la dosis óptima para el PAC fue de 20 mg/L y para el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 60 mg/L. Las dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y PAC fueron de 40-5 mg/L, 30-7 mg/L y 20-10 mg/L respectivamente. Además, se comprobó que el PAC tiene mejor eficiencia que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, en la remoción de turbiedad.

Una investigación semejante fue desarrollada por Castrillón & Giraldo (2012), con la finalidad de “determinar la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio TIPO B en función de la turbiedad y el color, para potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana” (p. 4). Para lo cual, se tomaron muestras del río Otún en los meses con mayor variedad climática (diciembre-mayo), analizando un número de muestras diferente para cada mes. La dosis óptima para una turbiedad de 30 UNT fue de 36 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; para 60.9 UNT fue de 35 mg/L y 48 mg/L para una

turbiedad inicial de 121 UNT. Mientras que para 230 UNT se requiere 51 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y para las turbiedades de 303 UNT y 689 UNT se requirieron dosis de 43 mg/L y 73 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ respectivamente. Se concluyó que el sulfato de aluminio es un coagulante efectivo, debido a que presento buenos porcentajes de remoción de turbiedad.

2.4.2. Antecedentes Nacionales

En Peru Zerbato (2009), desarrollaron una investigación con el objetivo de “determinar las mejores condiciones de pH, concentración de coagulante y floculante en la disminución de los porcentajes de turbiedad del efluente proveniente del lavado de pulpa de planta papelera TRUPAL S.A” (p.34). Se midieron los valores iniciales de turbiedad (1886.5 UNT), pH (4.01) y temperatura (45 °C) del efluente de la planta. Con el equipo de jarras se evaluó el pH óptimo (4.01, 5.32 y 6.55), dosis óptima (400, 500, 600, 700 y 800 ppm) y floculante óptimo a 4 ppm de concentración, se aplicó $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y PAC como coagulantes en una concentración de 1%. Para ambos compuestos el pH óptimo es el original (pH= 4.01), la dosis óptima es de 500 ppm y el floculante óptimo es catiónico, obteniendo valores de turbiedad final de 28.37 UNT para el PAC y 92.04 UNT para el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Se concluye que el PAC obtiene mejores resultados.

En la investigación realizada por Samame (2016), se tuvo como objetivo “determinar la influencia de los coagulantes: sulfato de aluminio tipo B 500 y policloruro de aluminio (PAC), en el aluminio residual del agua tratada del distrito de Pedro Ruiz Gallo” (p.6). Para lo cual se tomaron muestras de agua del punto de captación de la planta de tratamiento, en épocas de avenida y estiaje. Para hallar la dosis óptima de los coagulantes se realizó prueba de jarras aplicando cantidades de 1,1.3,1.4,1.5,1,1.5 y 1.5 g de PAC y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Se obtuvieron valores finales de turbiedad dentro del D.S N° 031-2010 S.A para ambos insumos. Caso contrario paso con el pH final, que reporto valores en cuatro ensayos muy por encima de la norma y

tres muy por debajo, pese a esto el PAC resultaría más eficiente que el $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3$ para el tratamiento de agua potable.

Por su parte, Claros (2015), desarrollo el objetivo “evaluar los efectos de polihidroxicloruro de aluminio, velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río Shullcas en la localidad de Huancayo, en el año 2013” (p.21). La toma de muestra se realizó a 1 km antes del ingreso a la planta de tratamiento de Vilcacoto. La muestra presento una turbiedad inicial de 24.48 UNT a 28.02 UNT y pH de 8.2 a 7.33. Con el equipo de prueba de jarras se experimentó los procesos de coagulación-floculación utilizando una concentración de 20 ppm de PAC para todos los ensayos. Las dosis aplicadas fueron de 10 y 50 ml, velocidades de agitación de 50 y 100 rpm y pH de 6 y 7. Se obtuvo una remoción de 86.67 % de turbiedad con 50 ml de PAC, pH=7 y una velocidad de agitación de 100 rpm.

Pérez (2015), tuvo el objetivo de “optimizar la dosificación de sulfato de aluminio con la evaluación de turbiedad y color en el tratamiento de agua potable para el distrito de Vilcacoto”. Las muestras a analizar fueron recogidas en los días lluviosos por un periodo de 4 meses. Razón por la cual los valores de los parámetros presentaron rangos de variación: turbiedad de 8.2 UNT a 894.2 UNT; color 13 UPC a 112 UPC y pH de 7.99 a 8.42. Los ensayos que prueba de jarras se realizaron a dosis de 10, 13, 16, 19, 21, 24, 26, 30, 32, 36, 40 42, 44, 48, 50, 52, 60, y 62 mg/L de sulfato de aluminio. Las dosis óptimas más representativas fueron de 24 mg/L para una turbiedad de 16.5 UNT, 16 mg/L para 20.5 UNT, 36 mg/L para 45.5 UNT, 40 mg/L para 89.1 UNT, 36 mg/L para 83.4 UNT y 24 mg/L para 19.7 UNT. Se obtuvo porcentajes de remoción de turbiedad y color promedio de 96.55% y 96.63% respectivamente. Así mismo para ambos parámetros los resultados se encontraron dentro del D.S 031-2010-SA.

De manera similar, Galindo (2018), desarrollo su investigación bajo el objetivo de “determinar la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio para el tratamiento de agua potable Yurajhuanza de manera que cumpla los estándares de turbiedad según lo establecido en el reglamento de calidad para agua de consumo humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA)” (p.4). Se tomaron muestras de agua superficial del canal Gashan durante periodos de precipitación y estiaje. Para determinar la dosis óptima del sulfato de aluminio se realizó ensayos de prueba de jarras, evaluando las siguientes dosis 25, 27, 34, 30 mg/L. Se obtuvieron valores de turbiedad y pH dentro del D.S N° 031-2010-S.A, para todos los meses. También se pudo constatar que a turbiedades bajas es necesario aplicar dosis altas de coagulante, mientras que a turbiedades altas se requieren menos dosis de coagulante.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales, Insumos, Equipos y Formatos.

3.1.1. Materiales

Los materiales y equipos que se utilizaran se muestran a detalle en la tabla número 3 y 4.

Tabla 3.

Materiales que se Utilizaron en la Investigación

Materiales	Cantidad	Unidad
Bagueta	1	Unid
Espátula.	1	Unid.
Fiolas de 100 ml	6	Unid.
Jeringas.	24	Unid.
Luna de reloj	3	Unid.
Sifones	6	Unid.
Vasos precipitados de 1 000 ml	6	Unid
Vasos precipitados de 50 ml	6	Unid

3.1.2. Equipos e Insumos

Tabla 4.

Insumos y Equipos

Materiales	Cantidad	Modelo	Marca
Sulfato de Aluminio	1 kg	-	-
Cloruro férrico	1lt	-	-
Policloruro de aluminio	1lt	-	-
Turbidímetro	1	Modelo TB1	Marca VELP SCIENTIFICA
Equipo de prueba de jarras	1	Modelo JLT6 Serie	Marca VELP
pH metro Potenciómetro de mesa	1	Modelo Mi 150	MILWAUKEE

3.2. Métodos de Análisis y procedimiento

3.2.1. Tipo de agua a utilizar en la prueba de jarras

Para el desarrollo de las pruebas se preparó un agua artificial con arcilla a una turbiedad de 300 UNT a una temperatura de 10 °C y 15°C los cuales se mantuvieron constantes.

3.2.2. Prueba de Jarras

La presente, para la prueba de jarras se usó la metodología de CEPIS(2004), , la cual se describe a continuación:

Adquisición: Se adquirió 3 Coagulantes

Preparación de las soluciones: Se procedió a preparar la muestra patrón al 10%, posteriormente se realizó una solución al 1% con la cual se trabajó las dosis para cada coagulante.

Mezcla Rápida: Se realizó a 300 rpm por 5 s tal como lo indica el CEPIS

Mezcla Lenta: Se realizó a 40 rpm por 20min

Sedimentación: Una vez culminado el proceso de la mezcla lenta se procede a colocar los sifones, para posteriormente dejar sedimentar por 20min, para posteriormente realizar la toma de muestra.

3.2.3. Preparación de la solución de $Al_2(SO_4)_3$, PAC, Cloruro Férrico.

3.2.3.1. Preparación de $Al_2(SO_4)_3$

Para esta fase se siguió lo descrito en la guía del CEPIS, el cual se detalla en el

Anexo 2.

3.2.3.2. Preparación del PAC

Policloruro de Aluminio líquido (10%v/v), Pesar 10g del Policloruro de Aluminio (PAC) Tomar la densidad del Policloruro de Aluminio para determinar el volumen en ml de Policloruro correspondiente a 10g. $\rho_{45} = 1,20 \text{ g/ml}$

$$\rho = m V \rightarrow V = m \rho \rightarrow V = 10 \text{ g } 1,20 \text{ g/ml} \rightarrow V = 8,33 \text{ ml}$$

Dónde: ρ = densidad del compuesto, V = volumen del compuesto a emplear en el ensayo de jarras, m = masa inicial del compuesto.

Posteriormente Disolvemos los 8,33 ml calculado de Policloruro de Aluminio en agua destilada hasta completar un volumen de 100 ml, agitamos y dejamos reposar 5 minutos antes de utilizar (Perez,2017)

3.2.3.3. Preparación del Cloruro Férrico FeCl_3 .

Cloruro Férrico (10%v/v) Pesar 10g de Cloruro Férrico (líquido). Tomar la densidad del Cloruro Férrico para determinar el volumen en ml de Cloruro Férrico correspondiente a 10g. $\rho = 1,45 \text{ g/ml}$

$$\rho = m V \rightarrow V = m \rho \rightarrow V = 10 \text{ g } 1.45 \text{ g/ml} \rightarrow V = 6,90 \text{ ml}$$

Dónde: ρ = densidad del compuesto, V = volumen del compuesto a emplear en el ensayo de jarras, m = masa inicial del compuesto.

