

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“REMOCIÓN DEL FLUORURO EN AGUA POTABLE POR PRECIPITACIÓN-  
FLOCULACIÓN CON POLICLORURO DE ALUMINIO Y LECHADA DE  
CAL”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**ORNELA PANCCA PACOMPIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PROMOCIÓN 2007**

**PUNO-PERÚ**

**2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“REMOCIÓN DEL FLUORURO EN AGUA POTABLE POR PRECIPITACIÓN-  
FLOCULACIÓN CON POLICLORURO DE ALUMINIO Y LECHADA DE  
CAL”**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**ORNELA PANCCA PACOMPIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 16 DE SEPTIEMBRE DEL 2016**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE:**

:

Mg. HIGINIO ALBERTO ZUNIGA SANCHEZ

**PRIMER MIEMBRO**

:

Dr. TEOFILO DONAIRES FLORES

**SEGUNDO MIEMBRO**

:

Mg. GERMAN QUILTE CALIZAYA

**DIRECTOR DE TESIS**

:

Dr. GREGORIO PALOMINO CUELA

**PUNO - PERU**

**2016**

**ÁREA : TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**TEMA : TRATAMIENTO DE AGUAS**

**LÍNEA: TECNOLOGÍA AMBIENTAL RECURSOS NATURALES**

*DEDICATORIA*

A nuestro creador Dios padre todopoderoso,  
por haberme guiado y cuidado en todo este  
trayecto del saber y del bien. .

A mi adorado padre, don JUAN F. PANCCA  
MAMANI (QPD) y a mi adorada madre doña  
LEONCIA PACOMPIA VDA DE  
PANCCA, por el permanente e inmensurable  
apoyo, que por sus sabios consejos y por su  
gran esfuerzo hicieron posible el logro de mi  
noble profesión.

A mis hermanos:

PERCY, GABRIEL, WILSON, NARDO,  
LADERSON, con mucho Afecto y Cariño,  
por su contribución a mi buena formación  
profesional.

A una persona muy especial que sin  
importar lo que me pasaba continuó  
depositando su esperanza en mí.

## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano , muy en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, por haberme formado profesionalmente.
- Al Dr. Gregorio Palomino Cuela, Director de la presente Tesis, por su interés y apoyo para llevar a buen término esta presente investigación.
- Mi sincero agradecimiento a todos los Docentes de la Facultad, que en forma desinteresada me impartieron sus conocimientos a lo largo de mi formación profesional contribuyendo al logro de este objetivo.
- Hago extensivo mi gratitud, a todas mis amigas y compañeros de estudios muy en especial a Marisol Panclas Chambi, Noemi Rodrigo Vargas, Mery Soledad Chambi Ticona, que de una u otra manera me han motivado en la ejecución y culminación del presente trabajo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b>	
<b>.....</b>	<b>13</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	13
1.2. Problema central.....	14
1.3. Problema Específico.....	14
1.4. Antecedentes .....	14
1.5. Objetivos de la Investigación.....	17
1.5.1. Objetivo general.....	17
1.5.2. Objetivo específicos.....	17
1.6. Justificación.....	17
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>19</b>
<b>MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS.....</b>	<b>19</b>
2.1. Fluoruros .....	19
2.2. Fluoruros en la Naturaleza .....	19
2.3. Concentración de Fluoruros en Agua.....	21
2.4. Compuestos de Fluoruros.....	23
2.5. Precipitación Química.....	24
2.6. Coagulación.....	25
2.7. Sustancias Químicas Empleadas en la Coagulación .....	26
2.7.1. Sulfato de Aluminio.....	27
2.7.2. Cloruro Férrico .....	28
2.7.3. Sulfato Ferroso.....	29
2.7.4. Sulfato Férrico .....	30
2.7.5. Policloruro de Aluminio .....	31
2.8. Floculación.....	32
2.9. Sedimentación .....	33
2.10. Filtración.....	33
2.11. Marco conceptual .....	34

2.12.	Hipótesis .....	35
2.12.1.	Hipótesis general .....	35
2.12.2.	Hipótesis específicas .....	35
2.13.	Variables y Operacionalización de Variables.....	35
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>37</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>37</b>
3.1.	Equipos, Materiales y Reactivos .....	37
3.2.	Toma de Muestra de Agua .....	38
3.3.	Determinación de fluoruros.....	40
3.4.	Pruebas de jarras .....	40
3.5.	Coagulación y floculación.....	41
3.6.	Filtración de sólidos sedimentados .....	41
3.7.	Diseño experimental.....	42
3.8.	Diseño aplicado y factores seleccionados .....	44
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>46</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>46</b>
4.1.	Pruebas experimentales de remoción de fluoruros con policloruro de aluminio 46	
4.2.	Tratamiento estadístico del diseño factorial.....	48
4.3.	Análisis de varianza .....	49
4.4.	Estimación de efectos y modelo matemático .....	50
4.5.	Optimización de respuesta .....	51
4.6.	Diagrama de Pareto .....	51
4.7.	Pruebas experimentales de remoción de fluoruros con lechada de cal .....	54
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>56</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>60</b>
<b>FOTOGRAFÍAS DE MUESTREO, ANÁLISIS Y DE PRUEBAS.....</b>		<b>64</b>

### LISTA DE TABLAS

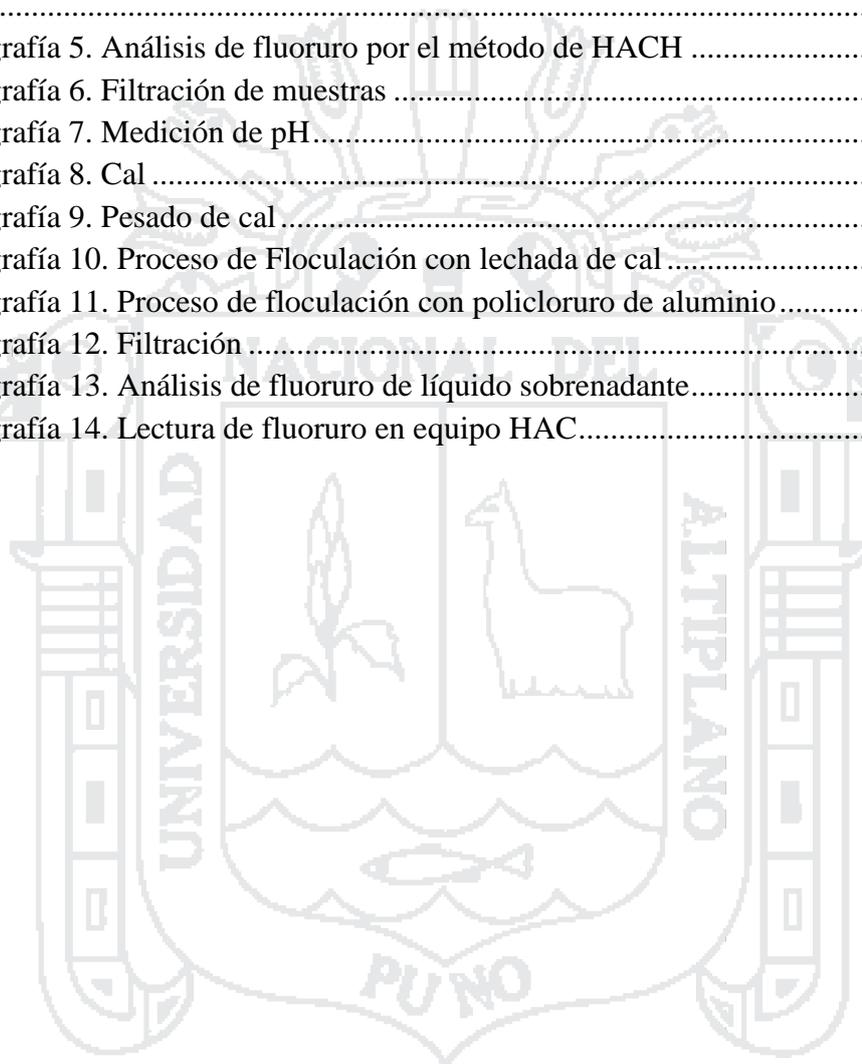
Tabla 1 Propiedades físico - químicas de policloruro de aluminio.....	32
Tabla 2 Operacionalización de las variables.....	36
Tabla 3 Instrumento de recojo de muestra.....	39
Tabla 4 Instrumento de recojo de Muestra .....	40
Tabla 5 Niveles máximos y mínimos .....	43
Tabla 6 Matriz de diseño factorial .....	44
Tabla 7 Resultados de porcentaje de remoción de fluoruro.....	46
Tabla 8 Matriz de diseño factorial .....	48
Tabla 9 Análisis de varianza para porcentaje de remoción de fluoruro.....	49
Tabla 10 Coeficiente de regresión para porcentaje de remoción de fluoruro .....	50
Tabla 11 Variables óptimos del proceso de precipitación y floculación de fluoruro .....	51
Tabla 12 Resultados d prueba de remoción de fluoruro con lechada de cal.....	55
Tabla 13 Muestreo de agua y determinación de fluoruros de diferentes lugares de la región Puno .....	60
Tabla 14 Límites máximo permisible (LMP) referenciales de los parámetros de calidad del agua recomendado por OMS .....	61
Tabla 15 Límites máximos permisibles de los parámetros microbiológicos y parasitológicos. ....	62
Tabla 16 Límites máximos permisibles de parámetros Químicos inorgánicos y orgánicos.....	63

### LISTA DE FIGURAS

figura 1 Diagrama de bloque .....	42
Figura 2 Diagrama de pareto estandarizado .....	51
Figura 3 Efectos principales para remoción de fluoruro.....	52
Figura 4 Grafica de interacciones .....	53
Figura 5 Superficie de respuesta estimada.....	53
Figura 6 Grafica de probabilidad normal.....	54

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Muestreo de la provincia de Juli .....	64
Fotografía 2. Muestreo del distrito de Taraco.....	64
Fotografía 3. Muestras para análisis de contenido de fluoruro en Laboratorio de Química.....	64
Fotografía 4. Preparación de muestra para análisis de fluoruro por el método de HACH .....	65
Fotografía 5. Análisis de fluoruro por el método de HACH .....	65
Fotografía 6. Filtración de muestras .....	65
Fotografía 7. Medición de pH.....	66
Fotografía 8. Cal .....	66
Fotografía 9. Pesado de cal .....	66
Fotografía 10. Proceso de Floculación con lechada de cal .....	67
Fotografía 11. Proceso de floculación con policloruro de aluminio.....	67
Fotografía 12. Filtración .....	67
Fotografía 13. Análisis de fluoruro de líquido sobrenadante.....	68
Fotografía 14. Lectura de fluoruro en equipo HAC.....	68



## RESUMEN

El presente trabajo consiste en estudio de remoción de fluoruro a partir de agua potable mediante precipitación, floculación y sedimentación con policloruro de aluminio y lechada de cal.

Según los monitoreos realizados las aguas de pozo de Taraco contiene 2,23 mg/L de  $F^-$  y las aguas de pozo Juli 2,20 mg/L de  $F^-$ . Los resultados del proceso de remoción de fluoruro con poli cloruro de aluminio fue de 56%, con una reducción de 2,23 mg/L  $F^-$  a 0,98 mg/L  $F^-$ . Durante el proceso de floculación fue controlado el pH, el tiempo y la velocidad de agitación. La remoción de fluoruro con lechada de cal se ha logrado reducir de 2,23 mg/L de  $F^-$  a 1,5 mg/L de  $F^-$ . Las pruebas experimentales de precipitación y floculación se realizaron en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química. Los equipos utilizados son Test Jarra y pH metro. En cuanto al método estadístico se ha utilizado el diseño factorial  $2^3$ , el cual ha permitido optimizar los parámetros del proceso de floculación.

En este estudio comprende el tratamiento de aguas de pozo del altiplano el cual fue llevado a cabo a nivel de laboratorio con la finalidad de remover el fluoruro de agua potable.

**Palabras claves:** Fluoruro, policloruro de aluminio, cal, coagulación, floculación.

## ABSTRACT

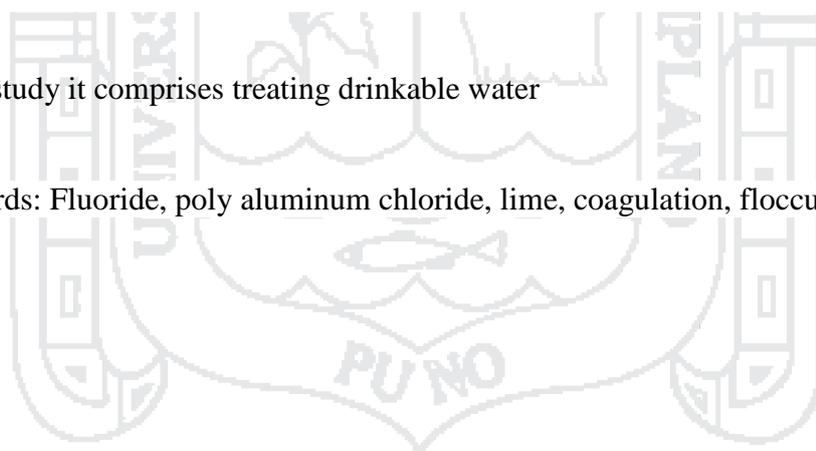
This work involves study of fluoride removal from drinkable water by precipitation, flocculation and sedimentation with poly aluminum chloride and lime milk.

