

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN CON  
POLIACRILAMIDA ANIÓNICA EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL  
CIRCUITO DE POZAS DE LA UNIDAD OPERATIVA MINERA  
HALCÓN DE ORO - ANANEA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. DINO DALTHON, URURI CALCINA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO - PERÚ**

**2018**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TESIS:**


EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN CON POLIACRILAMIDA ANIÓNICA EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL CIRCUITO DE POZAS DE LA UNIDAD OPERATIVA MINERA HALCÓN DE ORO - ANANEA.

**PRESENTADA POR:**

**Bachiller: DINO DALTHON URURI CALCINA  
INGENIERO DE MINAS**

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10-12-2018**

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

**Presidente** : .....   
**Ing. Owal Alfredo Velásquez Viza**

**Primer Miembro** : .....   
**M.Sc. Ing. Esteban Marín Paucara**

**Segundo Miembro** : .....   
**M.Sc. Ing. Fidel Huisa Mamani**

**Director/Asesor** : .....   
**M.Sc. Ing. Mario Serafín Cuentas Alvarado**

**Área:** Ingeniería de Minas.

**Tema:** Monitoreo y evaluación del impacto ambiental en minería.

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación de la dedico a mis queridos padres Jacinto y Carmela, por sus sabios concejos. A mí querida esposa Gladys por la confianza y el apoyo que siempre me brinda. A mis queridos hijos Ariana y Benjamín quienes son el motivo de mi superación y a mis queridos hermanos por su apoyo incondicional y la confianza que siempre me dan.

## AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a Dios nuestro padre celestial por darnos cada día el regalo de la vida, una nueva oportunidad para aprender, amar, y ser cada vez mejores personas.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, templo del saber y en especial a la Facultad de Ingeniería de Minas, mi alma mater en donde forje mi formación académica, y como olvidarme de mis apreciados docentes quienes día a día me brindaron sus conocimientos y sabidurías, con el único objetivo de formar en mí un profesional al servicio de la sociedad.

Mi más profundo agradecimiento y gratitud a mis queridos padres Jacinto Ururi Mullisaca y Carmela Calcina Rios de Ururi, por el amor que me dan, los valores que inculcan en mí y el enorme esfuerzo que realizan para que logre cada una de mis metas.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xi

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1.	Descripción del problema.....	1
1.2.	Formulación del problema.....	2
1.2.1.	Pregunta general. ....	2
1.2.2.	Preguntas específicos.....	2
1.3.	Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1.	Objetivo general.....	2
1.3.2.	Objetivos específicos. ....	2
1.4.	Justificación de la investigación .....	3

### CAPÍTULO II

#### REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	Antecedentes de la investigación.....	4
2.2.	Marco teórico.....	6
2.2.1.	Minado a tajo abierto por terrazas. ....	6
2.2.2.	El proceso de concentración gravimétrico.....	6
2.2.3.	Las aguas residuales – industriales. ....	10
2.2.4.	Tratamiento de aguas residuales – Nivel primario. ....	12
2.2.5.	La poliacrilamida aniónica. ....	22
2.3.	Marco referencial del proyecto.....	24
2.3.1.	Ubicación del proyecto. ....	24
2.3.2.	Accesibilidad. ....	24
2.3.3.	Geología local y económica del yacimiento. ....	24
2.3.4.	Mineralización del depósito tipo morrénico. ....	25
2.3.5.	Las operaciones de minado.....	26

2.3.6.	El proceso de beneficio del mineral.....	27
2.4.	Formulación de la hipótesis .....	28
2.4.1.	Hipótesis general. ....	28
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	28

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Diseño metodológico .....	29
3.1.1.	Tipo de investigación.....	29
3.1.2.	Alcance. ....	29
3.1.3.	Diseño de la investigación.....	29
3.2.	Población y muestra.....	30
3.2.1.	La Población. ....	30
3.2.2.	Las muestras. ....	30
3.3.	Técnicas y procedimientos para la recolección de datos .....	32
3.3.1.	La prueba de jarras (jar – test). ....	32
3.3.2.	Determinación de la turbidez.....	33
3.3.3.	Determinación de la temperatura, potencial de hidrogeno y la concentración desólidos. ....	34
3.3.4.	Dosis de la poliacrilamida aniónica:.....	35
3.3.5.	Gradiente y tiempo óptimo de la coagulación – floculación.....	38
3.3.6.	Velocidad de sedimentación.....	38