Posteriormente disolver los 6,90 ml calculados de Cloruro Férrico en agua destilada hasta completar un volumen de 100ml Agitar y dejar reposar 5 minutos antes de utilizar.

Soluciones al 10% Para cada una de las soluciones madre realizadas al 10%, se toma una alícuota de 10 ml y se realiza aforo hasta completar 100 ml con agua destilada, se agita vigorosamente y se deja reposar durante 5 minutos antes de utilizarla. Esta solución debe prepararse diariamente porque puede permitir la formación de otros compuestos.

3.2.4. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental, se manipuló la variable independiente para determinar la eficacia de los tres coagulantes en condiciones alto andinas.

3.2.5. Variables en Estudio

- Variable Dependiente:

- Turbidez final
 - pH final
- Variable Independiente:
 - Coagulantes
 - Condiciones
 - altoandinas
- Variables fijas
 - Turbiedad inicial
 - pH inicial
 - Temperaturas
 - Dosis de los coagulantes

3.3. Esquema experimental de los tratamientos

Tabla 5.

Diseño para los ensayos de Laboratorio

Dosis (mg/L)	TRATAMIENTOS																	
	Tratamiento 1: Sulfato de aluminio a 15°C			Tratamiento 2: Policloruro de aluminio a 15°C			Tratamiento 3: Cloruro Férrico a 15°C			Tratamiento 4: Sulfato de Aluminio a 10°C			Tratamiento 5: Policloruro de Aluminio a 10°C			Tratamiento 6: Cloruro Férrico a 10°C		
D1	T1-D1-R1	T1-D1-R2	T1-D1-R3	T2-D1-R1	T2-D1-R2	T2-D1-R3	T3-D1-R1	T3-D1-R2	T3-D1-R3	T4-D1-R1	T4-D1-R2	T4-D1-R3	T5-D1-R1	T5-D1-R2	T5-D1-R3	T6-D1-R1	T6-D1-R2	T6-D1-R3
D2	T1-D2-R1	T1-D2-R2	T1-D2-R3	T2-D2-R1	T2-D2-R2	T2-D2-R3	T3-D2-R1	T3-D2-R2	T3-D2-R3	T4-D2-R1	T4-D2-R2	T4-D2-R3	T5-D2-R1	T5-D2-R2	T5-D2-R3	T6-D2-R1	T6-D2-R2	T6-D2-R3
D3	T1-D3-R1	T1-D3-R2	T1-D3-R3	T2-D3-R1	T2-D3-R2	T2-D3-R3	T3-D3-R1	T3-D3-R2	T3-D3-R3	T4-D3-R1	T4-D3-R2	T4-D3-R3	T5-D3-R1	T5-D3-R2	T5-D3-R3	T6-D3-R1	T6-D3-R2	T6-D3-R3
D4	T1-D4-R1	T1-D4-R2	T1-D4-R3	T2-D4-R1	T2-D4-R2	T2-D4-R3	T3-D4-R1	T3-D4-R2	T3-D4-R3	T4-D4-R1	T4-D4-R2	T4-D4-R3	T5-D4-R7	T5-D4-R8	T5-D4-R9	T6-D4-R1	T6-D4-R2	T6-D4-R3
D5	T1-D5-R1	T1-D5-R2	T1-D5-R3	T2-D5-R1	T2-D5-R2	T2-D5-R3	T3-D5-R1	T3-D5-R2	T3-D5-R3	T4-D5-R4	T4-D5-R5	T4-D5-R6	T5-D5-R1	T5-D5-R2	T5-D5-R3	T6-D5-R1	T6-D5-R2	T6-D5-R3
D6	T1-D6-R1	T1-D6-R2	T1-D6-R3	T2-D6-R1	T2-D6-R2	T2-D6-R3	T3-D6-R1	T3-D6-R2	T3-D6-R3	T4-D6-R1	T4-D6-R2	T4-D6-R3	T5-D6-R1	T5-D6-R2	T5-D6-R3	T6-D6-R1	T6-D6-R2	T6-D6-R3
D7	T1-D7-R1	T1-D7-R2	T1-D7-R3	T2-D7-R1	T2-D7-R2	T2-D7-R3	T3-D7-R1	T3-D7-R2	T3-D7-R3	T4-D7-R1	T4-D7-R2	T4-D7-R3	T5-D7-R1	T5-D7-R2	T5-D7-R3	T6-D7-R1	T6-D7-R2	T6-D7-R3
D8	T1-D8-R1	T1-D8-R2	T1-D8-R3	T2-D8-R1	T2-D8-R2	T2-D8-R3	T3-D8-R1	T3-D8-R2	T3-D8-R3	T4-D8-R1	T4-D8-R2	T4-D8-R3	T5-D8-R1	T5-D8-R2	T5-D8-R3	T6-D8-R1	T6-D8-R2	T6-D8-R3
D9	T1-D8-R1	T1-D8-R2	T1-D8-R3	T2-D9-R1	T2-D9-R2	T2-D9-R3	T3-D9-R1	T3-D9-R2	T3-D9-R3	T5-D9-R1	T5-D9-R2	T5-D9-R3	T5-D9-R1	T5-D9-R2	T5-D9-R3	T6-D9-R1	T6-D9-R2	T6-D9-R3
D10	T1-D10-R1	T1-D10-R2	T1-D10-R3	T2-D10-R1	T2-D10-R2	T2-D10-R3	T3-D10-R1	T3-D10-R2	T3-D10-R3	T4-D10-R1	T4-D10-R2	T4-D10-R3	T5-D10-R1	T5-D10-R2	T5-D10-R3	T6-D10-R1	T6-D10-R2	T6-D10-R3
D11	T1-D11-R1	T1-D11-R2	T1-D11-R3	T2-D11-R1	T2-D11-R2	T2-D11-R3	T3-D11-R1	T3-D11-R2	T3-D11-R3	T4-D11-R1	T4-D11-R2	T4-D11-R3	T5-D11-R1	T5-D11-R2	T5-D11-R3	T6-D11-R1	T6-D11-R2	T6-D11-R3
D12	T1-D12-R1	T1-D12-R2	T1-D12-R3	T2-D12-R1	T2-D12-R2	T2-D12-R3	T3-D12-R1	T3-D12-R2	T3-D12-R3	T4-D12-R1	T4-D12-R2	T4-D12-R3	T5-D12-R1	T5-D12-R2	T5-D12-R3	T6-D12-R1	T6-D12-R2	T6-D12-R3

Nota: T= número de tratamiento; Al= aluminio; FeCl₃=cloruro férrico; PAC=policloruro de aluminio; D= número de dosis; R= número de réplica.

3.4. Análisis e Interpretación de Datos

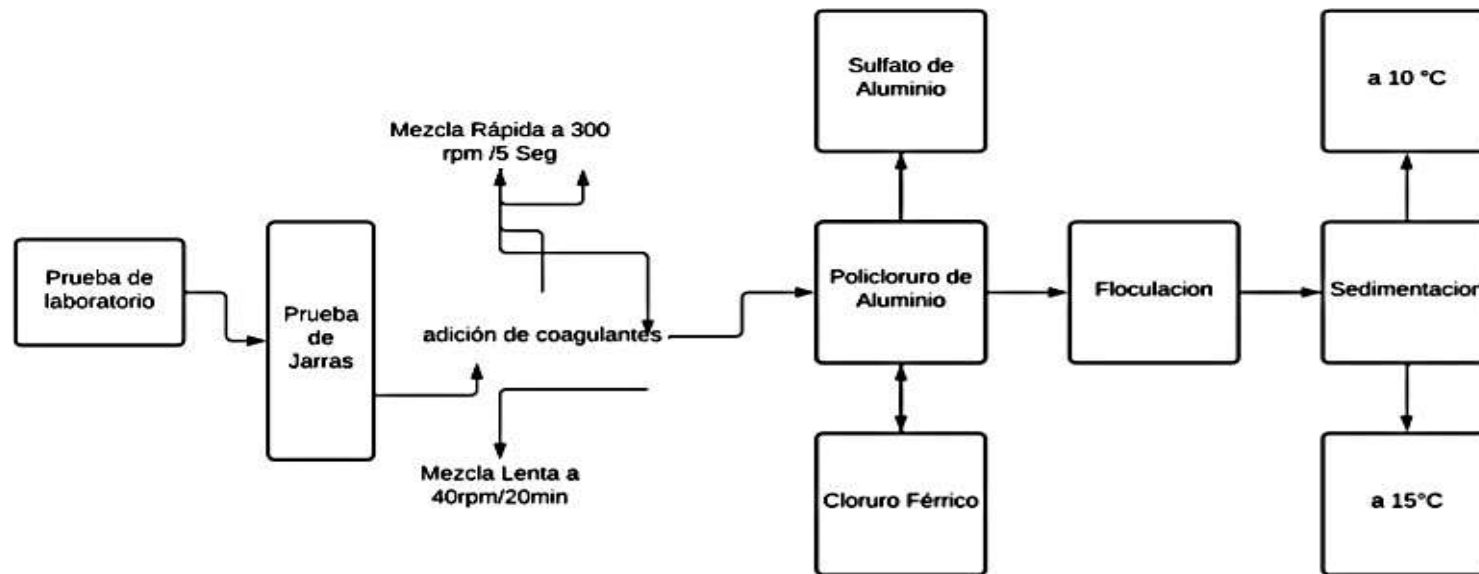
3.4.1. Análisis Factorial con dos Factores

Los análisis fueron evaluados mediante un análisis estadístico KRUSKAL WALLIS en donde se distribuyeron las variables estadísticas y los tratamientos de acuerdo a el diseño experimental.

3.5. Esquema Procedimiento Experimental

Figura 3.

Esquema de Procedimiento Experimental



3.5.1. Etapa Pre – Experimental

En esta primera etapa de la investigación realizamos las actividades de planificación, recopilación y el análisis de información bibliográfica sobre investigaciones similares.