According to monitoring conducted waters Taraco well contains 2.23 mg / L F<sup>-</sup> and well water Juli 2.20 mg / L F<sup>-</sup>. The results of the fluoride removal process with poly aluminum chloride was 56%, with a reduction of 2.23 mg / L 0.98 mg F<sup>-</sup> to / L F<sup>-</sup>. During the flocculation process it was controlled pH, time and stirring speed. Removal of fluoride with lime milk has been reduced to 2.23 mg / L F<sup>-</sup> 1.5 mg / L F<sup>-</sup>. Experimental tests of precipitation and flocculation were performed in the laboratory quality control of the Faculty of Chemical Engineering. Test equipment used are Pitcher and pH meter. As for the statistical method it was used factorial design 2<sup>3</sup>, which has optimized parameters flocculation process.

In this study it comprises treating the Altiplano well water which was carried out in the laboratory in order to remove fluoride from drinkable water.

In this study it comprises treating drinkable water

Keywords: Fluoride, poly aluminum chloride, lime, coagulation, flocculation.



## INTRODUCCIÓN

La presencia de fluoruros en agua potable en concentraciones menores a 1,50 mg/L de  $F^-$  es beneficioso, pero a concentraciones mayores a 1,50 mg/L de  $F^-$  es dañino para la salud.

El presente trabajo de investigación intitulado **“REMOCIÓN DEL FLUORURO EN AGUA POTABLE POR PRECIPITACIÓN-FLOCULACIÓN CON POLICLORURO DE ALUMINIO Y LECHADA DE CAL”** se realizó con el objetivo de remover fluoruros a partir de agua potable por proceso de precipitación y floculación.

El proceso consiste en preparar la solución de coagulante de policloruro de aluminio y por otro lado lechada de cal, esta técnica es realizada en equipo Test Jarra. Se realizó ensayos a escala laboratorio, con la finalidad de determinar las condiciones óptimas para un tratamiento económico y eficiente.

Las variables a determinar son las siguientes: pH, concentración de floculante y velocidad de agitación, cuyos resultados serán aplicados en el tratamiento de aguas contaminadas con fluoruros.

Las pruebas de floculación por agitación se ejecutaron en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química. En cuanto se refiere al método estadístico, se utilizó el Diseño Factorial  $2^n$ , el cual ha permitido realizar 11 pruebas experimentales con 3 réplicas en el centro, así mismo se optimizó los parámetros del proceso de floculación con poli cloruro de aluminio.

En este documento se presentan algunas opciones tecnológicas para el tratamiento del agua de uso y consumo humano y desinfección en función de la calidad del agua. Se inicia con una descripción de las aguas superficiales y subterráneas como fuentes de abastecimiento, sus problemas de calidad y tratamientos necesarios. La especial atención se da a la desinfección porque en zonas rurales es, en muchos casos, el único tratamiento que recibe el agua de consumo y puede evitar muchas enfermedades infecciosas de carácter agudo que afectan a la población.

Además presentan opciones de tratamiento que se pueden utilizar para mejorar la calidad de agua, de acuerdo a las características que presente esta, como es el caso de la presencia de contaminantes inorgánicos en el agua –metales pesados- y que presentan cierta dificultad en su remoción.

La coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración.

Este proyecto se centró en el subproceso de Coagulación – Floculación, evaluando los siguientes aspectos: Nuevos coagulantes: como poli cloruro de aluminio y lechada de cal.

Este trabajo se inicia con una caracterización del agua potable, con el fin de identificar el nivel de contaminación que presenta, es decir, la cantidad de fluoruros que contiene.

La coagulación química y la dosificación de reactivos se seleccionaron mediante la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala. De acuerdo con los resultados se hacen algunas recomendaciones. Sin embargo se procede a evaluar los reactivos actuales y proponer las posibles mejoras

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del problema

La prestación del servicio de agua potable es de vital importancia para el mejoramiento en la calidad de vida de cualquier comunidad. Por esta razón, es importante remover el fluoruro ya que es uno de los componentes naturales de fuente de agua que en concentraciones superiores a las establecidas por las normas correspondientes genera daños al ambiente y a la salud de quienes consumen esta agua.

La presencia de fluoruro en el agua potable es un factor fisicoquímico muy importante que se debe evaluar continuamente. Se sabe que la ingesta de agua con un nivel de fluoruro de 0,5 mg/L, puede ayudar a prevenir la caries dental en la población. Sin embargo, los dientes y los huesos se dañan cuando se consume agua con un nivel de fluoruro mayor a 1,5 mg/L. Dependiendo del nivel de fluoruro, los problemas de salud pueden ser desde manchado de dientes o fluorosis dental hasta fluorosis esquelética. Por este motivo, las fuentes de agua que contienen niveles elevados de fluoruro tienen que ser tratadas para reducir la concentración de fluoruro hasta un límite permisible y no nocivo a la salud. Medellín-Castillo. et al. (2007).

En muchos lugares de la región de Puno, especialmente en la zona de Juli (2,20 mg/L) y Taraco (2,23 mg/L) se ha encontrado agua de pozos con presencia de fluoruro cuyas concentraciones superan los límites máximos permisibles establecidas por las Normas Técnicas Peruanas. Análisis propio (2015).

La Organización Mundial de Salud recomienda una concentración entre 0,5 a 1,2 mg/L de fluoruro dependiendo de las condiciones climáticas. La Norma Oficial Mexicana señala como concentración máxima en agua potable de 1,5 mg/L.

En el presente trabajo de investigación se pretende remover fluoruros en agua potable por precipitación y floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal.

### 1.2. Problema central

- ¿Cuál será el porcentaje de remoción de fluoruro de agua potable por precipitación y floculación con policloruro de aluminio y cal?

### 1.3. Problema Específico

- ¿Cuál será el pH óptimo en la floculación con Policloruro de aluminio y lechada de cal?
- ¿Cuál es la dosis óptima de policloruro de aluminio y lechada de cal en la floculación?
- ¿Cuál es la velocidad de agitación adecuada en la floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal?

### 1.4. Antecedentes

Mohapatra, et al (2004), existen varios métodos para la eliminación de fluoruro, como precipitación, adsorción, intercambio iónico y procesos de membrana como: ósmosis inversa, nanofiltración, electrodiálisis y la técnica de Nalgonda que se basan en la adición de un álcali, cloruro, sulfato de aluminio o cloruro de aluminio o ambos.

Bishop y Sansoucy (1979), la remoción de fluoruro es factible con sulfato de aluminio pero requiere de dosis muy elevadas e indican la importancia de mantener el pH entre 6 y 7 para obtener una mejor eliminación de fluoruro. La utilización de sulfato de aluminio y óxido de calcio, mezclados y adicionados al agua contaminada con fluoruro y con una agitación permite que se formen flóculos de hidróxido de aluminio que se remueven por simple sedimentación, esta técnica es conocida como Nalgonda. La reducción de fluoruro fue de 2,5 a 1,2 mg/L de F.

Choi y Chen. (1979), la remoción por alúmina decrece rápidamente cuando el pH es inferior a 4,5 y superior a 8,5 la combinación de métodos para la defluorización utilizando la técnica de Nalgonda y hueso calcinada es recomendable para la eliminación de fluoruro en el agua.

Mjengera (2000), el carbón de hueso es la técnica más efectiva para la remoción en aguas con altas concentraciones de fluoruro, la utilización de altas concentraciones de alumbre para la eliminación de fluoruro no es efectiva, por el incremento de aluminio en el agua tratada.

Kaseva (2006), la capacidad de adsorción de fluoruro en hueso calcinado con mayor potencial de adsorción se obtiene cuando las partículas de hueso son pequeñas (5 a 1 mm) y la temperatura de calcinación del hueso es de 500°C durante 2 horas.

Valenzuela. et al (2006), la remoción de fluoruro puede realizarse utilizando hidroxiapatita, calcita, cuarzo, o bien cuarzo activado por iones férrico. Se ha reportado que el fluoruro es más rápidamente adsorbido por cuarzo, calcita y fluoruro de calcio, alcanzando el equilibrio en tan sólo en 2 minutos en condiciones de agitación. El porcentaje de remoción de fluoruro alcanzada fue de 60%.

Saha H. (1993), realizó experimentos para disminuir la presencia de flúor utilizando cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) en presencia de cloruro de calcio, llevándose a cabo la formación de un complejo, el cual está constituido por el aluminio, calcio y el fluoruro. Este complejo es estable y no se rompe fácilmente, dando como resultado una buena precipitación del mismo. La concentración de fluoruro en agua es reducida de 3,0 mg/L a 1,0 mg/L de  $F^-$ .

Link W.E. y J.G. Rabosky, (1976), reportaron que la adición de hidróxido de calcio disminuye la presencia de flúor en agua residual de industrias sin embargo puede aumentar el pH.

Así también mencionan que el uso de carbonato y bicarbonato de calcio puede tener un menor efecto en el pH de agua a tratar y puede disminuir la presencia de flúor.

Stephenson. et al (1996), establece que la coagulación y floculación son procesos donde compuestos como sales metálicas y/u óxidos metálicos o hidróxidos como la cal, son agregadas al efluente con la finalidad de desestabilizar la materia coloidal y causar una aglomeración de pequeñas partículas hasta alcanzar tamaños considerables y formar lo que se llaman flocs o flóculos, que son más fácilmente removidos por gravedad. La efectividad del proceso es influenciado por la concentración del agente coagulante, la dosificación del coagulante, el pH del agua y la fuerza iónica así como la concentración y naturaleza de los compuestos orgánicos.

Van-Benschoten. et al (1990), Las sales de aluminio y el policloruro de aluminio (sales de aluminio polimerizadas) han sido ampliamente usados como coagulantes en el tratamiento de agua potable y aguas residuales, sin importar tanto las características químicas y calidad biológica. Estos son efectivos en la remoción de un amplio rango de impurezas del agua incluyendo partículas inorgánicas, tales como arcillas, partículas coloidales, sustancias orgánicas naturales disueltas y microorganismos patógenos. La formación de *flocs* está afectada por la concentración de Aluminio, el mezclado, el tipo y concentración de aniones, el tiempo de contacto y el pH. La reducción de concentración de fluoruro en agua fue de 2,8 mg/L a 0,9 mg/L de  $F^-$ .

Duan. et al (2003), Casi todas las impurezas coloidales en el agua están cargadas negativamente y por lo tanto pueden ser estables como resultado de la repulsión eléctrica. La desestabilización del coloide se puede llevar a cabo agregando cantidades relativamente grandes de sales o cantidades más pequeñas de cationes que interactúen específicamente con los coloides y neutralicen su carga. Cationes altamente cargados tales como el  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$  podrían ser eficaces a este respecto. El exceso de dosificación puede dar la revocación de la carga y el re estabilización de coloides.

Weber. et al (1979), Existe un método para llevar a cabo la coagulación eficaz en aguas de turbidez baja, que consiste en la adición de más partículas como ayuda de coagulante (arcillas o cal) lo que permite aumentar la concentración coloidal y se produce un flóculo más constante.

## 1.5. Objetivos de la Investigación

### 1.5.1. Objetivo general

- Evaluar el porcentaje de remoción de fluoruro de agua potable por precipitación y floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal.

### 1.5.2. Objetivo específicos

- Determinar el pH óptimo en la precipitación y floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal.
- Encontrar la dosis óptima de policloruro de aluminio y lechada de cal en la precipitación y floculación
- Determinar la velocidad de agitación óptima en la precipitación y floculación.

## 1.6. Justificación

### Técnica

La remoción de fluoruros de agua potable por precipitación y floculación utilizando policloruro de aluminio y lechada de cal, constituye una tecnología eficiente ya que el policloruro de aluminio posee excelentes propiedades en el tratamiento de aguas. Se aplicará el proceso de floculación a todas las aguas potables contaminadas en el ámbito de la región de Puno. La tecnología a utilizarse servirá de base para estudio de pre factibilidad y factibilidad.

### Económico

Los métodos de eliminación de fluoruro más extendidos se basan en la precipitación-floculación con la ayuda de sales de calcio y aluminio, que se han popularizado debido a su bajo costo y a que puede llevarse a cabo en escala doméstica o comunitaria. Sin embargo, la química del sistema, muy dependiente del pH hace que el proceso sea potencialmente peligroso para las personas debido al aumento de exposición al aluminio

y para el medio general ya que origina un complicado problema de gestión de residuos. Otras técnicas como la ósmosis inversa o la electrodiálisis y los métodos basados en la destilación compiten con el anterior, pero requieren mayor inversión y también resultan poco aptas para un uso doméstico.