### CAPÍTULO IV

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Determinando la dosis óptima de poliacrilamida aniónica para el tratamiento del proceso de sedimentación de las aguas residuales de la unidad operativa minera Halcón de Oro.....	39
4.1.1.	La pre-prueba.....	39
4.1.2.	La post prueba.....	41
4.2.	Determinando el porcentaje de sedimentación de la turbidez y la consecuente clarificación de las aguas residuales de la unidad operativa minera Halcón de Oro.....	43
4.2.1.	Sedimentación con floculación de la muestra 3. ....	43
4.2.2.	Sedimentación con floculación de la muestra 2. ....	50
4.3.	Discusión de los resultados.....	58

CONCLUSIONES .....	61
RECOMENDACIONES .....	62
REFERENCIAS .....	63
ANEXOS .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Método por terrazas. ....	7
<b>Figura 2.2.</b> Principio operativo de los riffles. ....	10
<b>Figura 2.3.</b> Sección planta y longitudinal de los sedimentaros y decantadores estáticos... 14	14
<b>Figura 2.4.</b> Parámetros que intervienen en los sedimentaros y decantadores estáticos..... 15	15
<b>Figura 2.5.</b> Proceso de coagulación. ....	16
<b>Figura 2.6.</b> Proceso de formación de puente. ....	17
<b>Figura 2.7.</b> Coagulación por adsorción.....	18
<b>Figura 2.8.</b> Coagulación por barrido.....	18
<b>Figura 2.9.</b> Sedimentación de los coloides con sales de hierro y aluminio. ....	21
<b>Figura 2.10.</b> Sedimentación de los coloides con sales de hierro y aluminio. ....	21
<b>Figura 2.11.</b> Vista de la operación de carguío del material morrénico.....	27
<b>Figura 2.12.</b> Vista de la limpieza del desarenador.....	27
<b>Figura 3.1.</b> Vista de la variabilidad de la turbidez de cada muestra. ....	31
<b>Figura 3.2.</b> Vista del equipo Velp Scientifica para la prueba de jarras. ....	32
<b>Figura 3.3.</b> Vista del equipo Wagtech – WT3020 para medir la turbidez.....	34
<b>Figura 3.4.</b> Vista del equipo Combo pH & EC para medir la temperatura, pH y SST.....	35
<b>Figura 3.5.</b> Vista de la balanza SHS HR-250A. ....	37
<b>Figura 3.6.</b> Vista de la poliacrilamida aniónica. ....	37
<b>Figura 3.7.</b> Vista del vaso precipitado N° 6 con 20 mg de PA. ....	37
<b>Figura 3.8.</b> Vista de cada vaso con la poliacrilamida aniónica diluida en 100 ml. ....	38
<b>Figura 3.9.</b> Perilla de regulación del RPM del equipo VELP SC.....	38
<b>Figura 4.1.</b> Comportamiento de la clarificación del agua de la muestra 1. ....	40
<b>Figura 4.2.</b> Comportamiento de la turbidez de la muestra 3. ....	42
<b>Figura 4.3.</b> Comportamiento de la clarificación del agua de la muestra 3. ....	42
<b>Figura 4.4.</b> Variación del porcentaje de separación de la turbidez.....	45
<b>Figura 4.5.</b> Variación de la turbidez después de 30 min. ....	46
<b>Figura 4.6.</b> Variación del porcentaje de la turbidez separada después de 30 min. ....	46
<b>Figura 4.7.</b> Variación del porcentaje de separación de agua clarificada. ....	48
<b>Figura 4.8.</b> Variación de la sedimentación residual después de 30 min. ....	49
<b>Figura 4.9.</b> Variación del porcentaje del agua clarificada después de 30 min. ....	50
<b>Figura 4.10.</b> Variación del porcentaje de separación de la turbidez en la muestra 2. ....	52
<b>Figura 4.11.</b> Variación de la turbidez después de 30 min. ....	53