También indicar que en esta etapa se hizo la identificación de la fuente de agua con la que se trabajó, se tuvo que caracterizar la muestra para los análisis de los parámetros químicos y físicos. Se realizó el diseño de los Tratamientos siguiendo la guía del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), este diseño se puede apreciar mejor en el (Anexo2). Posteriormente establecimos el diseño estadístico experimental y el número de ensayos con los que se trabajó.

3.5.2. Etapa Experimental

3.5.2.1. Tratamiento

Antes de realizar el tratamiento en el equipo de Jarras se tuvo que obtener una turbidez de 300 UNT de la muestra de agua, posteriormente se trabajó con una temperatura de 10°C y 15°C de, se les añadió una dosificación de 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24 ml se trabajó con los tres químicos con las mismas dosificaciones y se expuso a 5 s de mezcla rápida y 20 min de mezcla lenta, posteriormente se dejó sedimentar por 20min.

Se pasó a realizar los tratamientos, de acuerdo al diseño experimental se realizó un total de 216 en cada una de las corridas de la prueba de Jarras que ejecutamos fueron de 12 L, de muestra de agua en cada corrida trabajo con las siguientes variables de operación: Turbidez, Temperatura y dosis de cada Coagulante el tratamiento de 50 min, 60 min. Concluido el tratamiento la se procedió a la Toma de muestra de cada parámetro

El análisis de turbiedad, pH y temperatura lo realizamos en el laboratorio de saneamiento ambiental de la Universidad peruana Unión — Filial Juliaca.

3.5.3. Etapa Final (Gabinete)

En esta fase final se ejecutará el procesamiento de los resultados y la elaboración del informe final. Los resultados obtenidos en los parámetros

Fisicoquímicos se le aplicaron el análisis La prueba de KRUSKAL WALLIS Indicar que una vez procesado los resultados estos se compararon con el reglamento de calidad del agua para consumo humano el DS N°031-2010-SA.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la dosis óptima para el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ el cual es el más usado en las plantas de tratamiento para los procesos de coagulación y floculación (Yolanda Andía, 2000). También se registró los valores de turbiedad final y la formación de flóculos según el Índice de Willcomb, los valores de pH se mantuvieron dentro del rango descrito en el D.S N° 004-2017- MINAM (6.5-8.5)

El PAC obtuvo mejores propiedades como coagulante, puesto que registró un porcentaje mayor de remoción de turbiedad, además de no variar el pH del agua. En la investigación de Alvarado, Pérez y Saba el PAC obtuvo la dosis de 20 mg/l, la cual coincide con nuestro resultado .

Por otro lado PAZ (2010) En su investigación obtuvo valores de turbiedad por debajo de las 2 UNT los cuales coinciden con nuestra investigación observando así que el PAC tiene mejores resultados que el Sulfato de Aluminio.

Según, Andia nos dice que el sulfato de aluminio presenta una deficiencia en condiciones altoandinas debido a que las temperaturas bajas dificultan el proceso de coagulación y sedimentación del Floculo formado resultando en una remoción de turbiedad baja.

4.1. Resultados de pruebas de sulfato de aluminio , PAC y Cloruro Ferrico a 10°C

El Sulfato de Aluminio reporta un porcentaje de reducción de 94 % ayuda a reducir la turbiedad a valores menores de 4 UNT, pero observamos que mientras baja la temperatura se vuelve mucho más deficiente obteniendo valores fuera del reglamento de calidad de agua y a mayores dosis vemos que modifica el PH del agua. Según, Andia nos dice que el sulfato de aluminio presenta una deficiencia en

condiciones altoandinas debido a que a temperaturas bajas dificultan el proceso de coagulación y sedimentación del Floculo formado resultando en una remoción de turbiedad baja.

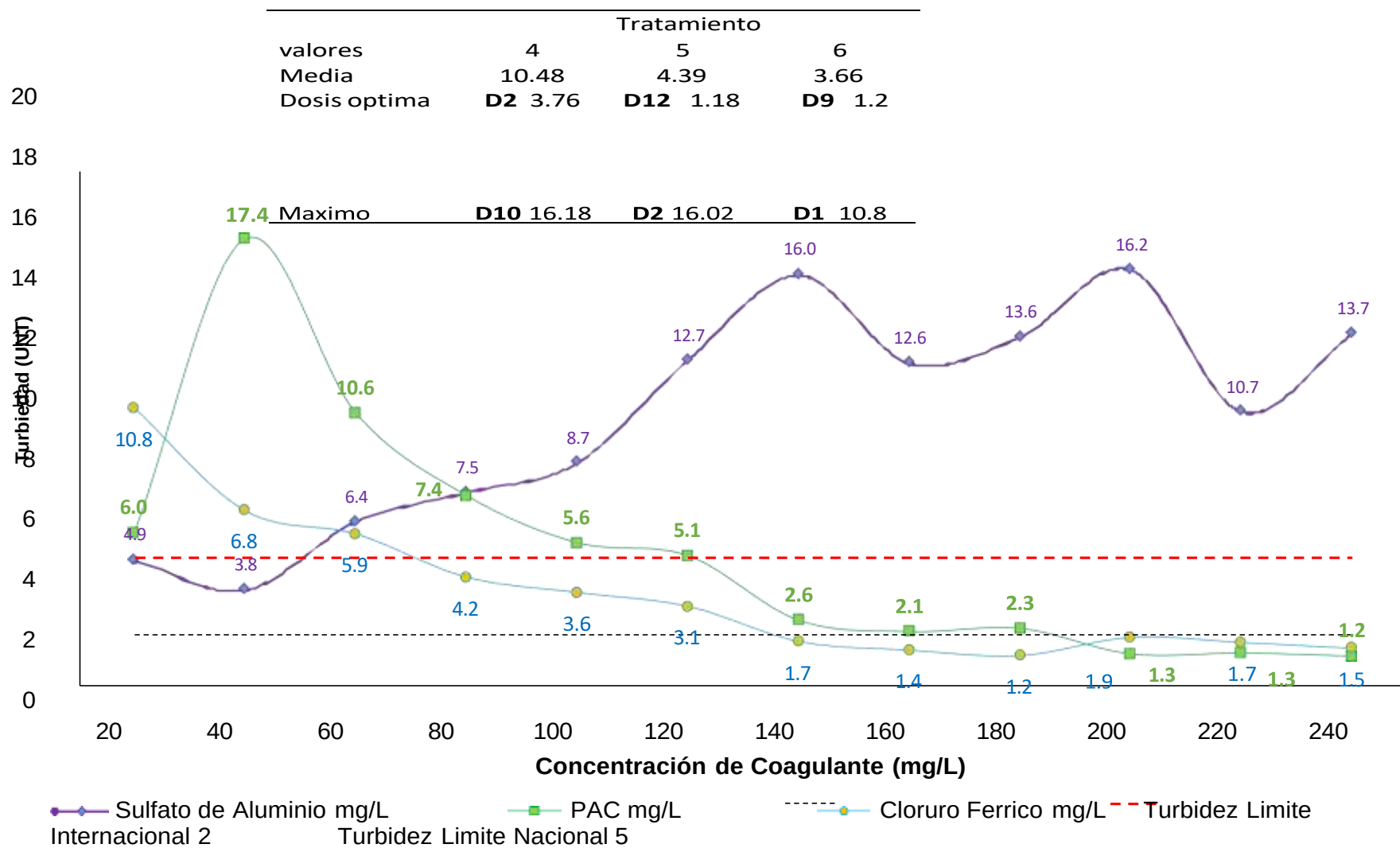
Mientras que el Cloruro Férrico registro un promedio de 98.21% observando que las dosis de mayor remoción de Turbiedad son D4, D6, hasta la D12 a la temperatura de 10°C pero a la temperatura de 15 °C observamos que la formación del Floc es más rápida en el D6-D12 obteniendo valores por debajo de las 2 UNT ver (Figura 5)

En base a estos resultados se deduce que las condiciones alto andinas en lo que respecta temperatura del agua (10°C) significó una reducción de la eficacia del sulfato de aluminio. Y que el PAC es más eficiente. Mientras que en los ensayos a la temperatura de 15°C la formación de los floc es más rápida y la aglutinación de los flóculos es rápida por ende la precipitación de los mismos es mayor.

De los datos obtenidos de la efectividad del proceso de coagulación-floculación, la mayor cantidad de valores obtenidos de PAC y Cloruro Férrico se encontraron dentro del D.S. 031-2010-SA, mientras que el Sulfato de Aluminio presento valores fuera del reglamento antes mencionado por ello se concluye que la temperatura es un factor importante para el proceso de coagulación y floculación de agua para consumo humano. En la investigación de Galindo se constata que a turbiedades bajas es necesaria la aplicación de dosis más altas de coagulante y que a turbiedades altas la dosis debe de ser menor

Figura 4 .

Curva esquemática de Turbiedad vs concentración de Coagulante a 10°C



Como se muestra en la *Fig 4*, con la dosis de D2 de Sulfato de Aluminio a 10°C se obtiene una turbiedad final de 3,8 la cual representa el 96% de remoción, Se puede apreciar también que a menor dosis de coagulante las partículas no se desestabilizan, y a una mayor dosis se produce una inversión de la carga de la partícula, por lo cual los valores de turbiedad final no son bajos (Yolanda Andía, 2000).