### **Social**

En algunas zonas del Departamento de Puno, en las que el acceso al agua potable se limita al agua subterránea, se enfrentan al problema adicional de su excesivo contenido en fluoruro. Hasta 1,5 mg/L el fluoruro no provoca efectos adversos, pero a mayores concentraciones fluorosis dental (~ 4 mg/L) y osteosclerosis general (> 4 mg/L).

La organización mundial de la salud recomendó en 1984 (con reevaluaciones en 1996 y 2004) el establecimiento de un valor umbral de 1,5 mg/L en agua como umbral bajo el cual los efectos negativos de la ingesta de flúor son despreciables. En Estados Unidos, el límite obligatorio marcado por el MCL (Maximum Contaminant Level) de Primary Drinking Water Standards de EPA es de 4,0 ppm. Para menores concentraciones de fluoruros el agua es potable con la salvedad de que debe limitarse la ingesta de fluoruros en niños menores de ocho a diez años. Para la OMS, el valor tampoco es un parámetro fijo, sino un valor orientativo que debe adaptarse a las condiciones personales y locales, tales como edad, dieta y clima.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

#### 2.1. Fluoruros

Los fluoruros son definidos propiamente como compuestos binarios o sales de flúor y otro elemento. Algunos ejemplos de fluoruros son el fluoruro de sodio y el fluoruro de calcio. Ambos son sólidos blancos. El fluoruro de sodio se disuelve fácilmente en agua, pero no así el fluoruro de calcio. El fluoruro de sodio se añade a menudo a los suministros de agua potable y a una variedad de productos dentales, como por ejemplo pastas dentales y enjuagues dentales, para prevenir caries dentales. Otros fluoruros que se usan comúnmente para fluorar el agua son el ácido fluorosilícico y el fluorosilicato de sodio. Kaseva M. E. (2006).

#### 2.2. Fluoruros en la Naturaleza

Los fluoruros se encuentran naturalmente en rocas en el suelo, y en carbón y arcilla en la corteza terrestre. Se liberan al aire en polvo que levanta el viento. El fluoruro de hidrógeno se libera al aire cuando sustancias que contienen fluoruro, tales como el carbón, minerales y arcilla, se calientan a alta temperatura. Esto puede ocurrir en plantas de energía que utilizan carbón como combustible, en fundiciones de aluminio, en plantas que manufacturan abonos de fosfato, en la manufactura de vidrio, ladrillos y baldosas, y en fábricas de plásticos. Estas facilidades también pueden liberar fluoruros adheridos a partículas. La fuente natural de fluoruro de hidrógeno y de otros fluoruros que se liberan al aire son las erupciones volcánicas.

El flúor no puede ser destruido en el ambiente; solamente puede cambiar de forma. Los fluoruros que se liberan a la atmósfera desde volcanes, plantas de energía, y desde otros procesos de alta temperatura son generalmente el fluoruro de hidrógeno en forma de gas mientras que otros están adheridos a partículas muy pequeñas. Los fluoruros que se encuentran en polvo que sopla el viento se encuentran generalmente en partículas más grandes. Estas partículas caen al suelo por la gravedad o son removidas del aire por la lluvia. Los fluoruros adheridos a partículas muy pequeñas pueden permanecer en el aire durante muchos días. El gas de fluoruro de hidrógeno es absorbido por la lluvia y por las nubes y la niebla ácida para formar ácido fluorhídrico líquido, el que caerá a la tierra principalmente en la precipitación. Los fluoruros que se liberan al aire se depositan eventualmente en el suelo o en el agua.

En el agua, los fluoruros se asocian con varios elementos presentes en el agua, principalmente con aluminio en agua dulce y con calcio y magnesio en agua de mar, y se depositan en el sedimento en donde se adhieren fuertemente a partículas en el sedimento. Cuando se depositan en el suelo, los fluoruros son retenidos firmemente por el suelo, formando fuertes asociaciones con los componentes del suelo. El movimiento del agua a través del suelo remueve solamente una pequeña cantidad de fluoruros del suelo. Los fluoruros pueden ser incorporados y acumulados por las plantas o pueden depositarse en forma de polvo en las partes altas de las plantas. La cantidad de fluoruro incorporado por las plantas depende del tipo de planta, la naturaleza del suelo, y de la cantidad y la forma de fluoruro en el suelo. Se sabe que las plantas de té acumulan fluoruro en las hojas. Los animales que comen plantas que contienen fluoruro pueden acumular fluoruro. Sin embargo, el fluoruro se acumula principalmente en los huesos o en el caparazón en vez de la porción comestible. Kaseva M. E. (2006).

Los fluoruros se encuentran normalmente en el aire en cantidades muy pequeñas. Los niveles que se han medido en áreas alrededor de ciudades son generalmente menores de 1 microgramo (la millonésima parte de un gramo) de fluoruro por metro cúbico de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En áreas rurales, los niveles son aún más bajos. La cantidad de fluoruro que usted respira en un día es mucho menor que la que consume a través de los alimentos y el agua. Usted puede respirar niveles de fluoruro más altos en áreas cerca de plantas de energía

que usan carbón como combustible o cerca de industrias relacionadas con fluoruros (por ejemplo, fundiciones de aluminio, plantas que manufacturan abonos de fosfato) o cerca de sitios de desechos peligroso. Kaseva M. E. (2006).

### 2.3. Concentración de Fluoruros en Agua

El promedio de los niveles de fluoruros en aguas superficiales es cerca de 0,2 partes de fluoruro por millón de partes de agua. Los niveles de fluoruros en aguas de manantial generalmente varían de 0,02 hasta 1,5 ppm, pero a menudo sobrepasan 1,5 ppm en áreas del suroeste de Estados Unidos. Muchas comunidades añaden flúor a sus suministros de agua; el nivel de flúor que se recomienda es alrededor de 1 ppm. En Estados Unidos, aproximadamente 15000 sistemas de agua que sirven a cerca de 162 millones de personas contienen niveles óptimos de flúor entre 0,7 y 1,2 ppm, ya sea como resultado de condiciones naturales o de ajustes artificiales. Las personas que viven en áreas con agua sin flúor pueden estar expuestas a través de bebidas o alimentos procesados en áreas que poseen flúor. Usted estará expuesto a los fluoruros en el agua que bebe o en bebidas preparadas con agua fluorada. (Link y Rabosky, 1977)

La concentración de fluoruros en suelos varía generalmente entre 200 y 300 ppm. Sin embargo, los niveles pueden ser más altos en áreas con yacimientos minerales que contienen fluoruros. También pueden encontrarse niveles más altos en áreas donde se usan abonos con fosfatos, donde hay plantas de energía que usan carbón como combustible o industrias que liberan fluoruros, o cerca de sitios de desechos peligrosos. También puede estar expuesto a los fluoruros a través de la dieta. Mientras los alimentos generalmente contienen niveles bajos de fluoruros, los alimentos cultivados en áreas donde los suelos tienen cantidades altas de fluoruros o donde se usaron abonos con fosfatos pueden tener niveles más altos de fluoruros. El té y algunos mariscos tienen niveles altos de fluoruros. (Link y Rabosky, 1977)

La ingesta diaria promedio de fluoruro para adultos a través de los alimentos y el agua es aproximadamente 1 miligramo (1 mg), también puede estar expuesto a los fluoruros en productos dentales, tales como pasta dental, geles dentales y enjuagues dentales. Los productos dentales domésticos como por ejemplo pasta dental, enjuagues y geles que se aplican tópicamente contienen concentraciones altas de fluoruros (entre 230 y 12300 ppm) y no deben ser ingeridos.

Los productos dentales de mayor uso, las pastas dentales, contienen entre 230 y 1100 ppm de fluoruro, generalmente en la forma de fluoruro de sodio. Si usted traga estos productos, se expondrá a cantidades más altas de fluoruro. Un alto porcentaje de la cantidad total de fluoruro a la que está expuesto un niño menor de 8 años de edad lo constituye la ingestión de pasta dental. La Administración de Drogas y Alimentos de EE. UU. Requiere que el rótulo de los tubos de pasta dental contenga instrucciones para minimizar la ingestión de fluoruro por parte de los niños, incluso la recomendación de usar una cantidad de pasta dental del tamaño de un guisante, y la supervisión de los padres cuando los niños se cepillan los dientes.

Usted también puede estar expuesto a niveles más altos de fluoruro si trabaja en industrias que usan productos que contienen fluoruro, particularmente en la industria electrónica en la cual puede que el fluoruro de hidrógeno se use para pulir pantallas de televisores o para limpiar chips de silicio y en plantas que manufacturan abonos de fosfato. La exposición se deberá principalmente a la inhalación de fluoruro de hidrógeno o polvo que contiene fluoruro. La exposición en el trabajo disminuirá si se usan sistemas de ventilación o máscaras de protección.

Los reglamentos y recomendaciones pueden ser expresados como «niveles que no deben excederse» en el aire, agua, suelo o alimentos y se basan generalmente en niveles que afectan a los animales. Estos niveles luego se ajustan para la protección de seres humanos. En ciertas ocasiones estos «niveles que no deben excederse» difieren entre organizaciones federales debido a las diferentes duraciones de exposición (una jornada de 8 horas al día o de 24 horas al día), el uso de diferentes estudios en animales u otros factores. (Link y Rabosky, 1977)

#### 2.4. Compuestos de Fluoruros

El fluoruro de sodio, el fluoruro de hidrógeno y el flúor han sido clasificados como sustancias peligrosas por la EPA. El gobierno federal ha establecido normas y recomendaciones para proteger a los trabajadores de los posibles efectos adversos de los fluoruros, el fluoruro de hidrógeno y el flúor en el aire del trabajo. La OSHA ha establecido un límite de 0,2 miligramos por metro cúbico de aire ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) para flúor, 2,0  $\text{mg}/\text{m}^3$  para fluoruro de hidrógeno y 2,5  $\text{mg}/\text{m}^3$  para fluoruro durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas a la semana. El NIOSH recomienda niveles de 0,2  $\text{mg}/\text{m}^3$  para flúor, 2,5  $\text{mg}/\text{m}^3$  para fluoruro de hidrógeno y 2,5  $\text{mg}/\text{m}^3$  para fluoruro de sodio durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas a la semana.

El gobierno federal también ha establecido normas y recomendaciones para proteger al público de los posibles efectos adversos del fluoruro en el agua potable. La EPA ha establecido que la cantidad máxima de fluoruro que se permite en el agua potable es 4,0 miligramos por litro ( $\text{mg}/\text{L}$ ).

Para prevenir las caries dentales, el Servicio de Salud Pública (PHS) ha recomendado desde el año 1962 que los suministros de agua pública contengan una concentración de fluoruro entre 0,7 y 1,2  $\text{mg}/\text{L}$ . Los científicos del PHS que representan a los Institutos Nacionales de Salud, a los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades, la FDA, la ATSDR y otras agencias gubernamentales llevaron a cabo el año 1991 una extensa evaluación de la literatura biomédica mundial acerca de los riesgos y beneficios del fluoruro. El estudio del PHS establece que el fluoruro en el agua potable reduce considerablemente las caries dentales.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2003. Reseña Toxicológica de los Fluoruros, Fluoruro de Hidrógeno y Flúor (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

## 2.5. Precipitación Química

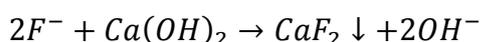
La precipitación química es un proceso de tres pasos que consiste en la coagulación, la floculación y la sedimentación. Las fuerzas entre las partículas de los contaminantes se reducen o eliminan mediante la adición de productos químicos, lo que permite la interacción de partículas mediante el movimiento molecular y la agitación física. La mezcla rápida permite la dispersión en el agua residual del producto químico utilizado en el tratamiento y promueve el choque de partículas, lo que hace que las partículas se agrupen para formar otras de mayor tamaño, es decir la coagulación. Los productos químicos añadidos para promover dicha agregación se denominan coagulantes y tienen dos propósitos básicos:

- 1.- desestabilizar las partículas, lo que permite la interacción, y
- 2.- promover la agrupación de partículas, reforzando así la floculación.

Después de un período de mezcla rápida es necesario disminuir la velocidad de la mezcla para que después de un período de mezcla rápida es necesario disminuir la velocidad de la mezcla para que se formen flóculos más grandes. (Si la velocidad de mezcla es alta, los flóculos continúan siendo destruidos por excesivo contacto físico). Este proceso se denomina floculación. Debido al tamaño de las partículas sigue siendo necesario algo de mezcla para que exista contacto entre las masas de sólidos y promover así la formación de flóculos que se sedimentaran rápidamente.

Durante la precipitación, los sólidos se separan del líquido normalmente por sedimentación, lo que debe resultar en dos capas claramente visibles: una sólida y una líquida, que pueden separarse fácilmente.