<b>Figura 4.12.</b> Variación del porcentaje de la turbidez separada después de 30 min.....	54
<b>Figura 4.13.</b> Variación del porcentaje de separación de agua clarificada de la muestra 2.	56
<b>Figura 4.14.</b> Variación de la sedimentación residual en la muestra 2 después de 30 min..	57
<b>Figura 4.15.</b> Variación del porcentaje del agua clarificada en la Muestra 2. ....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b> La calidad del agua cruda.....	20
<b>Tabla 2.2.</b> Acceso por tramos al proyecto. ....	24
<b>Tabla 3.1.</b> Muestra 1 en el mes de abril.....	30
<b>Tabla 3.2.</b> Muestra 2 en el mes de mayo. ....	30
<b>Tabla 3.3.</b> Muestra 3 en el mes de mayo. ....	31
<b>Tabla 4.1.</b> Clarificación del agua de la muestra 1 en 30 min.....	40
<b>Tabla 4.2.</b> La turbidez y la clarificación del agua de la muestra 3 en 30 min. ....	41
<b>Tabla 4.3.</b> Variación de la turbidez en la muestra 3 de 5 min a 30 min. ....	44
<b>Tabla 4.4.</b> El porcentaje de turbidez que queda después de los 30 min en cada jarra. ....	44
<b>Tabla 4.5.</b> El porcentaje de turbidez separada después de los 30 min en cada jarra. ....	44
<b>Tabla 4.6.</b> La turbidez final a los 30 min de cada dosis.....	45
<b>Tabla 4.7.</b> El porcentaje de la turbidez separada a los 30 min de cada dosis. ....	46
<b>Tabla 4.8.</b> Variación del agua clarificada por volumen residual en la muestra 3.....	47
<b>Tabla 4.9.</b> El porcentaje de agua por clarificar después de los 30 min en cada jarra. ....	47
<b>Tabla 4.10.</b> El porcentaje de agua clarificada después de los 30 min en cada jarra. ....	48
<b>Tabla 4.11.</b> Sedimentación residual en el vaso precipitado a los 30 min para cada dosis..	49
<b>Tabla 4.12.</b> El porcentaje del agua clarificada a los 30 min de cada dosis.....	49
<b>Tabla 4.13.</b> Variación de la turbidez en la muestra 2 de 5 min a 30 min. ....	51
<b>Tabla 4.14.</b> El porcentaje de turbidez que queda en cada jarra de la muestra 2. ....	51
<b>Tabla 4.15.</b> El porcentaje de turbidez separada en cada jarra de la muestra 2. ....	52
<b>Tabla 4.16.</b> La turbidez final de la muestra 2 a los 30 min de cada dosis. ....	53
<b>Tabla 4.17.</b> El porcentaje de la turbidez separada de la muestra 2 en cada dosis.....	54
<b>Tabla 4.18.</b> Variación del agua clarificada por volumen residual de la muestra 2.....	54
<b>Tabla 4.19.</b> El porcentaje de agua por clarificar en cada jarra de la muestra 2. ....	55
<b>Tabla 4.20.</b> El porcentaje de agua clarificada en cada jarra de la muestra 2. ....	55
<b>Tabla 4.21.</b> La sedimentación residual de cada dosis de la muestra 2.....	56
<b>Tabla 4.22.</b> El porcentaje del agua clarificada de cada dosis. ....	57