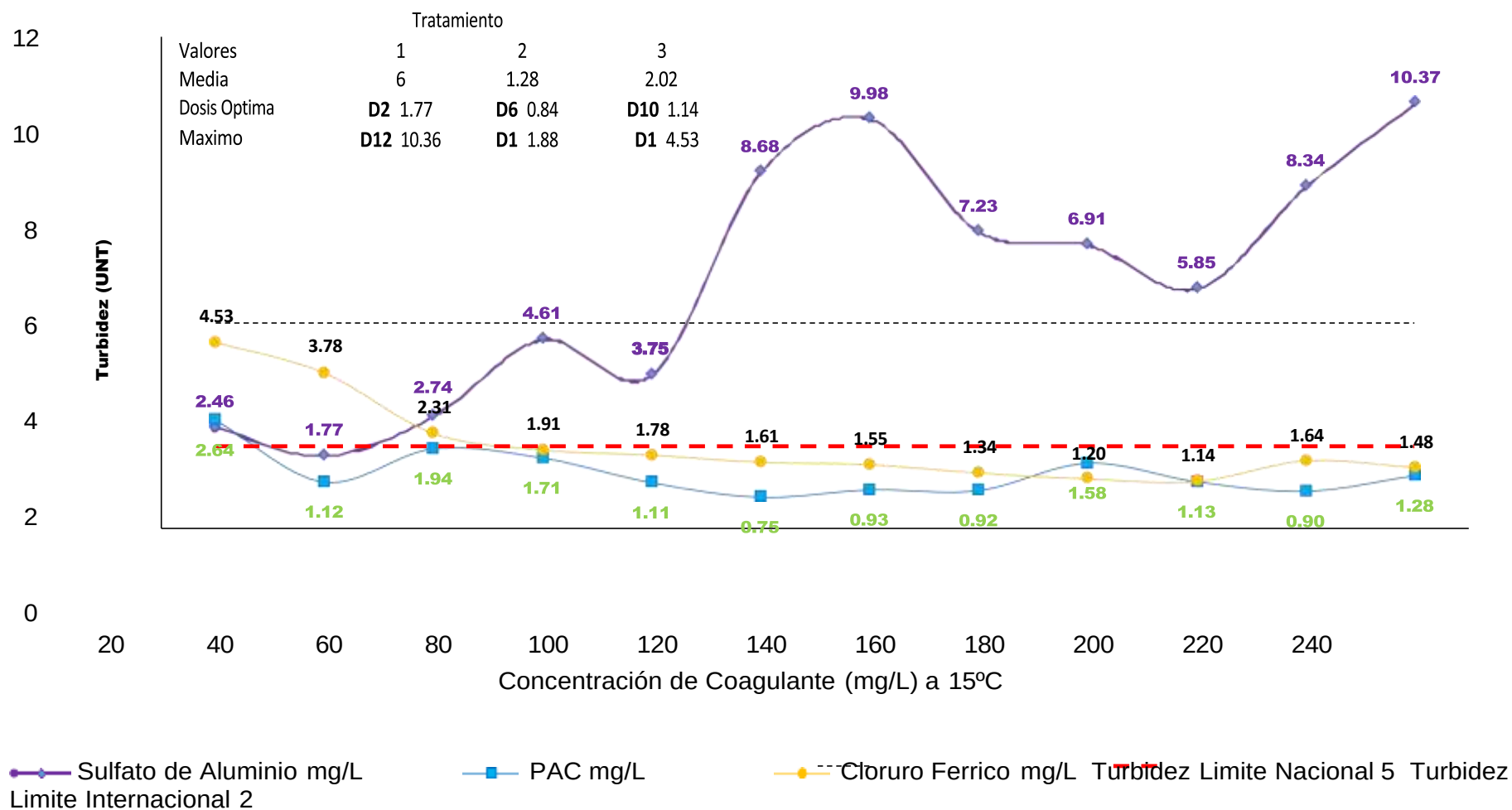
Por otro lado observamos que con la dosis de PAC obtenemos una turbiedad final que se encuentra dentro de los parámetros a una dosis de D12 a una turbiedad de 1,2UNT tiene una mayor eficacia, representa el 99 % de remoción, el PAC, incluye una serie de productos que varían en el grado de su neutralización ácida, polimerización y concentración. Mientras el ácido es neutralizado en el proceso de producción, la parte de aluminio del producto se vuelve más polimerizada, resultando en una mayor carga catiónica y en un aumento de la capacidad de desempeño (Solier, 2014)

En cambio, con el Cloruro Férrico tenemos una dosis de D9 turbiedad final de 1.2 UNT con una remoción de 98,23% siendo más eficiente que el Sulfato de Aluminio, De bajo costo respecto al Policloruro de aluminio, de alta velocidad de reacción, trabaja con un rango bajo de pH 3.5 — 7.0, ayuda en la remoción de sustancias orgánicas y microorganismos permite una mayor velocidad de formación de los flóculos, la disminución en la coloración y en el uso de estabilizadores y correctores de pH, el aumento de la eficiencia de los mismos favorece la eliminación de aquellos químicos que afectan la salud, manteniéndose la calidad del agua tratada a entregar y estando siempre por debajo de los límites permisibles (Beltran, 2017)

Por ello observamos que es mayor la capacidad de remoción de turbiedad del PAC siendo mejor que el Sulfato de Aluminio, el PAC tiene un rango más amplio de acción de remoción de turbiedad con una sedimentación mayor, siendo sus valores más bajos en comparación con los otros dos coagulantes mencionados. se observa que los tratamientos son favorables obteniendo valores de turbiedad final por debajo de 2UNT la curva muestra una tendencia parecida al PAC.

Figura 5.

Comportamiento de turbidez vs concentración de Coagulante de Sulfato de Aluminio, PAC, Cloruro Férrico a 15°C.B



Como se muestra en la figura 5. Vemos que el Sulfato de Aluminio se obtuvo una remoción de turbidez de 94.7 % con una Turbidez final de 1,77 UNT pero observamos que a concentraciones más altas los valores de turbidez finales son elevados, el Índice de Willcomb se formó entre el rango de 2 y 6 de los datos obtenidos los coagulantes que mostraron mayor índice de Willcomb fueron el PAC Y el Cloruro Férrico mostrando flóculos relativamente grande pero que precipitan con lentitud, mientras que los flóculos de Sulfato de Aluminio muestra flóculos muy pequeños y dispersos esto según el (Rojas, 2002)

Vemos como los coagulantes que presentaron una formación rápida del floc, fueron el PAC y el Cloruro Férrico los de D6 hasta los de D24, mientras que en el Cloruro férrico se formaron con más rapidez fueron los de D1 hasta los D12, por último vemos que en el PAC presento una formación más rápida del floc en los primeros ensayos que se formaron a los 2 min.

Observamos que a temperatura de 15 °C, la formación del Floc es más rápida obteniendo valores por debajo de las 2 UNT los cuales están dentro del D.S. 031-2010-SA.

Figura 6.

Comportamiento del Potencial de Hidrogeno de Sulfato de Aluminio,PAC,Cloruro Ferrico a 10°C