El ión fluoruro puede ser precipitado agregando hidróxido de calcio a una solución con flúor para formar un precipitado de fluoruro de calcio acorde a la siguiente reacción:



Sin embargo, para formar el precipitado de fluoruro de calcio, el producto de solubilidad del calcio debe ser excedido. Si el calcio y el fluoruro están presentes en grandes concentraciones debe haber valores mínimos de solubilidad, para que el flúor pueda precipitar como fluoruro de calcio en la solución acorde a la expresión del producto de solubilidad:

$$[\text{Ca}^{++}][\text{F}^{-}]^2 = K_{sp} = \text{Constante}$$

$$K_{sp} = 3,4 \times 10^{-11} \text{ a } 18^{\circ}\text{C}$$

$$= 3,95 \times 10^{-11} \text{ a } 26^{\circ}\text{C}$$

Dado que la constante del producto de la solubilidad, es el producto de la concentración del calcio y la del fluoruro, debe ser igual al  $K_{sp}$  siempre. Consecuentemente, si el ión  $\text{Ca}^{++}$  se incrementa, entonces el ión  $\text{F}^{-}$  decrece para mantener igual la constante. Link W.E and Rabosky J. G. (1977)

## 2.6. Coagulación

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles, entre estas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas pueden ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

La coagulación se lleva generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos.

El primero esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.

El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. La remoción de partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

La coagulación está fundamentalmente en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como pH, alcalinidad, color verdadero, turbiedad, temperatura, fuerza iónica, sólidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaños de las partículas en estado coloidal y en suspensión, Kirchmer (1981).

### **Mecanismos de coagulación**

En el tratamiento del agua será necesario alterar la fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

- Compresión de la capa difusa
- Adsorción y neutralización
- Barrido
- Adsorción y formación del puente

### **2.7. Sustancias Químicas Empleadas en la Coagulación**

A la variedad de productos químicos empleados en la coagulación se los clasifica como coagulantes, modificadores de pH ayudantes de coagulación, Kirchmer (1981).

#### **Coagulantes**

Los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso y férrico y el cloruro-sulfato férrico.

### 2.7.1. Sulfato de Aluminio

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ .

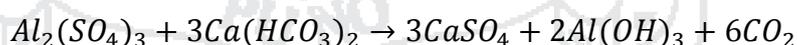
Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en  $Al_2O_3$ , es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de  $1,000 \text{ Kg/m}^3$ .

El contenido en alúmina  $Al_2O_3$ , de la forma líquida fluctúa generalmente entre 8 y 8,5%; es decir, 48 a 49% en equivalente polvo o también 630 a 650 g de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  por litro de solución acuosa.

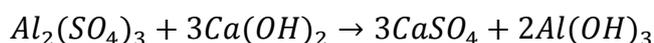
El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8 según la relación molar Sulfato/alúmina. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es necesario tener en cuenta la tendencia ácida para la preparación de las soluciones y los empaques para su distribución, y emplear por lo general materiales de plástico.

Principales reacciones del sulfato de aluminio con la alcalinidad.

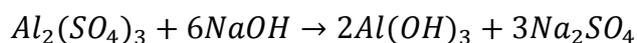
- 1) Sulfato de aluminio (líquido o sólido)



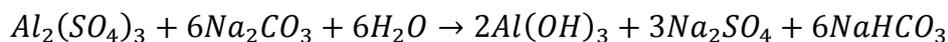
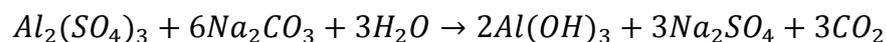
- 2) Sulfato de aluminio + cal



- 3) Sulfato de aluminio + soda cáustica



## 4) Sulfato de aluminio + carbonato sódico

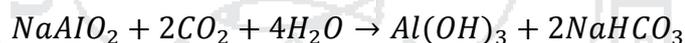
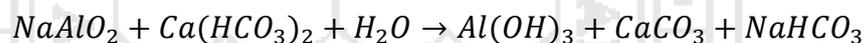
**Otras especies alumínicas**

Se puede emplear también otras sales de aluminio como el cloruro de aluminio y el aluminato sódico. El cloruro de aluminio  $AlCl_3$ , se presenta en forma sólida o líquida y se utiliza preferentemente esta última (masa volumétrica de 1,29 Kg/dm<sup>3</sup>, equivalente a un contenido de  $Al_2O_3$  del 11,4%).

## Reacciones de cloruro de aluminio



## Reacciones de aluminato sódico

**2.7.2. Cloruro Férrico**

Se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua. La forma sólida es cristalina, de color pardo, deliquescente. Se funde fácilmente en su agua de cristalización a 34°C, por lo que es necesario protegerla del calor.

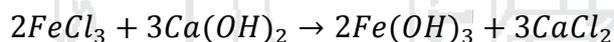
La forma líquida comercial tiene un promedio de 40% de  $\text{FeCl}_3$ . Para evitar toda confusión entre los contenidos de producto puro o de producto comercial, es recomendable expresar la dosis de coagulantes de Fe equivalente; es decir, 20,5% para la fórmula sólida y 14% aproximadamente para la solución acuosa comercial. En presencia de hierro, las soluciones acuosas de cloruro férrico se reducen rápidamente a cloruro ferroso  $\text{FeCl}_2$ . Esta reacción explica su gran poder corrosivo frente al acero, y la necesidad de seleccionar adecuadamente el material de los recipientes de almacenamiento, de preparación y de distribución.

Reacciones del cloruro férrico en el agua

1) Con la alcalinidad



2) Con la cal



3) Con el aluminato sódico



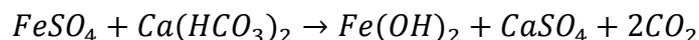
### 2.7.3. Sulfato Ferroso

El sulfato ferroso usado en el tratamiento de agua es un polvo de color verde muy soluble y tiene una masa volumétrica aparente próxima a  $900 \text{ Kg/m}^3$ .

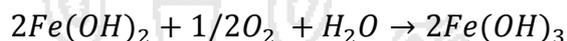
Su contenido en hierro es de aproximadamente 19%. Por su naturaleza ácida, el pH de una solución al 10% es de 2,8 aproximadamente. Por esta razón, para su almacenamiento y preparación se usa material plástico.

Reacciones del sulfato ferroso.

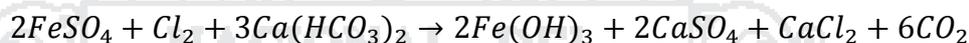
1) Con la alcalinidad del agua



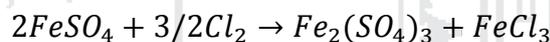
En aguas aireadas, el hidróxido ferroso formado se oxida a hidróxido férrico:



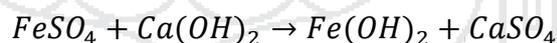
2) Reacción con el cloro



Si se usan sulfato ferroso y cloro para el tratamiento del agua, pueden dosificarse por separado o bien oxidarse previamente la solución de sulfato ferroso con cloro. Se obtiene entonces una mezcla de sulfato y cloruro férrico, a la que se conoce comercialmente con el nombre de cloro-sulfato férrico, según la reacción:



3) Reacción con el cal

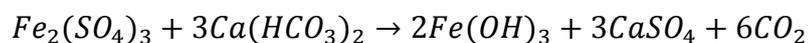


#### 2.7.4. Sulfato Férrico

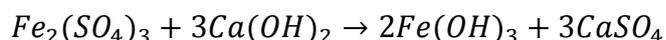
El sulfato férrico es un polvo blanco verdoso, muy soluble en el agua, su masa volumétrica aparente es 1,000 Kg/m<sup>3</sup>. Debido a que en solución acuosa se hidroliza y forma ácido sulfúrico, es necesario prevenir los efectos de su acidez.

Reacciones del sulfato férrico

1) Con la alcalinidad



2) Con la cal



### 2.7.5. Policloruro de Aluminio

Se comercializa como un líquido de color ambarino. Se emplea en la potabilización de aguas superficiales y en el tratamiento de efluentes líquidos residuales. Su función es la de coagular y acelerar la sedimentación de sólidos en suspensión modificando el potencial zeta de los líquidos a tratar neutralizando las fuerzas de repulsión.

Por todas estas características es un inmejorable producto que una excelente prestación en el tratamiento de las aguas y efluentes líquidos, sin producir ningún tipo de contaminación ni interferencia.

Cuando se utiliza en el tratamiento de aguas, brinda una velocidad de floculación mayor a la obtenida con otros coagulantes inorgánicos. Debido a la polimerización de su molécula permite una alta captación de contaminantes (orgánicos e inorgánicos). Además permite trabajar en un amplio rango de pH 6-9, eliminando así ajustes de pH siempre y cuando se trabaje en este pH.

#### FORMA DE USO

Puede usarse diluido como así también se puede utilizar concentrado. La dosis es variada dependiendo del efluente y el agua a tratar. Podemos hablar de dosis que van desde las 10 a 100 ppm en la clarificación de aguas, pudiendo alcanzar en efluentes hasta las 1000 ppm.

La dosis correcta debe determinarse mediante adecuados ensayos previos de laboratorio.

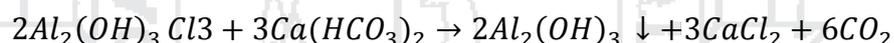
Tabla 1 Propiedades físico - químicas de policloruro de aluminio

Aspecto	Líquido transparente
Color	Ámbar o ámbar coloreado
Densidad a 20°C	1,36-1,41 g/cm <sup>3</sup>
Aluminio como Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> g/100	17,5
Basicidad g/100g	38-48
pH (10%)	3-4

Fuente: MSDS. ARQUIMIA S.A

Reacciones del policloruro de aluminio

Con la alcalinidad



## 2.8. Floculación

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinetica o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido
- Floculación ortocinetica o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que al precipitarse colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al disponerse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinetica para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. Richter. (1981).

## 2.9. Sedimentación

Se entiende por *sedimentación* la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios.

La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido re suspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS. (1992).

## 2.10. Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad.

El avance logrado por la técnica de filtración es el resultado de un esfuerzo conjunto dirigido a lograr que la teoría exprese los resultados de las investigaciones experimentales, de tal modo que sea posible prever, en el diseño, cómo va a operar la unidad de filtración en la práctica. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS. (1992).

## 2.11. Marco conceptual

### FLUORURO

Es el elemento más electronegativo de la tabla periódica, se encuentra en la naturaleza asociada en aguas subterráneas.

### POLICLORURO DE ALUMINIO

Es un coagulante inorgánico utilizado en el tratamiento de aguas.

### FLOCULACIÓN

Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

### COAGULACIÓN

Es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado **coagulante** el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.

### CAL

También llamada **cal viva** es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el **óxido de calcio**

### LECHADA DE CAL

Es hidróxido de calcio, en suspensión se prepara por el agregado de óxido de calcio más agua.

## 2.12. Hipótesis

### 2.12.1. Hipótesis general

- El policloruro de aluminio por su alta capacidad de coagulante permite el desarrollo de un sistema eficiente de tratamiento de agua para la remoción de flúor.

### 2.12.2. Hipótesis específicas

- En el rango de pH 6-9 precipita y flocula el fluoruro con policloruro de aluminio y lechada de cal.
- La dosis adecuada es en el rango de 10 mg/L a 20 mg/L de policloruro de aluminio y cal.
- A menor velocidad de agitación se produce la precipitación y floculación.

## 2.13. Variables y Operacionalización de Variables

### VARIABLE INDEPENDIENTE (VI)

Es una variable de proceso que puede tomar valores independientes de las otras variables. Para definir una variable dependiente debe existir por lo menos una variable independiente, pueden ser clasificadas dentro de las siguientes categorías, variables controlables, no controlables, desconocidas e indirectas.

Las variables independientes consideradas son:

- Muestra de Agua con contenido de fluoruro.

### VARIABLE DEPENDIENTE (VD)

Son aquellas variables que describen los resultados de un proceso. Como porcentaje de remoción de fluoruro.

La variable dependiente del proceso de cristalización es:

- Porcentaje de remoción de fluoruro

### VARIABLES INTERVENIENTES

- Presión atmosférica
- Temperatura ambiental
- Concentración de fluoruro

**OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

Tabla 2 Operacionalización de las variables

VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICE
<u>Variable Independiente</u> Muestra de agua potable	pH Dosis coagulante Velocidad de agitación	0-14 % RPM
<u>Variable dependiente</u> Remoción de fluoruro	Porcentaje de remoción	%
<u>Variables intervinientes</u> Presión atmosférica Temperatura ambiental Concentración de fluoruro	Presión atmosférica Temperatura ambiental Concentración de fluoruro	mmHg °C mg/L

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Equipos, Materiales y Reactivos

##### Equipos y Materiales

- Equipo de prueba de jarras
- Espectrofotómetro HACH
- Termómetro
- Balanza analítica
- Agitador mecánico
- Agitador magnético
- pH-metro
- Estufa
- Plancha de calentamiento
- Mortero con pistilo
- Bureta digital
- Matraz Erlenmeyer de 125 mL
- Matraz aforado de 50 mL y 25 mL
- Vasos de precipitados
- Probeta de 50 mL
- Pipeta graduada de 5 y 10 mL
- Papel filtro Whatman 40

**Reactivos de laboratorio**

- Policloruro de aluminio
- Óxido de calcio
- Muestra de agua
- Reactivos Kits para fluoruro
- Hidróxido de sodio de 98% pureza
- ácido sulfúrico de 98% pureza
- Ácido clorhídrico de 37% pureza
- Agua destilada

**3.2. Toma de Muestra de Agua**

Las muestras de agua se tomaron de las zonas norte y sur del departamento de Puno. Antes de la toma de la muestra se marcó el frasco mediante rotulador resistente al agua, con una referencia que permita su identificación. En todo caso la muestra se acompaña de una ficha o etiqueta en la que se consignan los datos necesarios que, como mínimo, son los siguientes: datos de interesado, tipo de agua o muestra, lugar de ubicación, hora de muestreo y fecha.