## RESUMEN

El circuito de pozas de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro en el año 2018 empleó una gran cantidad de agua para recuperar el oro tipo morrénico, esta agua después de haberse utilizado se deposita en pozas para su sedimentación discreta por su alta concentración de coloides. La sedimentación discreta para una operación eficaz necesita bastante tiempo y demanda pozas de sedimentación de gran capacidad. Asimismo, las zonas de captación del agua son limitadas de modo que el agua empleada en la recuperación del oro debe, necesariamente, ser extraída de las pozas de sedimentación. Es por ello que el objetivo de esta investigación es evaluar el proceso de sedimentación en las aguas residuales del circuito de pozas, utilizando la poliacrilamida aniónica como floculante, para lograrlo, este estudio fue de tipo analítico y explicativo con un diseño cuasi experimental, en el que se determinó la dosis óptima de poliacrilamida aniónica para las muestras M-1, M-2 y M-3; siendo la dosis óptima para M-1 y M-2 igual a 0,4 g (dando una concentración diluida de 0,4% en 100 ml). Mientras que, para M-3 la dosis óptima fue de 12 mg (dando una concentración diluida de 12% en 100 ml). Luego de haber determinado las dosis óptimas, se midió el porcentaje de sedimentación de la turbidez y el porcentaje de la clarificación del agua en M-2 con una concentración inicial de turbidez igual a 13 500 NTU; se logró sedimentar el 99,9% de la turbidez y clarificar un 82,0% del agua cruda, obteniéndose una turbidez final de 14,5 NTU en 30 min. En tanto, para M-3 con una concentración inicial de turbidez igual a 7 960 NTU; se logró sedimentar el 99,2% de la turbidez y clarificar un 69,0% del agua cruda, obteniéndose una turbidez final de 61,7 NTU en 30 min.

**Palabras clave:** Poliacrilamida aniónica, turbidez, sedimentación, agua residual.

## ABSTRACT

The Mine Operative Unit Halcon de Oro's pool circuit in the year 2018 used a lot of water in order to recover gold type moraine, after having used, the water that has concentration of colloids is deposited in pools for discrete sedimentation. Discrete sedimentation requires enough time and demands wide pool for an efficient operation of sedimentation. Likewise, the water catchment areas are so limited that the water used in the recovery of the gold had better extract from the sedimentation pools. Therefore, the objective of this research is to evaluate the sedimentation process of circuit by using anionic polyacrylamide as flocculent, to achieve this objective, this study was analytical and explanatory type with a quasi-experimental design, in which the optimal dose of anionic polyacrylamide was determined for samples M-1, M-2 and M-3. For the samples M-1 and M-2, the optimal dose were 0.4 g (i.e., diluted concentration of 0.4% in 100 ml). While in the sample M-3, the optimal dose was 12 mg (i.e., diluted concentration of 12% in 100 ml). After having determined the optimal doses, the turbidity's percentage of sedimentation and water clarification's the percentage determined for M-2 that has an initial concentration of turbidity equal to 13,500 NTU; it achieved to sediment 99.9% of the turbidity and clarified 82.0% of the raw water, obtaining a final turbidity of 14.5 NTU in 30 min. While for M-3, that has an initial concentration of turbidity equal to 7,960 NTU; it got to sediment 99.2% of the turbidity and clarify 69.0% of the raw water, obtaining a final turbidity of 61.7 NTU in 30 min too.

**Keywords:** Anionic polyacrylamide, turbidity, sedimentation, residual water.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Descripción del problema

En la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro (UOMHOR), se extrae gravas auríferas mediante el minado a cielo abierto tipo terrazas, con una excavadora de 1.4 m<sup>3</sup> de capacidad, dos cargadores de 3.5 m<sup>3</sup> de capacidad y con 3 camiones de 15 m<sup>3</sup> de capacidad. Estos equipos minan el mineral aurífero tipo morrénico de la cantera San Antonio - María, el cual es transportado hasta la zona de tratamiento del mineral. El proceso de recuperación del oro que se utiliza en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro es de tipo gravimétrico el cual emplea principalmente el agua en un sistema complejo de lavado y retención del mineral. Este proceso de recuperación posee tres etapas relativamente definidas; primero se lava el mineral morrénico en tolvas de mineral (*chutes*) con la finalidad de remover el material estéril. Segundo, el material fino concentrando de arenas negras con oro se hace circular dentro de canales simples (*sluices*) compuestos de *riffles* y alfombras de jefe en sus bases, ello con la finalidad de atrapar el oro. Finalmente, la pulpa fina que contiene oro es retirado en las alfombras para mezclarlo con mercurio y formar la amalgama con la finalidad de recuperar el oro.