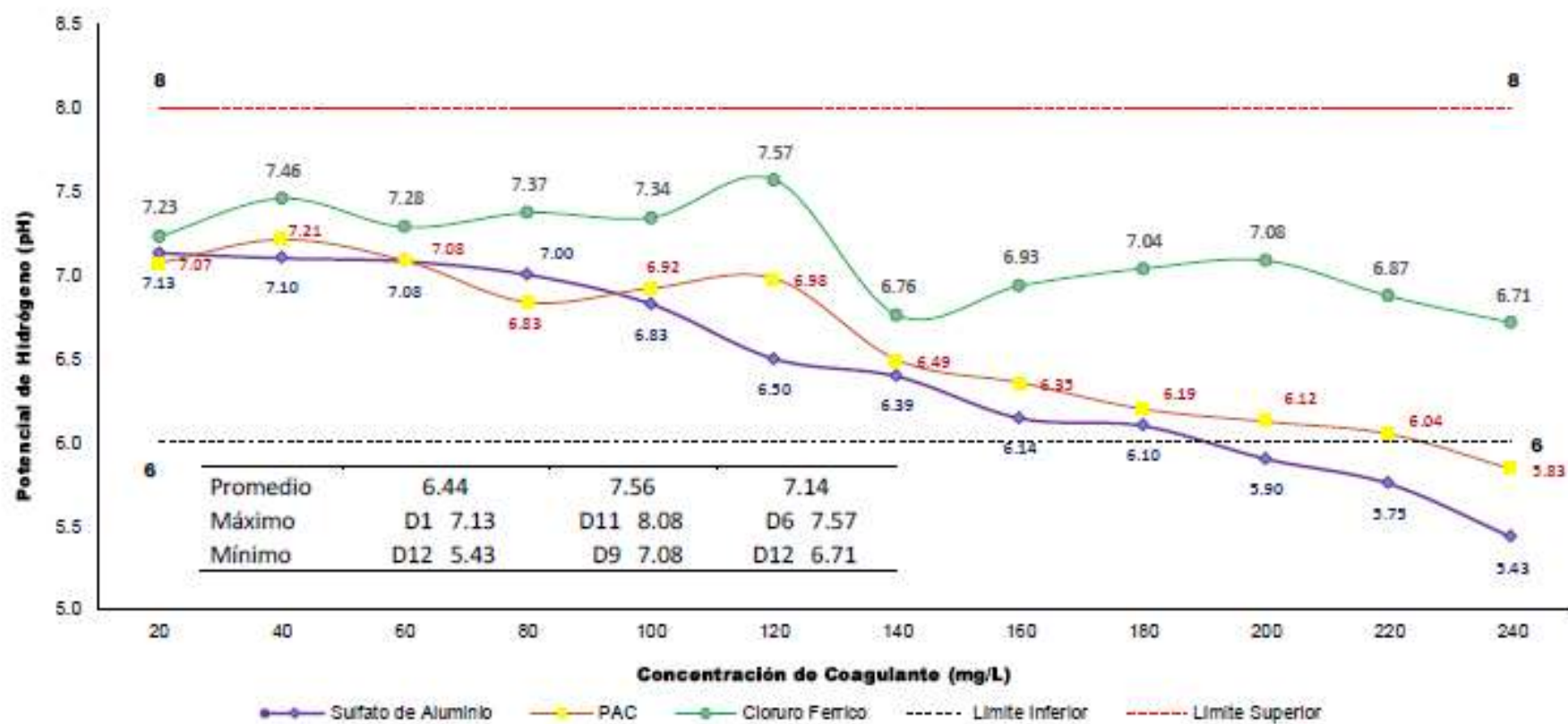
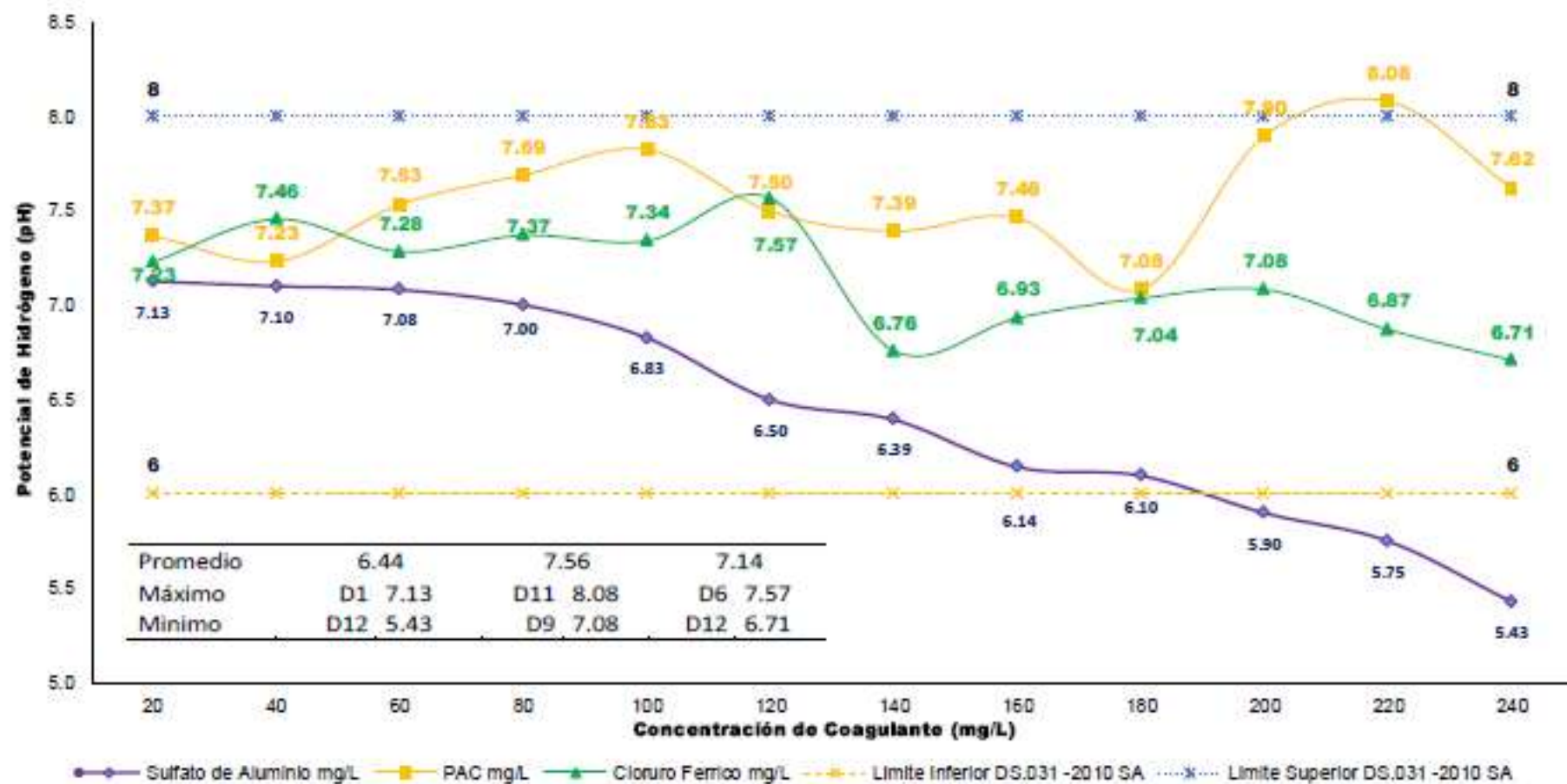


Figura 7.

Comportamiento del Potencial de Hidrogeno de Sulfato de Aluminio,PAC,CloruroFerrico a 15°C



4.2. Analisis de datos Estadístico

Tabla 6.

Resumen Estadístico de la significancia de los factores en la remoción de la Turbidez.

Factores	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	4,871,405	5	974,281	2,341	.045
Dosis	4,811,551	11	437,414	1,051	.405
Tratamientos * Dosis	21,845,422	55	397,189	,954	.569
Total corregida	91,467,934	215			

a. R al cuadrado = .345 (R al cuadrado ajustada = .022)

La tabla 6. Muestra que los factores como los Tratamientos (A) son significativos en la remoción de la turbidez, ya que presentan p- valor de significancia de 0.045

Una vez determinada la significancia de los tratamientos en la remoción de la turbidez, se realiza la prueba de Kruskal Wallis donde se planteó la siguiente Hipótesis:

Hipótesis nula H_0 : Todas las medianas son iguales
 Hipótesis alterna H_1 : Al menos una mediana es diferente

Tabla 7.

Estadísticos de contraste^{a,b}

Estadístico	UNT
Chi-cuadrado	186,653
Gl	71
Sig. asintót.	.000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: Tatkr

La tabla 7 muestra que el p valor (Sig. asintót.) es menor que 0.05, entonces se rechaza la hipótesis nula y se concluye que con un nivel de significación del 5%, los tratamientos y dosis son diferentes

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se concluye que:

- Es factible emplear coagulantes químicos como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ en el tratamiento de aguas para consumo humano en condiciones de temperaturas bajas como las que se presentan en el altiplano peruano, pero el $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ y el FeCl_3 presentan mejores rendimientos bajo esas condiciones.
- Las Dosis optima de Sulfato de aluminio es de 40mg/L a 10°C y 15°C teniendo una turbides de 4UNT mientras que la dosis óptima para el policloruro de aluminio es de D12 a 240mg/L a una temperatura de 10 °C y de D6 a 120 mg/l a 15°C teniendo un turbidez final de 1.18 Y 0.86 UNT, observando un rango mayor de remoción, para el Cloruro férrico la dosis optima es de D10 100 mg/L a 15°C y de D9 a 80mg/L a 10 °C obteniendo una turbiedad final de 1.14 y 1.20 UNT.
- El Sulfato de Aluminio se ve afectado por la variación del potencial de hidrogeno afectando en la remoción de turbiedad del agua, observamos que a PH más bajos la remoción es menor, mientras que el cloruro férrico y el Pac pueden trabajar con un pH de 5 a 8 sin afectar su eficacia al momento de la remoción de Turbiedad y a temperatura de 15°C y 10°C los valores óptimos evaluados si se encuentran dentro de los valores establecidos en el D.S. 031-2010-SA.

5.2. Recomendaciones

- Realizar ensayos con el PAC, sulfato de aluminio, cloruro férrico a diferentes PH para determinar si actúa mejor como coagulante.
- Realizar ensayos con diferentes niveles de turbiedad, usando cada coagulante.
- Llevar a cabo pruebas con aguas a diferentes rangos de turbidez de agua.
- Experimentar con diferente velocidad de agitación y tiempos de coagulación-floculación.
- Realizar ensayos a diferentes tiempos de sedimentación usando cada coagulante

REFERENCIAS

- Alvarado, C. ;Pérez, H, y Saba, C. (2015). Evaluación del uso del policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio en el proceso de coagulación de una planta de potabilización de agua en el estado de Carabobo. *Ingeniería y Sociedad UC*, 10(1), 35-46.
- Andía Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. En *Sedapal*. http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Barrera, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. (Reverté S.A (ed.)).
- Bermúdez, X., Ramírez, M., y Moya, A. (2009). Estudio del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa textil desembarco del granma. *Tecnología Química*.
- Castillon Bedoya, D. (2012). Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa santana daniela. *Экономика Региона*, 32.
- CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida* (Tomo I).
- Cerón, V. (2016). Estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa EMPOOBANDO E.SP. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- Claros Castellares, Jaime. (2015). Evaluar los efectos de polihidroxidocloruro de aluminio, velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río Shullcas en la localidad de Huancayo, en el año 2013". *Nacional, Universidad Centro, del Perú*.
- Flórez, C., Miguel, J., Aguas, C. D. E., Coagulantes, U., Caso, P., Miguel, J., y Flórez, C. (2011). Polimerizados: Caso del Hidroxidocloruro de Aluminio. *Dyna*, 78(165), 18-27.
- Galindo Yantas, G. (2018). Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado tipo b en la planta de tratamiento de agua potable Yurajhuanca — Emapa Pasco. *Repositorio.Undac.Edu.Pe*.
- Henry, J., y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental* (Pablo Eduardo Roig Vázquez (ed.); Segunda Ed).
- Melian, D. (2010). *Ensayo comparativo de dos metodologías de extracción de almidón de*

- papa usando muestras de diez variedades antivas de chiloé y dos variedades comerciales*. Universidad Austral de Chile; Escuela Ingeniería de los Alimentos.
- MINSAL. (2011). MINSAL. *Bibliography and Index of Paleozoic Crinoids and Coronate Echinoderms 1981—1985*, 20-25. <https://doi.org/10.1130/micro18-p20>
- MURILLO CASTAÑO, D. M. (2011). Analisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. *universidad tecnologica de pereira*, 4(3), 410-419.
- Paz, R. V. G. (2010). *Obtención De La Mínima Dosis De Reemplazo De Policloruro De Aluminio En Aguas Y Aguas De Pereira*. 70.
- Perez Beltran,(2017). Evaluar la sustitución de un agente coagulante en el proceso de coagulación-floculación en la potabilización de agua en la empresa EAF SAS ESP. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- perez Garay, I. F. (2015). Optimización de la dosificación de sulfato de distrito de vilcacoto. *universidad nacional del centro del peru*.
- Roncal, S., y Siu, R. (1990). *Utilización de almidones como ayudantes de floculación en el tratamiento de aguas para condumio humano*. Universidad Nacional de Ingeniería; Facultad de Ingeniería Ambiental.
- SAMAME VIDAURRE, J. C. (2016). Determinar la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada del distrito de pedro ruiz gallo. *Facultad de ingeniería civil y ambiental escuela profesional de ingeniería ambiental*.
- Trejo, R., y Hernández, V. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Conciencia tecnológica*, 25.
- WHO. (2012). Aspectos relativos a la aceptabilidad. *Guías de la OMS para la calidad del agua potable*, 183-190.
- Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J., y Abramovich, B. (2009). *Cloruro férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparasitos en agua*. Asociación de Universidades. Grupo Montevideo. 1, 18-26.