**Toma de muestra compuesta**

Una muestra compuesta nos proporciona una estimación de la composición promedio del agua muestreada durante el período de tiempo que comprende el muestreo.

Una muestra compuesta se obtiene mezclando en un frasco una serie de muestras instantáneas de volúmenes iguales o proporcionales. La manera más sencilla de tomar una muestra compuesta es tomar un volumen fijo del agua que se muestrea cada un intervalo de tiempo determinado hasta completar un volumen establecido. Por ejemplo, tomar 100 mL de agua que se muestrea cada una hora. En 24 horas ello hará un total de 2400 mL (2,4 L) Este tipo de muestreo puede aplicarse cuando el caudal del agua se mantiene constante dentro de determinados límites, o sea no tiene grandes variaciones.

La manera más simple de tomar una muestra proporcional al caudal es mezclando volúmenes de agua proporcionales al caudal, extraídos a intervalos regulares y definidos de tiempo.

La aplicación de este método presupone el conocimiento del caudal medio (promedio aritmético) del sistema que se va a muestrear. El caudal de un sistema colector de aguas residuales varía en el tiempo y presenta máximos y mínimos.

Tabla 3 Instrumento de recojo de muestra

1. Ubicación geográfica: Se encuentra a 3820 m.s.n.m. y tiene las siguientes coordenadas geográficas: -15° 14' 50" de latitud Sur - 69° 58' 50" de longitud Oeste de Greenwich.
2. Fecha y hora de muestreo: 25 de abril del 2016 a horas 10:30 am.
3. Número de muestra: 6
4. Origen (yacimiento): pozo
5. Procedencia: Provincia de Huancané, distrito de Taraco, comunidad de Collani
6. Cantidad de muestra: 1 litro
7. Estado: Líquido
8. Profundidad de toma de muestra: 4 metros
9. Datos del recolector: Ornela Pancca Pacompia
10. Motivo: trabajo de tesis
11. Descripción cualitativa (color, olor y apariencia): incoloro, inodoro, agradable.
12. Observaciones: agua potable

Tabla 4 Instrumento de recojo de Muestra

1. Ubicación geográfica: se asienta en la orilla occidental del lago Titicaca a una altitud de 3884 m.s.n.m y a 79 Km. de la ciudad de Puno. , entre los 16° 12'45'' latitud Sur y 69° 27'37'' longitud Oeste del meridiano de Greenwich.
2. Fecha y hora de muestreo: 26 de Abril del 2016 a horas 1:25 pm
3. Número de muestra:18
4. Origen (yacimiento): pozo
5. Procedencia Provincia de Chucuito Juli, distrito Juli, comunidad rio salado.
6. Cantidad de muestra: 1 litro
7. Estado: líquido
8. Profundidad de toma de muestra: 5 m
9. Datos del recolector: Ornela Pancca Pacompia
10. Motivo: trabajo de tesis
11. Descripción cualitativa (color, olor y apariencia): incoloro, inodoro, agradable
12. Observaciones: agua potable

### 3.3. Determinación de fluoruros

Se utilizará el equipo HACH para la determinación de concentración de fluoruros en agua de pozo.

### 3.4. Pruebas de jarras

La prueba de jarras es un procedimiento que se utiliza comúnmente en los laboratorios que busca determinar la dosis apropiada de coagulante que se debe suministrar al agua para optimizar el proceso de sedimentación .este análisis básicamente es la simulación de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación con diferentes dosis de coagulante ,la determinación para saber cuál es la dosis óptima se hace por comparación visual y se escoge la muestra en la cual se puedan ver los flóculos de mayor tamaño y que presente menor turbiedad .La prueba de jarras permite ajustar el pH, hacer variaciones en las dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a las muestras, alternar velocidades de mezclado y recrear una pequeña escala lo que se podría ver en un equipo de tamaño industrial.

### 3.5. Coagulación y floculación

- Colocar la muestra de agua en la jarra.
- Añadir el coagulante
- Batir con rapidez durante unos minutos para que el coagulante se pueda mezclar
- Se ajusta velocidad a 120 rpm
- Poner en operación con agitación constante
- Terminado el tiempo de agitación dejar en sedimentación
- Sedimentar de 10 a 30 min
- Observar y medir la velocidad de sedimentación.

### 3.6. Filtración de sólidos sedimentados

- Separar los sólidos sedimentados por filtración
- Instalar una bomba de vacío
- Filtrar a través de bomba de vacío
- Analizar fluoruros por el método de HACH
- Mediante el balance calcular el porcentaje de remoción
- Reportar resultados del ensayo

## DIAGRAMA DE FLUJO

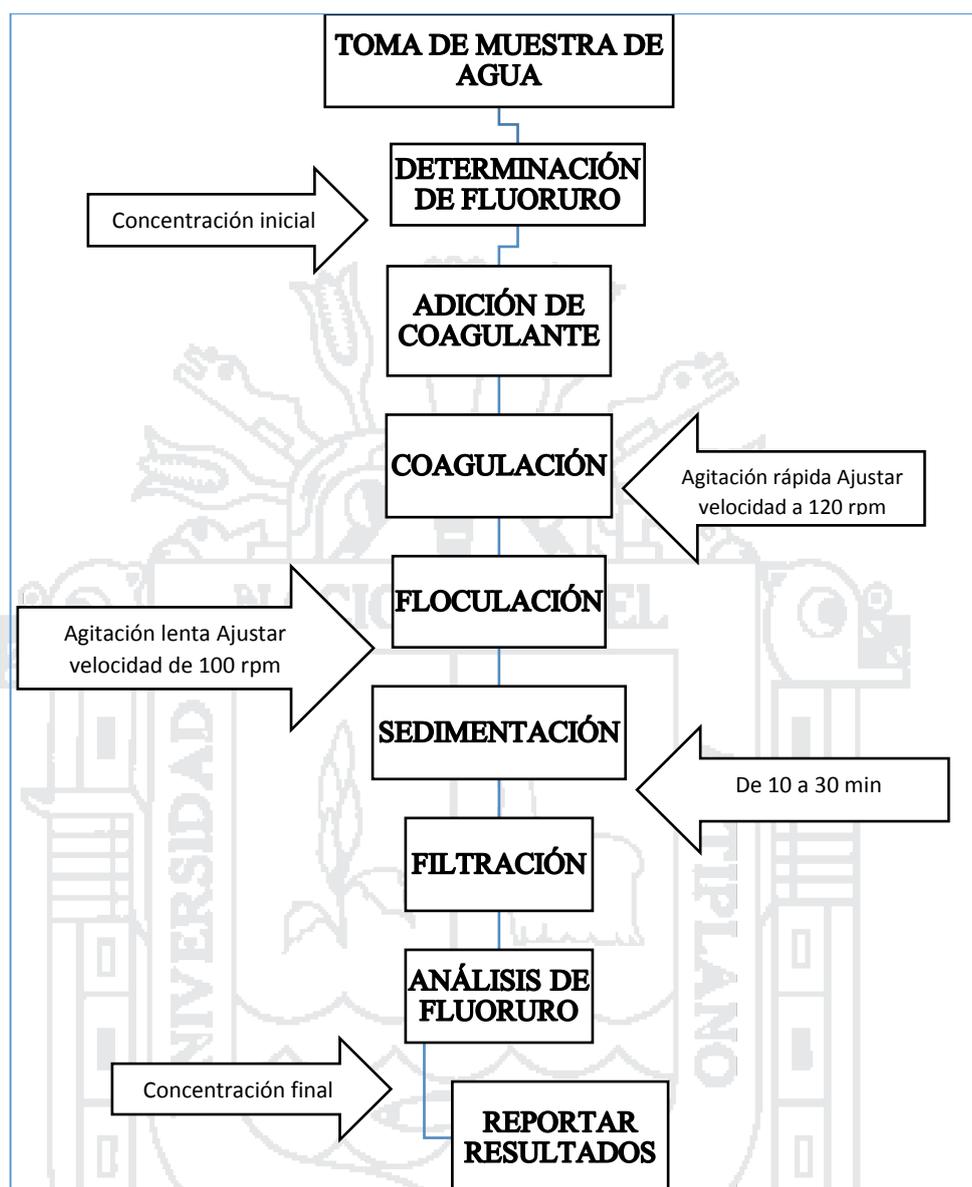


figura 1 Diagrama de bloque  
Fuente: elaboración propia

### 3.7. Diseño experimental

El diseño experimental es una herramienta de importancia fundamental en el ámbito de la ingeniería para mejorar el desempeño de un proceso, también tiene aplicaciones en el desarrollo de procesos industriales, así como técnicas de diseño experimental en las fases iniciales de cualquier proceso puede redundar en mejorar el rendimiento del proceso, así como reducción de tiempo y costos. Cochran, W. G., Cox, G. M., (1997).

En el presente diseño experimental considera tres factores cada uno de ellos a dos niveles, contiene ocho combinaciones de niveles de factores, tres efectos principales ( $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ ), tres interacciones de dos factores ( $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  y  $X_2X_3$ ) y una interacción de tres factores ( $X_1X_2X_3$ ), además con tres réplicas en el punto central.

El Diseño Factorial  $2^n$  donde “n” es igual a 3 variables independientes y “2” significa 2 niveles mínimo y máximo. En el proceso de remoción de fluoruro se ha considerado los siguientes variables:

1. pH
2. Concentración de coagulante
3. Velocidad de agitación

Tabla 5 Niveles máximos y mínimos

Código	Factor	Unidad	Mínimo	Máximo
A	pH	escala	6,5	7,5
B	Coagulante	mg/L	134	268
C	Velocidad de agitación	Rpm	100	120

Fuente: elaboración propia en base a niveles máximos y mínimos.

Los experimentos realizados, ya sea en laboratorio y/o nivel industrial, están orientados a determinar la influencia de uno o más factores sobre el rendimiento, recuperación, calidad, eficiencia, del proceso en estudio.

Uno de los métodos que cumplen con esta función son los diseños experimentales, que permiten obtener la máxima información con el mínimo número de experiencias.

Estos diseños estudian los efectos que producen las combinaciones de “n” variables sobre las respuestas, cada una a dos niveles y cuyos resultados sirven para estimar estadísticamente una ecuación multivariable que describa el proceso nos lleve a optimizarlo.

Según el estudio que se realizó, se aplicó el diseño experimental para tres variables, ( $2^3$ ), con réplicas en el punto central del diseño. Ya que el diseño nos permite conocer su comportamiento e identificar la influencia de las variables.

### 3.8. Diseño aplicado y factores seleccionados

El diseño factorial  $2^3$ , considera tres factores cada uno de ellos a dos niveles, contiene ocho combinaciones de niveles de factores, tres efectos principales ( $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ ), tres interacciones de dos factores ( $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  y  $X_2X_3$ ) y una interacción de tres factores ( $X_1X_2X_3$ ), además con tres réplicas en el punto central.

Elaborar una ecuación estadística – matemática que permita controlar la floculación en función de las variables más importantes. En el presente estudio se elabora un Diseño Factorial  $2^n$  donde “n” es igual a 3 variables independientes y “2” significa 2 niveles mínimo y máximo.

Tabla 6 Matriz de diseño factorial

N°	A	B	C	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	Recuperación
1	6,5	134	100	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y1
2	7,5	134	100	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y2
3	6,5	268	100	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y3
4	7,5	268	100	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y4
5	6,5	134	120	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y5
6	7,5	134	120	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y6
7	6,5	268	120	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y7
8	7,5	268	120	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y8
9	7,0	201	110	0	0	0	0	0	0	0	Y9
10	7,0	201	110	0	0	0	0	0	0	0	Y10
11	7,0	201	110	0	0	0	0	0	0	0	Y11

Fuente: Elaboración propia en base a diseño factorial  $2^3$ .