El proceso de tratamiento y recuperación del oro genera aguas residuales que tienen una alta concentración de sólidos totales en suspensión y turbidez (aguas negras); los cuales son depositados en pozas de concentración para su sedimentación discreta. La sedimentación discreta para una operación eficaz necesita una gran cantidad de tiempo además de demandar pozas de sedimentación de gran capacidad pues la efectividad de la sedimentación discreta está directamente relacionada a la longitud y profundidad de las pozas. Por lo que, la

sedimentación discreta no es viable ni factible para la operación de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro ya que implicaría una enorme inversión. Asimismo, la recuperación del oro emplea una gran cantidad de agua en un proceso constante que no puede detenerse la cual debe ser necesariamente extraída de las pozas de sedimentación pues las zonas de captación de agua son limitadas.

Es por ello que, la re-circulación del agua es el proceso más eficiente en el uso de aguas industriales, pero utilizar agua con sedimentos y con turbidez en un proceso ineficaz de sedimentación discreta, perjudica la concentración óptima del oro. Es por ello que utilizar el floculante poliacrilamida aniónica aceleraría el proceso de sedimentación con lo cual se reduciría la turbidez del agua y se clarificaría la mayor cantidad posible de agua, con ello el uso del agua sería más eficiente y responsable sin afectar el proceso de recuperación del oro en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Pregunta general.**

¿Cuál es la evaluación de la sedimentación utilizando la poliacrilamida aniónica como floculante en las aguas residuales del circuito pozas de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro?

### **1.2.2. Preguntas específicos.**

¿Cuál es la dosis óptima de poliacrilamida aniónica que sedimenta la turbidez y clarifica las aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro?

¿Cuál es el porcentaje de sedimentación de la turbidez y el porcentaje de clarificación de las aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro con la dosis óptima de poliacrilamida aniónica?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general.**

Evaluar el proceso de sedimentación en las aguas residuales del circuito de pozas, utilizando la poliacrilamida aniónica como floculante en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

Determinar la dosis óptima de poliacrilamida aniónica que sedimentará la turbidez y logre clarificar las aguas residuales de relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

Determinar el porcentaje de sedimentación de la turbidez y el porcentaje de clarificación de las aguas residuales de relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro usando la dosis óptima de poliacrilamida aniónica.

#### **1.4. Justificación de la investigación**

El recurso hídrico agua es esencial para toda forma de vida y las distintas actividades que engloba el ser humano, convirtiéndose en un recurso escaso, vulnerable, estratégico e invisible, sosteniendo el desarrollo y el ambiente. Una de las actividades que hace uso de este recurso hídrico agua viene a ser la pequeña minería y minería artesanal, originando aguas residuales con gran nivel de sólidos totales en suspensión y turbidez.

El tratamiento de aguas residuales por medio de la sedimentación natural, requiere la construcción de juegos de pozas de gran dimensión, pero la precipitación lenta origina problemas de almacenamiento, obligando la recirculación con niveles de sólidos totales en suspensión y turbidez elevados, el cual al retornar a las plantas de lavado ya no son eficientes para la concentración gravimétrica teniendo pérdidas en la recuperación del oro. El conjunto de pozas que se requiere para el tratamiento se dividen en tres grupos; pozas de sedimentación, pozas de clarificación, pozas de retorno, y al ser el proceso de sedimentación natural (discreta) muy lento origina que en el circuito de agua pase niveles altos de sólidos totales en suspensión y turbidez llegando muchas veces hasta las pozas de retorno originando la colmatación de estas pozas, siendo necesario la limpieza de dichas pozas con maquinaria pesada originando costos elevados, es por ello que las aguas residuales requieren ser tratadas en las pozas de sedimentación mediante procesos físico químicos con la aplicación de floculantes para acelerar su sedimentación.