ANEXOS

Anexo 1. Datos Experimentales a 10°C Y 15°C de prueba de jarras.

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 15°C pH= 7,36		Observación visual Mezcla rápida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Pruebas	Dosis de Sulfato de Aluminio (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	5	6	2.29	6.92
2	40	5	6	1.12	6.98
3	60	5	6	2.03	6.97
4	80	5	6	3.43	6.93
5	100	5	6	2.52	6.75
6	120	4	6	7.64	6.62
7	140	4	4	10.8	6.42
8	160	4	2	7.59	6.14
9	180	4	2	7.2	6.13
10	200	4	2	5.59	5.78
11	220	9	2	8.59	5.55
12	240	9	2	9.57	5.29
1	20	4	6	2.08	7.27
2	40	4	6	2.56	7.22
3	60	4	4	2.34	7.13
4	80	4	6	5.73	7.02
5	100	4	6	4.2	6.86
6	120	7	6	9.72	6.44
7	140	7	2	9.54	6.39
8	160	7	2	6.28	6.13
9	180	7	2	6.65	6.09
10	200	7	2	6.03	5.95
11	220	7	2	7.65	5.85
12	240	7	2	9.65	5.50
1	20	4	6	3	7.19
2	40	4	6	1.63	7.09
3	60	4	4	3.86	7.14
4	80	4	6	4.68	7.05
5	100	4	6	4.53	6.87
6	120	4	6	9.93	6.44
7	140	10	2	9.59	6.37
8	160	10	2	7.81	6.15
9	180	10	2	6.89	6.06
10	200	10	2	5.92	5.97
12	240	10	2	11.9	5.49
11	220	10	2	8.77	5.85

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 15°C pH= 7,36		Observacion visual Mezcla rapida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Prueba s	Dosis de PAC (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	2	6	2.56	7.64
2	40	4	6	1.6	7.38
3	60	4	6	1.83	8.33
4	80	2	6	1.37	8.00
5	100	2	6	1.03	7.75
6	120	2	6	0.64	7.62
7	140	2	4	1.72	7.42
8	160	2	6	1.06	8.10
9	180	2	6	1.89	7.10
10	200	2	6	1.05	7.78
11	220	2	4	0.38	8.55
12	240	2	4	1.62	7.87
1	20	2	4	3.28	7.19
2	40	2	6	0.9	7.09
3	60	2	6	1.75	7.14
4	80	2	6	1.9	7.05
5	100	2	6	1.26	7.87
6	120	2	6	0.58	7.44
7	140	2	4	0.75	7.37
8	160	2	6	0.67	7.15
9	180	2	6	1.16	7.06
10	200	3	6	1.32	7.97
11	220	3	4	1.33	7.85
12	240	3	4	1.25	7.49
1	20	2	4	2.07	7.19
2	40	4	6	0.87	7.09
3	60	4	6	2.23	7.14
4	80	2	6	1.86	7.05
5	100	2	6	1.04	7.87
6	120	2	6	1.04	7.44
7	140	2	4	0.33	7.37
8	160	2	6	1.02	7.15
9	180	2	6	1.7	7.06
10	200	2	6	1.02	7.97
11	220	2	4	0.99	7.85
12	240	2	4	0.97	7.49

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 15°C pH= 7,36		Observacion visual Mezcla rapida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Pruebas	Dosis de Cloruro Ferrico (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	2	4	4.85	7.28
2	40	2	4	4.11	7.46
3	60	2	4	2.35	7.49
4	80	1	6	1.59	7.34
5	100	1	6	1.74	7.35
6	120	2	6	1.43	7.46
7	140	2	6	1.9	6.69
8	160	2	6	1.38	6.87
9	180	2	6	1.46	7.04
10	200	2	4	1.66	7.06
11	220	2	4	1.26	6.95
12	240	2	4	1.78	6.75
1	20	1	4	3.61	7.13
2	40	1	4	4.09	7.41
3	60	1	6	2.73	7.04
4	80	1	6	2.46	7.46
5	100	1	6	2.34	7.24
6	120	2	6	2.03	7.54
7	140	2	6	1.09	6.76
8	160	2	6	1.4	6.90
9	180	2	6	1.06	7.02
10	200	2	6	0.84	7.10
11	220	2	6	1.96	6.73
12	240	2	4	1.3	6.67
1	20	2	4	5.14	7.28
2	40	2	4	3.15	7.50
3	60	2	6	1.86	7.33
4	80	2	6	1.67	7.31
5	100	2	6	1.26	7.44
6	120	2	6	1.36	7.70
7	140	2	6	1.65	6.83
8	160	3	6	1.25	7.03
9	180	3	6	1.08	7.04
10	200	3	4	0.92	7.09
11	220	3	4	1.7	6.94
12	240	3	4	1.36	6.70

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 10°C pH= 7,36		Observacion visual Mezcla rapida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Pruebas	Dosis de Sulfato de Aluminio (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	4	6	4.29	6.92
2	40	5	6	4.12	6.98
3	60	5	4	4.03	6.97
4	80	5	6	3.23	6.93
5	100	4	6	2.52	6.75
6	120	4	6	12.64	6.62
7	140	12	2	18.8	6.42
8	160	11	2	12.59	6.14
9	180	11	2	8.2	6.13
10	200	11	2	12.59	5.78
11	220	11	2	2.59	5.55
12	240	10	2	2.57	5.29
1	20	5	4	6.43	7.27
2	40	5	6	4.53	7.22
3	60	5	4	2.34	7.13
4	80	5	6	14.73	7.02
5	100	5	6	13.05	6.86
6	120	4	6	12.72	6.44
7	140	13	2	15.54	6.39
8	160	13	2	11.28	6.13
9	180	13	2	13.65	6.09
10	200	13	2	18.03	5.95
11	220	13	2	16.65	5.85
12	240	13	2	17.65	5.50
1	20	4	4	4.03	7.19
2	40	4	4	2.63	7.09
3	60	4	4	12.86	7.14
4	80	4	6	4.68	7.05
5	100	4	6	10.53	6.87
6	120	4	6	10.03	6.44
7	140	10	2	13.59	6.37
8	160	10	2	13.81	6.15
9	180	10	2	18.89	6.06
10	200	10	2	17.92	5.97
11	220	10	2	12.77	5.85
12	240	10	2	20.9	5.49

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 10°C pH= 7,36		Observacion visual Mezcla rapida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Pruebas	Dosis de PAC (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	10	0	5.56	7.1
2	40	7	2	15.6	7.2
3	60	2	6	9.83	7.1
4	80	2	6	4.37	6.8
5	100	2	6	5.83	6.9
6	120	2	6	1.64	6.8
7	140	2	6	3.72	6.5
8	160	1	6	3.66	6.4
9	180	1	6	3.89	6.2
10	200	1	6	1.05	6.1
11	220	1	6	1.38	6.1
12	240	2	4	1.52	5.8
1	20	8	2	5.28	7.1
2	40	6	2	14.9	7.3
3	60	3	6	10.75	7.1
4	80	3	6	5.98	6.8
5	100	3	6	3.26	6.9
6	120	3	6	1.18	6.8
7	140	3	6	1.65	6.4
8	160	3	4	1.3	6.2
9	180	3	4	1.16	6.1
10	200	3	4	1.32	6.1
11	220	1	4	1.33	6.1
12	240	2	4	1.05	5.8
1	20	14	2	5.07	7.2
2	40	8	2	17.57	7.1
3	60	1	6	9.23	7.1
4	80	1	6	4.86	7.1
5	100	1	6	3.64	7.9
6	120	2	6	1.4	7.4
7	140	2	6	2.33	7.4
8	160	2	6	1.42	7.2
9	180	2	6	1.7	7.1
10	200	2	6	1.42	8.0
11	220	2	6	1.19	7.9
12	240	2	6	0.97	7.5

PRUEBA EXPERIMENTAL DE LABORATORIO					
Turbidez Inicial = 300 UNT Temperatura 10°C pH= 7,36		Observacion visual Mezcla rapida (300 rpm) por 5seg. Mezcla lenta (40rpm) por 20min.		Agua sedimentada (20 min)	
Numero de Pruebas	Dosis de CloruroFerrico (mg/L)	Tiempo de formacion del floc(Min)	Indice de wilcomb	Turbidez Final	pH Final
1	20	4	6	11.25	7.28
2	40	3	6	9.81	7.46
3	60	3	6	10.15	7.49
4	80	6	6	7.59	7.34
5	100	6	6	6.74	7.35
6	120	6	6	5.43	7.46
7	140	8	2	1.9	6.69
8	160	8	2	1.38	6.87
9	180	8	2	1.46	7.04
10	200	8	2	1.66	7.06
11	220	8	4	1.26	6.95
12	240	8	4	1.78	6.75
1	20	3	6	16.01	7.13
2	40	3	6	7.59	7.41
3	60	3	6	5.73	7.04
4	80	6	6	3.46	7.46
5	100	6	6	2.34	7.24
6	120	6	2	2.53	7.54
7	140	11	2	1.69	6.76
8	160	11	2	1.4	6.90
9	180	11	2	1.06	7.02
10	200	11	2	2.04	7.10
11	220	11	4	1.96	6.73
12	240	11	4	1.3	6.67
1	20	6	6	5.14	7.28
2	40	3	6	3.05	7.50
3	60	3	6	1.86	7.33
4	80	6	2	1.67	7.31
5	100	6	2	1.86	7.44
6	120	6	2	1.36	7.70
7	140	12	2	1.65	6.83
8	160	12	4	1.45	7.03
9	180	12	4	1.08	7.04
10	200	12	4	2.02	7.09
11	220	14	4	1.9	6.94
12	240	14	4	1.36	6.70

Anexo 2. Método de prueba de jarras.