**Ecuación de regresión**

El modelo de la ecuación es:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_2X_3$$

Donde:

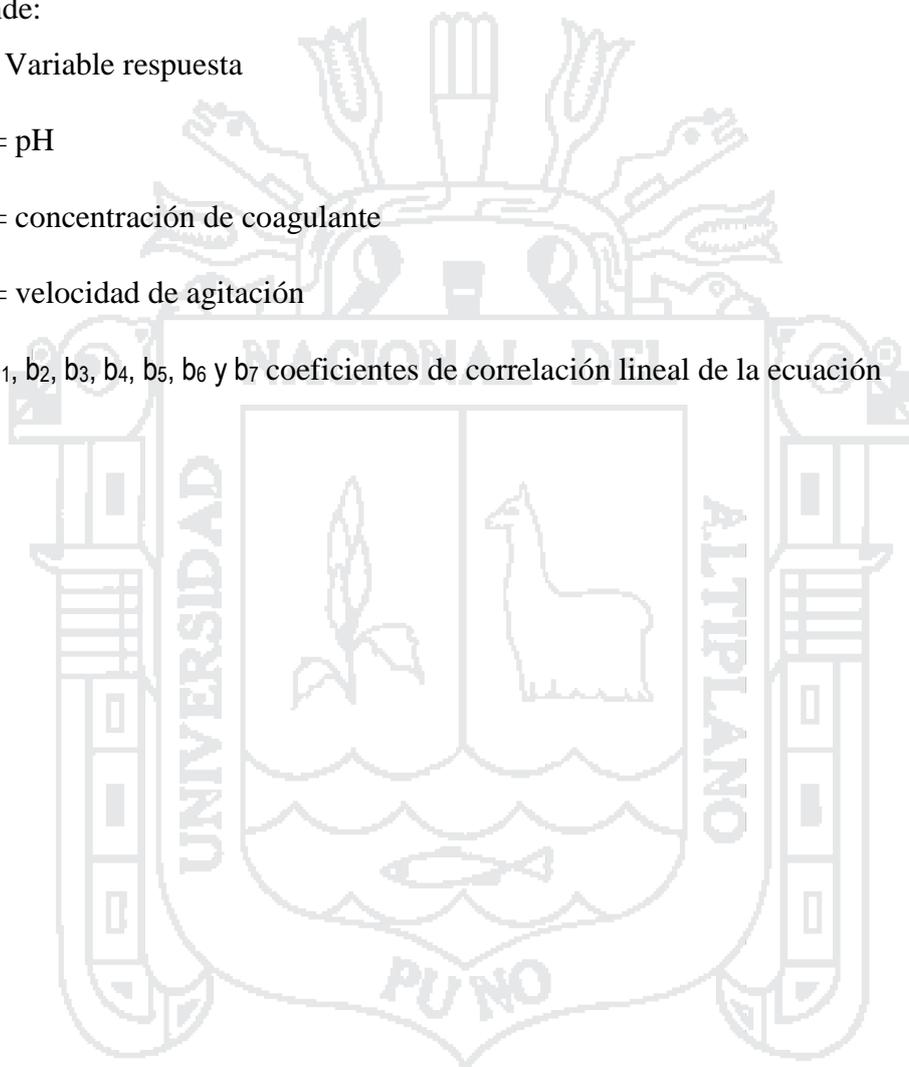
Y = Variable respuesta

X<sub>1</sub> = pH

X<sub>2</sub> = concentración de coagulante

X<sub>3</sub> = velocidad de agitación

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>4</sub>, b<sub>5</sub>, b<sub>6</sub> y b<sub>7</sub> coeficientes de correlación lineal de la ecuación



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Pruebas experimentales de remoción de fluoruros con policloruro de aluminio

##### Condiciones de Operación

Volumen de agua	: 200 mL
Concentración de fluoruro	: 2,23 mg/L
Floculante	: Policloruro de aluminio
pH	: 6,5 y 7,5
Velocidad de agitación	: 100 y 120 RPM

Tabla 7 Resultados de porcentaje de remoción de fluoruro

N° de pruebas	pH	Concentración de policloruro ( mg/L)	Velocidad Agitación (RPM)	Concentración Inicial de F <sup>-</sup> ( mg/L)	Concentración Final de F <sup>-</sup> ( mg/L)	% Remoción
1	6,5	134	100	2,23	1,26	43,50
2	7,5	134	100	2,23	1,29	42,15
3	6,5	268	100	2,23	0,98	56,00
4	7,5	268	100	2,23	1,00	55,16
5	6,5	134	120	2,23	1,22	45,29
6	7,5	134	120	2,23	1,24	44,39
7	6,5	268	120	2,23	1,05	52,91
8	7,5	268	120	2,23	1,04	53,36
9	7,0	201	110	2,23	1,07	52,02
10	7,0	201	110	2,23	1,04	53,36
11	7,0	201	110	2,23	1,06	52,47

**Fuente:** Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos

En la tabla 7 nos muestra los resultados de porcentaje de remoción de fluoruro obtenidos del proceso de precipitación-floculación por agitación. De acuerdo al diseño experimental se realizaron 11 pruebas experimentales, con variables de pH (6,5; 7,0 y 7,5), concentración de policloruro de aluminio (134; 201 y 268 mg/L) y velocidad de agitación (100; 110 y 120 rpm). En la tabla muestra además las concentraciones iniciales y concentraciones finales de fluoruro, con cuyos datos se ha calculado el porcentaje de remoción de fluoruro.

En la tabla 7, se puede apreciar que la máxima reducción de concentración de fluoruro de agua potable obtenida es de 2,3 mg/L de  $F^-$  hasta 0,98 mg/L de  $F^-$  que equivale al 56% de remoción de fluoruro, mediante el tratamiento con policloruro de aluminio.

Según Bishop y Sansoucy (1979), la remoción de fluoruro es factible con sulfato de aluminio pero requiere de dosis muy elevadas e indican la importancia de mantener el pH entre 6 y 7. La reducción de fluoruro fue de 2,5 a 1,2 mg/L de  $F^-$  que equivale al 52% de remoción de fluoruro.

Valenzuela. et al (2006), la remoción de fluoruro puede realizarse utilizando hidroxapatita, calcita, cuarzo, o bien cuarzo activado por iones férrico. Se ha reportado que el fluoruro es más rápidamente adsorbido por cuarzo, calcita y fluoruro de calcio, alcanzando el equilibrio en tan sólo en 2 minutos en condiciones de agitación. El porcentaje de remoción de fluoruro alcanzada fue de 60%.

Saha H. (1993), realizó experimentos para disminuir la presencia de flúor utilizando cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) en presencia de cloruro de calcio, llevándose a cabo la formación de un complejo, el cual está constituido por el aluminio, calcio y el fluoruro. La concentración de fluoruro en agua es reducida de 3,0 mg/L a 1,0 mg/L de  $F^-$  equivale al 67% de remoción de fluoruro.

Van-Benschoten et al (1990), Las sales de aluminio y el policloruro de aluminio (sales de aluminio polimerizadas) han sido ampliamente usados como coagulantes en el tratamiento de agua potable y aguas residuales, sin importar tanto las características químicas y calidad biológica. La reducción de concentración de fluoruro en agua potable fue de 2,8 mg/L a 0,9 mg/L de F<sup>-</sup> que equivale al 68% de remoción de fluoruro.

Comparando los distintos procesos de tratamiento según los antecedentes se concluye que el estudio de remoción de fluoruro de agua potable con policloruro de aluminio es similar y está dentro de los porcentajes de remoción de fluoruro.

#### 4.2. Tratamiento estadístico del diseño factorial

##### Efectos estimados para Porcentaje de remoción (%)

Tabla 8 Matriz de diseño factorial

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	50,1373	0,772959	
A:pH	-0,435	1,81275	1,0
B:Concentración de policloruro Al	10,3	1,81275	1,0
C:Velocidad de agitación	0,01	1,81275	1,0
AB	0,24	1,81275	1,0
AC	0,66	1,81275	1,0
BC	-2,455	1,81275	1,0

**Fuente:** Estimación de respuesta por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

### 4.3. Análisis de varianza

Tabla 9 Análisis de varianza para porcentaje de remoción de fluoruro

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	0,37845	1	0,37845	0,06	0,8222
B:Concentración de policloruro Al	212,18	1	212,18	32,28	0,0047
C:Velocidad de agitación	0,0002	1	0,0002	0,00	0,9959
AB	0,1152	1	0,1152	0,02	0,9011
AC	0,8712	1	0,8712	0,13	0,7342
BC	12,0541	1	12,0541	1,83	0,2471
Error total	26,2885	4	6,57213		
Total (corr.)	251,888	10			

**Fuente:** Estimación de ANOVA por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I

R-cuadrada = 89,5634 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 73,9085 porciento

Error estándar del est. = 2,56362

Error absoluto medio = 1,3524

Estadístico Durbin-Watson = 2,72819 (P=0,9471)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,396449

La tabla 9, ANOVA particiona la variabilidad de porcentaje de remoción de fluoruro separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

En la tabla 9 se puede apreciar que la variable más significativa es la concentración de policloruro de aluminio por tener una probabilidad de 0,0047 que equivale al 99,53% de confianza. Esto indica la concentración de policloruro de aluminio afecta directamente en la remoción de fluoruro. Las siguientes variables significativas son pH y velocidad de agitación.

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 89,5634% de la variabilidad en porcentaje de remoción. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 73,9085%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,56362. El error medio absoluto (MAE) de 1,3524 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

#### 4.4. Estimación de efectos y modelo matemático

Tabla 10 Coeficiente de regresión para porcentaje de remoción de fluoruro

Coefficiente	Estimado
Constante	53,0298
A:pH	-8,415
B:Concentración de policloruro Al	0,253321
C:Velocidad de agitación	-0,09325
AB	0,00358209
AC	0,066
BC	-0,00183209

**Fuente:** Estimación de coeficientes por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I

La ecuación del modelo ajustado es:

Porcentaje de remoción =  $53,0298 - 8,415 \cdot \text{pH} + 0,253321 \cdot \text{Concentración de policloruro Al} - 0,09325 \cdot \text{Velocidad de agitación} + 0,00358209 \cdot \text{pH} \cdot \text{Concentración de policloruro Al} + 0,066 \cdot \text{pH} \cdot \text{Velocidad de agitación} - 0,00183209 \cdot \text{Concentración de policloruro Aluminio} \cdot \text{Velocidad de agitación}$ .

En la tabla 10, muestra los coeficientes de regresión de efectos puros e interacciones, en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione predicciones de la lista de opciones tabulares. Para graficar la función, seleccione gráficas de respuesta de la lista de opciones gráficas.

#### 4.5. Optimización de respuesta

##### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar porcentaje de remoción

Valor óptimo = 56,9373

Tabla 11 Variables óptimos del proceso de precipitación y floculación de fluoruro

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	6,5	7,5	6,5
Concentración de policloruro Al	134,0	268,0	268,0
Velocidad de agitación	100,0	120,0	100,0

Fuente: Optimización de respuesta por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I

La tabla 11, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza porcentaje de remoción de fluoruro sobre la región indicada. La máxima optimización alcanzada en la remoción de fluoruro fue de 56,937%. Además muestra las variables óptimas de pH 6,5; concentración de policloruro de aluminio 268 mg/L y velocidad de agitación 100 rpm.

#### 4.6. Diagrama de Pareto

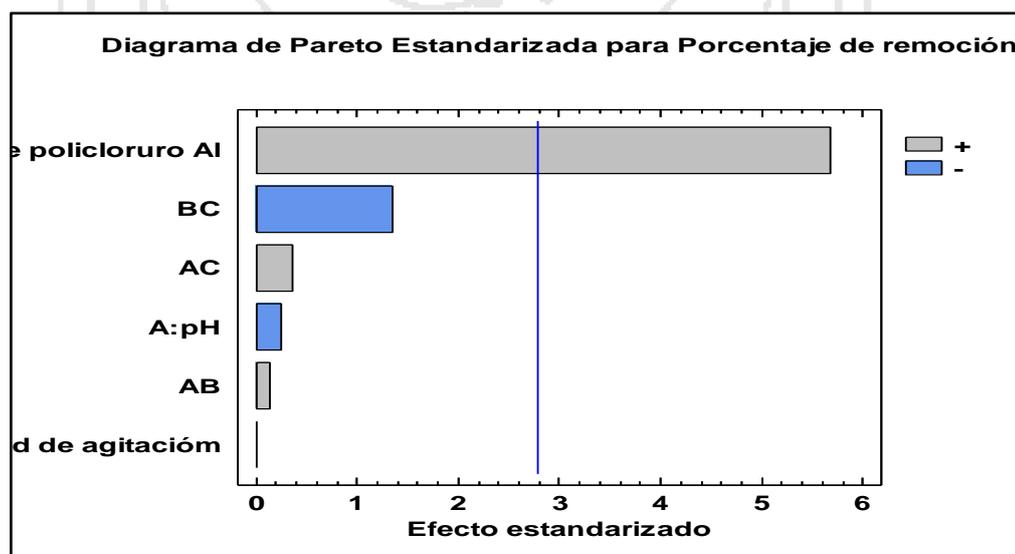


Figura 2 Diagrama de pareto estandarizado

El diagrama de Pareto de la figura 2 nos muestra los efectos de los factores en la floculación de fluoruro. El factor B (concentración de policloruro de aluminio) tiene mayor efecto en la remoción de fluoruro. Seguido de la interacción BC. El resto de las variables tienen poca significancia en el proceso de precipitación y floculación de fluoruro.