2.3 Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras

En los ensayos experimentales se imponen ciertos controles que sirven para evaluar los efectos producidos al variar el valor del parámetro que está siendo medido. Cuando los ensayos se efectúan con el equipo de prueba de jarras, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) equipo usado para la prueba;
- 2) análisis de laboratorios requeridos;
- 3) dosis de coagulante;
- 4) concentración del coagulante;
- 5) sistema de adición del coagulante;
- 6) dosificación del ayudante de floculación;
- 7) sistema de adición del ayudante de floculación;
- 8) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida;
- 9) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta;
- 10) sistema de toma de muestra.

Entre las observaciones generales que se deben tener en cuenta al ejecutar la prueba de jarras, tenemos:

- a) El tiempo y secuencia de dosificación: en algunas oportunidades el coagulante se adiciona a cada vaso (muestra) a diferentes tiempos según su turno. Tal procedimiento es inefectivo, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación, debido a que el tiempo entre la adición del coagulante y el ayudante siempre es crítico.
- b) En todos los casos, después de dosificados y mezclados los coagulantes con el agua, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:

2.3.1 Soluciones químicas empleadas (1)

Las soluciones de coagulantes, ayudantes de coagulación y otros productos químicos que se van a usar en las pruebas de coagulación deben ser preparados en concentraciones tales que puedan ser medidas de manera conveniente y precisa. Véase el cuadro 11-5.

En los laboratorios de las plantas de tratamiento es mejor preparar las soluciones para los ensayos con los mismos coagulantes que se usan en la planta y no con reactivos purificados de laboratorio.

Cuadro 11-5. Soluciones patrón para la prueba de coagulación (9)

Producto químico	Concentración de la solución patrón o suspensión	Prepare una solución nueva después de	Notas
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$	10% (0,86% Al)	1 ó 2 meses	
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	10% (2% Fe)	1 mes	Renovar la solución si se pone opalescente.
Almidón soluble	0,5%	2 días	Diluir 10 veces inmediatamente antes del uso.
Derivados de poliacrilamida	0,05%	1 mes	La solución debe tener, por lo menos, un día. Diluir 10 veces antes de su uso.
H_2SO_4	0,1 N	3 meses	
NaOH	0,1 N	1 mes	
Tierra fuller	0,5%	3 meses	Agitar bien antes de usar.

El reactivo principal es la solución de sulfato de aluminio, cloruro o sulfato férrico. Se prepara agregando agua destilada a 100 g de coagulante hasta completar el volumen de 1.000 mL, con lo que se obtiene una solución de 10% que se puede conservar como solución patrón, por uno, dos o tres meses.

El ensayo de prueba de jarras se hace diluyendo 10 mL de la solución patrón hasta completar 100 mL con agua destilada. Queda una solución al 1% que no se puede conservar por más de 24 horas *pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.*

Cuando es necesario, debido a la baja alcalinidad de la muestra, hay que preparar una suspensión de cal añadiendo agua destilada a 10 g de dicho material hasta completar un volumen total de 1.000 mL. Debe anotarse el compuesto de cal que se ha utilizado, CaO o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y evitar el contacto de la suspensión así preparada con el aire, cuyo contenido de CO_2 puede reaccionar con el óxido de

calcio para formar carbonato que precipita. Antes de usar la suspensión, hay que agitarla.

2.3.2 Tamaño del flóculo producido

Se observa el tamaño del flóculo producido y se lo evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño puede expresarse en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra o según el índice de Willcomb, que se incluye en el cuadro 6 y la figura 11-9. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, aunque no siempre el mayor tamaño de partículas produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos.

2.3.3 Tiempo inicial de formación del flóculo

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer indicio de formación de flóculo es uno de los sistemas para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, que ni aún así suele ser fácil, pues cuando el flóculo recién se forma, es casi incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápido no necesariamente es el mejor.

En esta evaluación debe tenerse en cuenta la diferencia de tiempo con que se agregaron los coagulantes a los vasos de precipitado. Si no se dispone de un sistema de aplicación simultánea que vierta la solución en la seis jarras al mismo tiempo, el coagulante tiene que agregarse con intervalos de 10 a 30 segundos en cada vaso y debe marcarse en los mismos, con lápiz de cera, el tiempo de aplicación en la forma siguiente: $t = 0$ (para el vaso 1), $t = 10\text{ s}$ (para el vaso 2), $t = 20\text{ s}$ (para el vaso 3), etcétera. El tiempo de aparición del primer flóculo será igual al tiempo inicial de aplicación del coagulante a la primera jarra, hasta que se note el primer indicio de flóculo, menos el tiempo que tarde en hacerse la aplicación a la jarra considerada.

Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

Cuadro 11-6. Índice de floculación de Willcomb (9)

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta.)
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

- **Determinación de la dosis óptima**

a) Propósito

El objetivo de este ensayo es determinar la dosis de coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales, que permita la formación de un flóculo grande, compacto y pesado, que pueda ser fácilmente retenido en los decantadores y que no se rompa y traspase el filtro. Debe observarse que no necesariamente el flóculo que sedimenta con rapidez es el que queda retenido en el filtro. El flóculo que se busca es el que dé el mayor rendimiento, con todo el conjunto de procesos.

b) Equipos, materiales y reactivos

- Equipo de prueba de jarras con 6 jarras de 2 litros, 6 deflectores, 6 tomadores de muestras y 6 jeringas hipodérmicas desechables de 10 cm³, con sus agujas.

- Turbidímetro con la sensibilidad suficiente para determinar con precisión turbiedades menores de 10.
- UNT, de preferencia un equipo nefelométrico de tipo digital.
- Colorímetro.
- Medidor de pH.
- Seis vasitos de 50 y 100 mL, de vidrio o plástico.
- El coagulante seleccionado.

c) *Procedimiento*

- 1) Determinar la temperatura, la turbiedad, el color, el pH, la alcalinidad y la dureza total del agua cruda con la que se va a trabajar. Determinar también la presencia de hierro y manganeso si esta es significativa.
- 2) Calcular la cantidad de coagulante que se va a aplicar a cada jarra mediante la ecuación de balance de masas:

$$P = D \times Q = q \times C$$

Donde:

P	=	peso de coagulante por aplicar
D	=	dosis de coagulante en mg/L
Q	=	capacidad de la jarra en litros
q	=	volumen de solución por aplicar (mL)
C	=	concentración de la solución en mg/L

Ejemplo:

Se debe aplicar una dosis de 10 mg/L a una jarra de 2 litros con una solución al 2%.

Calcular el volumen de solución que debe colocarse en la jeringa.

$$q = \frac{10 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L)} \times 1.000}{20.000 \text{ (mg/L)}} ; q = 1,0 \text{ mL}$$

- 3) Colocar las cantidades del coagulante que se va a aplicar a las jarras en cada vasito mediante una pipeta. Succione el contenido del vasito con una jeringa hipodérmica con la aguja puesta, para extraer hasta la última gota.
- 4) Retire la aguja y coloque la jeringa delante de la jarra correspondiente. Ponga en funcionamiento el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = tiempo: 5 segundos, Velocidad = 300 rpm

Memoria 2 = tiempo: 20 minutos, Velocidad = 40 rpm

Si en el ábaco de la figura 5 entramos a las curvas que corresponden a una prueba con estatores con una velocidad de 300 rpm y temperatura promedio de 20 °C, podemos comprobar que en estas condiciones se consigue un gradiente de velocidad de aproximadamente 770 s^{-1} . Asimismo, durante la etapa de floculación con 40 rpm se estará aplicando un gradiente de velocidad de 52 s^{-1} que corresponde a un gradiente de floculación promedio.

- 5) Inicie el funcionamiento del equipo, aplicando en forma simultánea e instantánea el coagulante a todas las jarras. Cuide de que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida. Recuerde que para que el proceso sea bien simulado, el coagulante debe aplicarse en el punto de máxima turbulencia.
- 6) Si el agua requiere un alcalinizante, este debe añadirse antes del coagulante. No es necesario contabilizar el tiempo entre la aplicación de ambos. La dosis de alcalinizante se decidirá en una prueba especial, en la que manteniendo la dosis de coagulante constante, se aplicarán dosis variables de una suspensión de cal al 1% (10 gramos de cal en un litro de agua).
- 7) Cuando el proceso de floculación se inicie, estaremos atentos a identificar en qué jarra aparece primero formación de flóculos y anotaremos el tiempo en que esto ha ocurrido.
- 8) Instantes antes de que el proceso de floculación concluya, observe el tamaño del flóculo que se ha desarrollado y compárelo con la tabla de la figura 11-8.

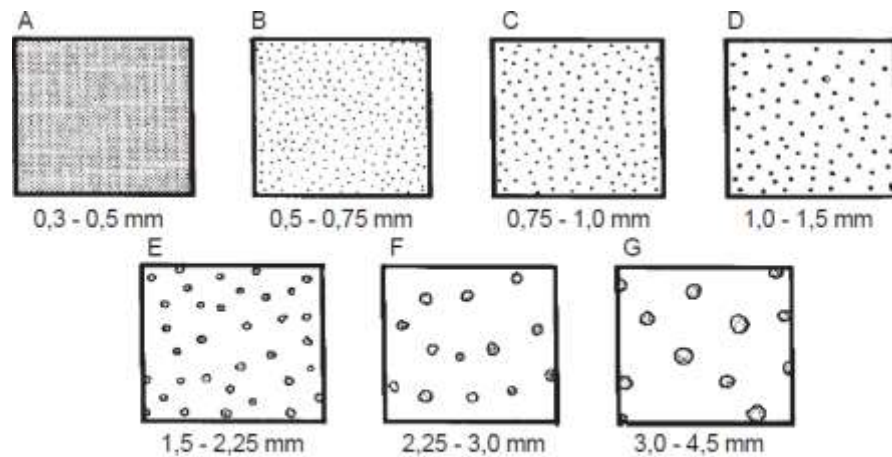


Figura 11-8. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la coagulación (según WRA)

- 9) Una vez que el equipo ha concluido con los tiempos de mezcla y floculación, se apaga automáticamente y se procede a retirar las jarras, colocar los tomadores de muestras, cebar los sifones utilizando una jeringa, atracar el extremo del sifón utilizando una liga o bandita (colocada alrededor de la jarra), y dejaremos sedimentar el agua entre 5 y 15 minutos.
- 10) Cumplido el tiempo de sedimentación seleccionado, descartar los primeros 10 mL de muestra retenidos en el sifón y tomar las muestras a todas las jarras en un volumen de aproximadamente 30 mL. Medir turbiedad y color. Si se requiere mayor cantidad de muestra para análisis adicionales (pH, hierro, manganeso, etcétera), tomarla posteriormente.
- 11) Los resultados se grafican en papel aritmético. Se selecciona como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.

Anexo 3. Método para Potencial de Hidrogeno.



Designation: D 1293 – 99 (Reapproved 2005)

Standard Test Methods for pH of Water¹

This standard is issued under the fixed designation D 1293; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of pH by electrometric measurement using the glass electrode as the sensor. Two test methods are given as follows:

Test Method A—Precise Laboratory Measurement	Sections 8 to 15
Test Method B—Routine or Continuous Measurement	16 to 24

1.2 Test Method A covers the precise measurement of pH in water utilizing at least two of seven standard reference buffer solutions for instrument standardization.

1.3 Test Method B covers the routine measurement of pH in water and is especially useful for continuous monitoring. Two buffers are used to standardize the instrument under controlled parameters, but the conditions are somewhat less restrictive than those in Test Method A.

1.4 Both test methods are based on the pH scale established by NIST (formerly NBS) Standard Reference Materials.²

1.5 Neither test method is considered to be adequate for measurement of pH in water whose conductivity is less than about 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Refer to Test Methods D 5128 and D 5464.

1.6 Precision and bias data were obtained using buffer solutions only. It is the user's responsibility to assure the validity of these test methods for untested types of water.

1.7 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

13. Procedure

13.1 Standardize the assembly with two reference buffer solutions as described in 12.2 to 12.5 and then wash the electrodes with three changes of water or by means of a flowing stream from a wash bottle.

13.2 Place the water sample in a clean glass beaker provided with a stirring bar and either a thermometer (for meters with manual temperature compensation) or an ATC probe (for meters with automatic temperature compensation).

13.3 Stir during the period of pH measurement at a rate that will prevent splashing and that will avoid loss or gain of acidic or basic gases by interchange with the atmosphere. When necessary, stir briskly enough to intermix the phases of a nonhomogeneous water sample. Stop the stirrer during periods of measurement if fluctuations in readings are observed. (See Appendix X1.3.4 and X1.4.3).

13.4 Insert the electrodes and determine a preliminary pH value (since this value may drift somewhat, it should be considered an estimated value). Measure successive portions of the water sample until readings on two successive portions differ by no more than 0.03 pH unit, and show drifts of less than 0.02 pH unit in 1 min. Two or three portions will usually be sufficient if the water is well buffered.

13.5 Record the pH and temperature of the sample.

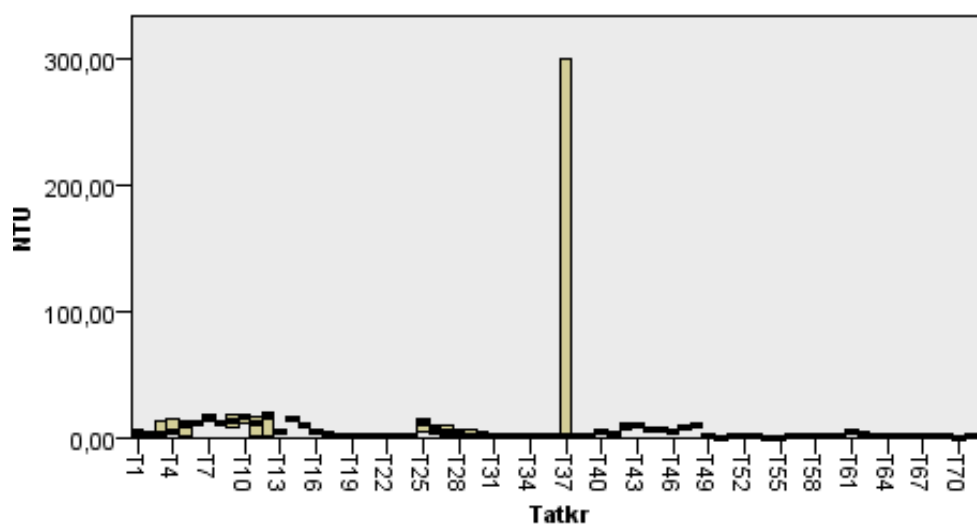
13.6 Measure the pH of slightly buffered waters (that are in equilibrium with air) essentially as described in 13.1 to 13.5, but measure the pH of successive portions until the readings for two successive portions differ by no more than 0.1 pH unit. Six or more portions may be necessary.

NOTE 2—Take special precautions if the sample is not in equilibrium with the carbon dioxide of the atmosphere protecting the sample from exposure to the air during measurement. *Measurement of unbuffered or slightly buffered samples is more reliably made in flow-type cells as described in Note 4. Test Methods D 5464 describe additional precautions that should be taken if the electrical conductivity of the sample is less than about 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.*

Anexo 4. Resultados Estadísticos

Estadísticas descriptivas									
Valor Z	Tratamiento	N	Media	Clasificación de medias	Valor Z	Tratamiento	N	Media	Clasificación de medias
-2.8	T54	3	0.64	8.2	-0.07	T63	3	2.35	105.8
-2.63	T56	3	1.02	14.2	0.01	T37	3	2.29	109
-2.47	T59	3	0.99	19.8	0.13	T39	3	2.34	113
-2.38	T53	3	1.04	23.3	0.16	T49	3	2.56	114.2
-2.31	T58	3	1.05	25.7	0.32	T29	3	2.34	120
-2.27	T50	3	0.9	27.3	0.43	T28	3	3.46	123.8
-2.22	T55	3	0.75	29	0.66	T41	3	4.2	132
-2.2	T70	3	0.92	29.8	0.67	T62	3	4.09	132.7
-2.15	T24	3	1.05	31.5	0.71	T2	3	4.12	133.8
-2	T33	3	1.08	36.7	0.81	T17	3	3.64	137.7
-2	T60	3	1.25	37	0.94	T61	3	4.85	142.2
-2	T69	3	1.08	36.7	0.96	T40	3	4.68	143
-1.91	T22	3	1.32	40	0.98	T27	3	5.73	143.7
-1.83	T23	3	1.33	42.8	1.06	T1	3	4.29	146.5
-1.72	T68	3	1.38	46.8	1.08	T3	3	4.03	147.3
-1.6	T18	3	1.4	51.3	1.16	T16	3	4.86	150
-1.47	T32	3	1.4	55.7	1.2	T13	3	5.28	151.7
-1.44	T36	3	1.36	57	1.38	T26	3	7.59	158
-1.44	T72	3	1.36	57	1.38	T4	3	4.68	157.8
-1.27	T67	3	1.65	63.2	1.39	T46	3	5.92	158.3
-1.19	T57	3	1.7	65.8	1.6	T45	3	6.89	165.7
-1.12	T66	3	1.43	68.3	1.63	T5	3	10.53	166.8
-1.07	T38	3	1.63	70.2	1.66	T44	3	7.59	168
-1.07	T71	3	1.7	70	1.84	T47	3	8.59	174.3
-0.94	T35	3	1.9	74.8	1.86	T11	3	12.77	175
-0.93	T65	3	1.74	75	1.98	T42	3	9.72	179.3
-0.9	T20	3	1.42	76.2	2.03	T12	3	17.65	181.3
-0.89	T52	3	1.86	76.7	2.07	T43	3	9.59	182.7
-0.81	T31	3	1.69	79.5	2.08	T25	3	11.25	183.2
-0.78	T21	3	1.7	80.5	2.09	T15	3	9.83	183.3
-0.71	T64	3	1.67	83.2	2.12	T48	3	9.65	184.3
-0.52	T34	3	2.02	89.8	2.36	T6	3	12.64	193
-0.52	T51	3	1.83	90	2.46	T8	3	12.59	196.5
-0.17	T19	3	2.33	102.3	2.47	T9	3	13.65	197
-0.1	T30	3	2.53	104.8	2.74	T10	3	17.92	206.5
-0.07	T63	3	2.35	105.8	2.75	T7	3	15.54	207
0.01	T37	3	2.29	109	2.76	T14	3	15.6	207.3

Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes



N total	216
Probar estadística	186,653
Grados de libertad	71
Sig. asintótica (prueba de dos caras)	,000

1. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.

Anexo 5. Panel Fotográfico de prueba de jarras.



Fotografía 1. Cloruro Férrico
Toma de muestra con los sifones



Fotografía 2.



Fotografía 3. Sedimentación



Fotografía .4 Pesado de
Sulfato de Aluminio



Fotografía 5. Potenciómetro



Fotografía 6. Test de jarras



Figura 7. Proceso de coagulación –floculación