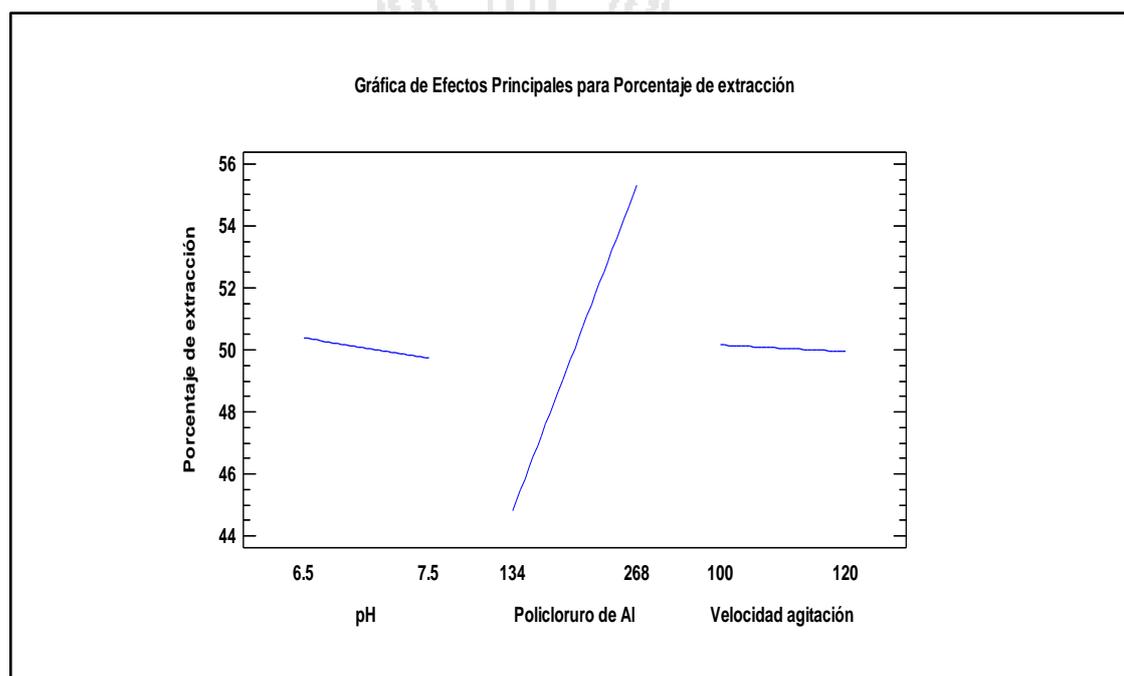


Figura 3 Efectos principales para remoción de fluoruro

La figura 3 nos indica los efectos principales de concentración de policloruro de aluminio, pH y velocidad de agitación. El efecto pH disminuye en el rango de 51 a 49%. El efecto concentración de policloruro de aluminio aumenta en el rango de 45 a 56% y el efecto velocidad de agitación se mantiene casi constante al 51% aproximadamente.

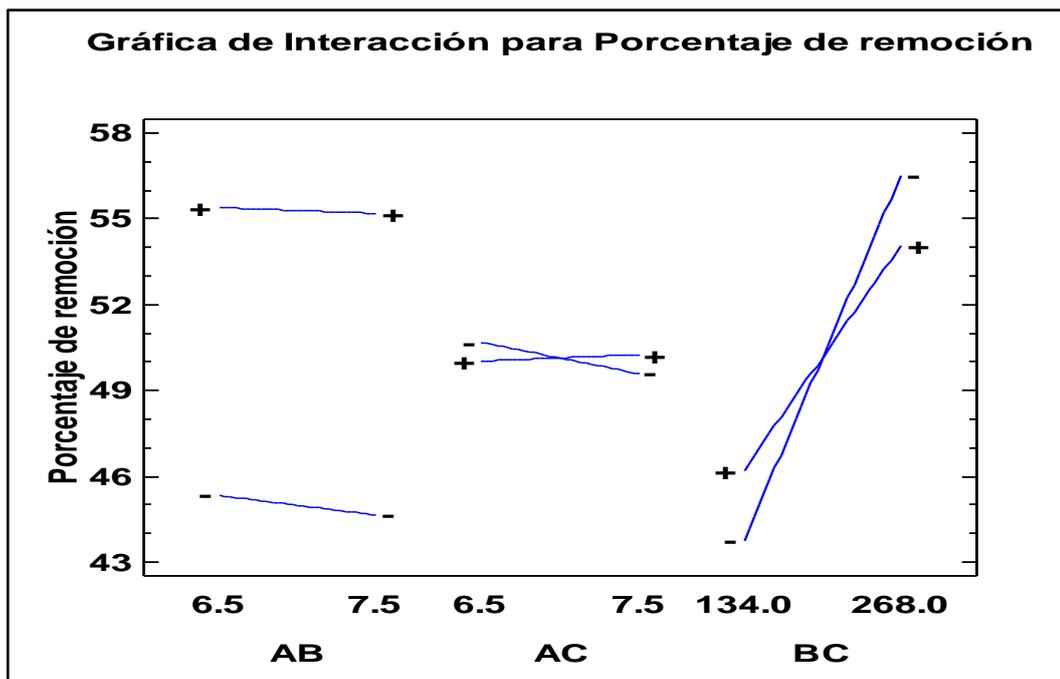


Figura 4 Grafica de interacciones

Superficie de respuesta

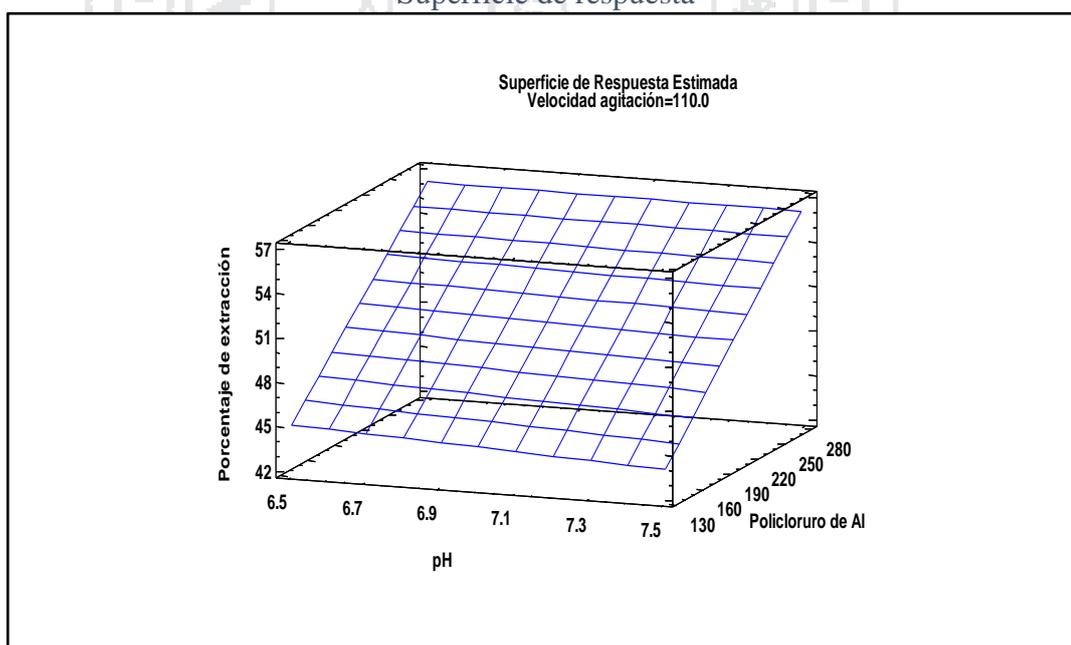


Figura 5 Superficie de respuesta estimada

La figura 5 nos muestra contornos de superficie de respuesta para remoción de fluoruro. El porcentaje de remoción de fluoruro es aproximadamente de 57% en función de pH y concentración de policloruro de aluminio. Considerando la velocidad de agitación 110 rpm.

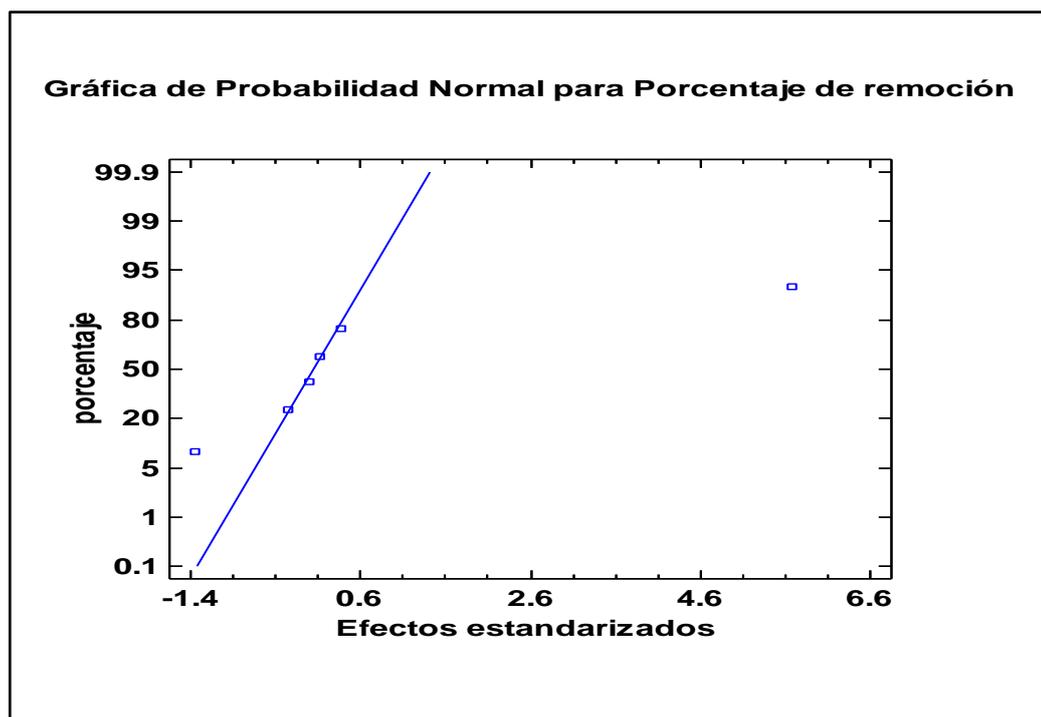


Figura 6 Grafica de probabilidad normal

#### 4.7. Pruebas experimentales de remoción de fluoruros con lechada de cal

##### Condiciones de Operación

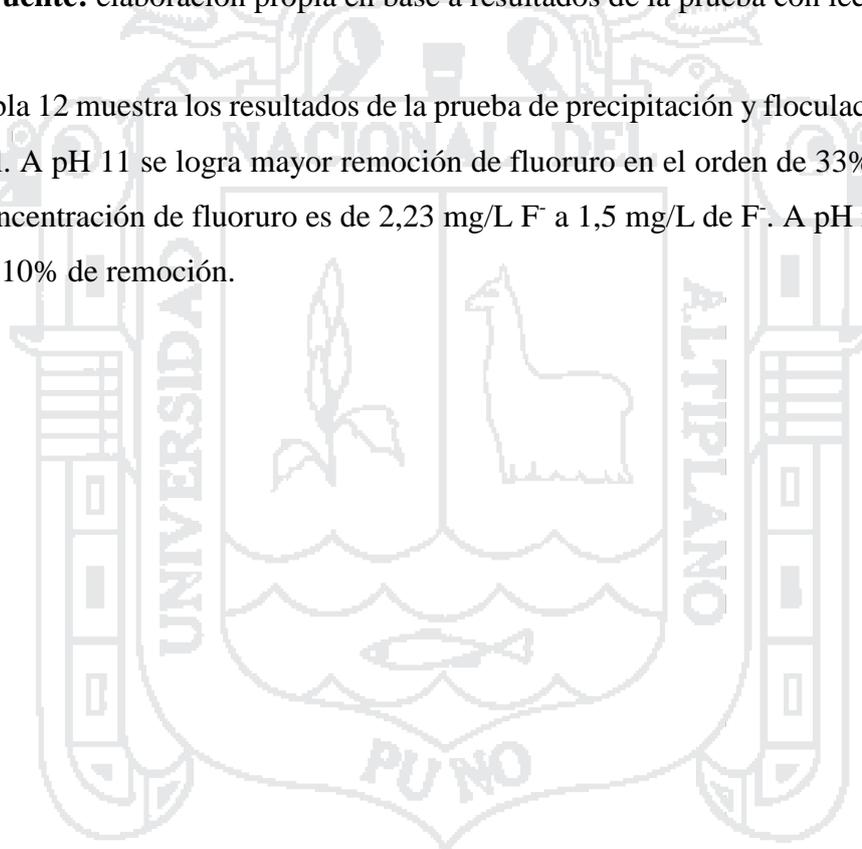
Volumen de agua	: 200 mL
Concentración de fluoruro	: 2,23 mg/L
Floculante	: Lechada de cal
pH	: 8,8 y 11
Velocidad de agitación	: 100 y 140 rpm

Tabla 12 Resultados d prueba de remoción de fluoruro con lechada de cal

N°	pH	Conc. Cal (mg/L)	Velocidad Agitación (RPM)	Conc. Inicial (mg/L)	Conc. Final (mg/L)	% remoción
1	8,8	100	100	2,23	2,0	10,33
2	11	500	100	2,23	1,5	32,74
3	8,8	100	140	2,23	1,9	14,80
4	11	500	140	2,23	1,5	32,74

**Fuente:** elaboración propia en base a resultados de la prueba con lechada de cal

La tabla 12 muestra los resultados de la prueba de precipitación y floculación con lechada de cal. A pH 11 se logra mayor remoción de fluoruro en el orden de 33% y la reducción de concentración de fluoruro es de 2,23 mg/L F<sup>-</sup> a 1,5 mg/L de F<sup>-</sup>. A pH menores sólo se logra 10% de remoción.



## CONCLUSIONES

- El pH óptimo en la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio fue 6,5 y la remoción con lechada de cal el pH óptimo es 11. Cabe señalar que la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio está en los rangos de pH 6 a 8, es decir tiene amplio rango de pH.
- La concentración de policloruro de aluminio adecuado en la remoción de fluoruro fue de 268 mg/L y en la remoción con lechada de cal la concentración de cal fue de 500 mg/L.
- La velocidad de agitación en la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio fue de 100 RPM y en la remoción con lechada de cal fue de 140 RPM.
- El policloruro de aluminio remueve fluoruros de agua potable, cuya reducción fue de 2,23 mg/L de  $F^-$  a 0,89 mg/L de  $F^-$ .
- La remoción de fluoruros con lechada de cal es relativamente bajo, fue reducido de 2,23 mg/L de  $F^-$  a 1,5 mg/L de  $F^-$ . Es adecuado el uso de lechada de cal en aguas con alto contenido de magnesio, ya que el fluoruro coprecipita con hidróxido de magnesio.

## RECOMENDACIONES

- Monitorear muestras de aguas potables en todas las zonas de la región de Puno con la finalidad de determinar la presencia de fluoruros.
- Estudiar y evaluar las consecuencias originadas por consumo de aguas con contenidos de fluoruros.
- Se recomienda el uso de floculante policloruro de aluminio para la remoción de fluoruro.
- Utilizar otros métodos de remoción de fluoruros.
- Remover fluoruro utilizando resinas de intercambio iónico
- Ensayar la remoción simultánea de fluoruros asociados con arsénico, utilizando floculante policloruro de aluminio.

**BIBLIOGRAFÍA**

APHA-AWWA-WPCF. (1992). Métodos Normalizados, para el Análisis Aguas Potables y Residuales, Ediciones Díaz de Santos. S.A.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). (2003). Reseña Toxicológica de los Fluoruros, Fluoruro de Hidrógeno y Flúor (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

Bishop, P. L. Sansoucy, G. (1979). Fluoride removal from drinking wáter by fluidized activated alumina adsoption. J Am. Water Works: 70(10): 254-259.

Burriel, M., F., Lucena, C., F., (1989). “Química Analítica Cualitativa”, Decimoctava edición, Ed. Thomson, España.

Choi, W.W.; Chen, K.Y. (1979). The removal of fluoride water by adsoption. Water Tech: 71(10): 562-570.

Chang. Raymond. (2003). Fisicoquímica, para las ciencias químicas y biológicas, Sexta Edición, McGraw-Hill, México.

Cochran, W. G., Cox, G. M. (1997). Diseños experimentales, Trillas, 2da edición, México.

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional UTN-Argentina:  
[htt://www.edutecne.utn.edu.ar](http://www.edutecne.utn.edu.ar).

Kirchmer, C.; Pérez Carrion, J. (1981). Coagulación. Programa Regional de Mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano.

Kaseva M. E. (2006). Optimization of regenerated bon char for fluoride removal in drinking wáter: a case study in Tanzania. *Journal of Water and Health*: 4(1): 139-147.

Link W.E. and J.G. Rabosky May (1976). "Fluoride ion removal from wastewater employing calcium precipitation and iron salt coagulation" *Purdue Industrial Waste Conference Proceedings*.

Link W.E and Rabosky J. G. (1977). Fluoride ion removal from waste water Employing calcium precipitation and iron salt coagulation. *Proceedings of the Industrial Waste Conference Volume Date 1976, Murdoch/Betz Eng., Inc., Pittsburgh, PA. USA.*

Mohapatra D., Mishra D. Mishra S,P. (2004). Use of oxide minerals to abate fluoride from wáter. *J of C. and Int. Sc*: 275, 355-359.

Mjengera H. (2000). Defluoridation of drinking wáter in Tanzania. *Technical Annual Report. WARFSA Swedish International Development Agency*: 1-25.

Programa Regional HPE/OPS/CEPIS. (1992). de Mejoramiento de la Calidad del Agua. *Manual III Teoría, tomo 11, Sedimentación. Serie Filtración Rápida.*

Richter. Carlos (1981). Floculación. *Manual de Instrucción del Programa Regional OPS/HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo*

Saha H. (1993). Treatment of aqueous effluent for fluoride removal. *Water Research*.

Valenzuela V. L. Ramirez H. J. Reyes L. J. Sol U.J. A., Lázaro M. O. (2006). The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo city, Sonora. *Environmental Geology*: 51(1): 17-27.

## ANEXOS

Tabla 13 Muestreo de agua y determinación de fluoruros de diferentes lugares de la región Puno

ITEM	FECHA	HORA	LUGAR DE MUESTREO			CONCENTRACIÓN DE FLUOR (mg/L)
			PROVINCIA	DISTRITO	COMUNIDAD BARRIO	
1	22/11/2015	11:a.m.	Lampa	Calapuja	Isla Camaquen	0,32
2	22/11/2015	12:20p.m.	Lampa	Calapuja		0,45
3	22/11/2015	1:00 p. m.	Lampa	Calapuja	Ocquille	0,08
4	24/11/2015	11.30 a.m	Huancane	Taraco		0,60
5	24/11/2015	11:50 a.m	Huancane	Taraco	Qapano	0,32
6	24/11/2015	12:20p.m.	Huancane	Taraco	Collani	2,23
7	25/11/2015	10:00a.m.	San Roman	Juliaca	Chimpajara	0,53
8	25/11/2015	12:17a.m.	San Roman	Caracoto	Barrio Amarguras	0,31
9	25/11/2015	12:00 p.m	San Roman	Caracoto	Urb. Nestor Caceres	0,55
10	25/11/2015	03:00p.m.	San Roman	Juliaca	Copacabana 3	0,14
11	26/11/2015	02:15p.m.	puno	Huata		0,21
12	26/11/2015	10:00a.m.	Puno	Capachica	Ccotos	0,02
13	26/11/2015	10:35 a.m	Puno	Capachica	Llachon	0,08
14	26/11/2015	11.40a.m.	Puno	Capachica	Siali	0,08
15	27/11/2015	5:00 a.m	San Antonio de Putina	Ananea	C.P. Rinconada	0,02
16	29/11/2015	11:30a.m.	Chucuito Juli	Juli	Barrio Chocchoni	0,09
17	29/11/2015	12:00p.m.	chucuito juli	Juli	Palermo	0,21
18	29/11/2015	02:00p.m.	chucuito juli	Juli	Rio Salado	2,20
19	29/11/2015	3:44 p. m.	El Collao	Ilave	barrio Bellavista 1	0,27
20	29/11/2015	4:20 p. m	El Collao	Ilave	barrio Bellavista 2	0,04
21	30/11/2015	10:25 a.m	Puno	Plateria	C.P. Perca	1,57

Tabla 14 Límites máximo permisible (LMP) referenciales de los parámetros de calidad del agua recomendado por OMS

Parámetro	LMP	Referencia
Coliformes totales, UF/100 M1	0 (ausencia)	(1)
Coliformes termotolerantes, UFC/M 1	0 (ausencia)	(1)
Bacterias heterotrópicas, UFC/M1	500	(1)
pH	6.5-8.5	(1)
Turbiedad, UNT	5	(1)
Conductividad, 25°C uS/cm	1500	(3)
Color, UCV - Pt-Co	20	(2)
Cloruros, mg/L	250	(2)
Sulfatos, Mg/L	250	(2)
Dureza, mg/L	500	(3)
Nitratos, mg NO <sub>3</sub> /L (*)	50	(1)
Hierro; mg/L	0.3	0.3 (Fe + Mn = 0.5) (2)
Manganeso, mg/L	0.2	0.2 (Fe + Mn = 0.5) (2)
Aluminio, mg/L	0.2	(1)
Cobre, mg/L	3	(2)
Plomo, mg/L (*)	0.1	(2)
Cadmio, mg/L (*)	0.003	(1)
Arsénico, mg/L (*)	0.1	(2)
Mercurio, mg/L (*)	0.001	(1)
Cromo, mg/L (*)	0.05	(1)
Flúor, mg/L	2	(2)
Selenio, mg/L	0.05	(2)

## Notas.

- (1) Valores tomados provisionalmente de los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la salud (1995).
  - (2) Valores establecidos en la norma nacional “Reglamento de Requisitos Oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables”, aprobado por Resolución Suprema del 17 de Diciembre de 1946.
  - (3) En el caso de los parámetros de conductividad y dureza, considerando que son parámetros que afectan solamente la calidad estética del agua, tomar como referencia los valores indicados, los que han sido propuestos para la actualización de la norma de calidad de agua para consumo humano especialmente para aguas subterráneas.
- (\*) Compuestos Tóxicos.  
(\*\*) Oficio Circular N° 677-2000/SUNASS-INF.

Mediante este Oficio la SUNASS estableció los valores Límite Máximo permisibles referenciales de los parámetros de Control; Ello Originado por la carencia de una norma actualizada, ya que la vigente data del año 1946 y no considera varios parámetros, como turbiedad, coliformes, pH, aluminio, nitratos, cadmio, mercurio, cromo, entre otros: para las cuales se ha tomado los valores guía que recomienda la Organización Mundial de la Salud, OMS.

### REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO DS N° 031-2010-SA.

Tabla 15 Límites máximos permisibles de los parámetros microbiológicos y parasitológicos.

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Olor	---	Aceptable
Sabor	---	Aceptable
Color	UCV ESCALA Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
pH	valor de pH	6.5 a 8.5
Conductividad (25 °C)	umho/cm	1500
Solidos totales disueltos	mg/L	1000
Cloruros	mg/L	250
Sulfatos	mg/L	250
Dureza total	mg/L	500
Amoniaco	mg/L	1.5
Hierro	mg/L	0.3
Manganeso	mg/L	0.4
Aluminio	mg/L	0.2
Cobre	mg/L	2.0
Zinc	mg/L	3.0
Sodio	mg/L	200

Tabla 16 Límites máximos permisibles de parámetros Químicos inorgánicos y orgánicos

<b>Parámetros Inorgánicos</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
antimonio	mg/L	0.020
Arsénico (nota 1)	mg/L	0.010
Bario	mg/L	0.700
Boro	mg/L	1.500
Cadmio	mg/L	0.003
Cianuro	mg/L	0.070
Cloro (nota 2)	mg/L	5
Clorito	mg/L	0.7
Clorato		0.7
Cromo total	mg/L	0.050
Flúor	mg/L	1.000
Mercurio	mg/L	0.001
Níquel	mg/L	0.020
Nitratos	mg/L	50.00
Nitritos	mg/L	3.00 Exposición corta 0.20 Exposición larga
Plomo	mg/L	0.010
Selenio	mg/L	0.010
Molibdeno	mg/L	0.070
Uranio	mg/L	0.015
<b>Parámetros Orgánicos</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Trihalometanos totales (nota 3)	mg/L	1,00
Hidrocarburo Disuelto o Emulsionado; aceite mineral	mg/L	0,01
Aceites y Grasas	mg/L	0,5
Alacloro	mg/L	0,020
Aldicarb	mg/L	0,010
Aldrin y Dieldrín	mg/L	0,00003
Benceno	mg/L	0,010
Clordano (total de isómeros)	mg/L	0,0002
DDT (total de isómeros)	mg/L	0,001
Endrin	mg/L	0,0006
Gamma HCH (lindano)	mg/L	0,002
Hexaclorobenceno	mg/L	0,001
Heptacloro y Heptacloroepóxico	mg/L	0,00003
Metoxicloro	mg/L	0,020
Pentaclorofenol	mg/L	0,009
2.4-D	mg/L	0,030
Acilamida	mg/L	0,0005
Epiclorhidrina	mg/L	0,0004

**FOTOGRAFÍAS DE MUESTREO, ANÁLISIS Y DE PRUEBAS**



Fotografía 1. Muestreo de la provincia de Juli



Fotografía 2. Muestreo del distrito de Taraco



Fotografía 3. Muestras para análisis de contenido de fluoruro en Laboratorio de Química



Fotografía 4. Preparación de muestra para análisis de fluoruro por el método de HACH



Fotografía 5. Análisis de fluoruro por el método de HACH



Fotografía 6. Filtración de muestras



Fotografía 7. Medición de pH



Fotografía 8. Cal



Fotografía 9. Pesado de cal



Fotografía 10. Proceso de Floculación con lechada de cal



Fotografía 11. Proceso de floculación con policloruro de aluminio



Fotografía 12. Filtración



Fotografía 13. Análisis de fluoruro de líquido sobrenadante



Fotografía 14. Lectura de fluoruro en equipo HAC