En consecuencia el presente proyecto de tesis es de mucha importancia, puesto que el agua es un recurso limitado en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro lo cual, consecuentemente, obliga a re-utilizar el agua de las pozas de sedimentación para la recuperación óptima del oro. El re-utilizar el agua industrial es muy posible con el tratamiento de aguas residuales utilizando coagulantes y floculante según señalan Tejada y Oré (2017); ya que los coagulantes y floculantes aceleran el proceso de remoción de la turbidez en un tiempo mínimo y clarifican una gran cantidad de agua, permitiendo no solo la recirculación una gran cantidad de agua, sino que en las plantas de lavado se tiene agua limpia para la mejor concentración gravimétrica incrementando la obtención oro (Au).

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

Se tienen los siguientes antecedentes para esta investigación:

Tejada (2017): Este trabajo de investigación tiene por objetivo evaluar la sedimentación de sólidos totales en suspensión y reducirlo la turbidez de las aguas residuales de relaves mineros, utilizando la cal como coagulante - floculante en la Unidad Operativa Minera Santiago – B. En este estudio se utiliza el método de prueba de jarras para realizar pruebas de la sedimentación de aguas residuales de alta turbiedad y con una gran cantidad de solidos totales de la unidad minera Santiago B; determinándose una dosis óptima de lechada de cal (CaO) en forma de lechada al 5% como coagulante - floculante de 6 ml/l, para luego evaluarla en la sedimentación del agua cruda con volares iniciales de turbidez de 81 900 NTU y solidos totales de 67 400 mg/l, con lo cual se logró recuperar el 50,25 % de agua esclarecida mediante sistema de sedimentación gravimétrica en vasos precipitados de 1 000 ml en 60 min, y reduciendo también en 60 min la turbidez a 19,39 NTU y los sólidos totales en suspensión (SST) a 18,25 mg/l.

Oré (2014): Este trabajo de investigación tiene por objetivo evaluar la eficiencia de los floculantes de sulfato de aluminio y Polifloc empleado en la depuración de aguas de baja turbiedad en la planta de tratamiento de Agua Potable Quicapata – Ayacucho. En este estudio se da en un rango variable de turbiedad del agua, despreciando los valores en temporadas de lluvia por presentar muchos picos de turbiedad que se da en un periodo corto, es por ello que este estudio se enfoca en la temporada seca, un periodo más largo y con valores de turbiedad con una variación relativa. En la investigación se concluye que el sulfato de aluminio trabaja



muy bien para depurar la turbiedad en un rango de 20 NTU a 200 NTU y cuando se tiene una turbiedad menor a 20 NTU es necesario utilizar el Polifloc, con lo cual se logra reducir la turbidez (mejorando el proceso de sedimentación). La dosis óptima de sulfato de aluminio fue de 20 mg/l a 30 mg/l, mientras que del Polifloc fue de 0,49 ppm; siendo su rango óptimo de trabajo 15 a 65 NTU, recalcando que mientras más baja la turbiedad los resultados fueron mejores.

Canaza y Chambi (2013): Este trabajo de investigación tiene por objetivo evaluar los reactores de sedimentación en columna y de flujo ascensional, para remoción de fosfatos de aguas residuales utilizando cal viva y cloruro férrico mediante un proceso de floculación – sedimentación en un flujo de agua residual de 2 l/min obteniéndose los niveles de remoción de sólidos totales disueltos (STD) con floculante cal viva en un 82,2 % y con cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$  en un 58,3% y remoción de turbiedad (NTU) con floculante cal viva en un 85,4% remoción de turbiedad (NTU) con floculante  $\text{FeCl}_3$  en un 55,5%

Amanqui y Lopez (2004): En este trabajo de investigación que tiene por finalidad el tratamiento de aguas ácidas de la mina Rinconada en el efluente del Balcon N° 03 utilizando  $\text{CaO}$  (Óxido de Calcio) y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Carbonato Sódico) y  $\text{Na}_2\text{S}$  (Sulfuro de Sodio) mediante un proceso de Neutralización – Presipitación, llegando a establecer tiempos para obtener sedimentos estables, donde al utilizar  $\text{CaO}$  (Óxido de calcio), el tiempo que se necesita para obtener un sedimento estable es de 10 horas, con un volumen de 110  $\text{cm}^3$ . Para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{S}$  este tiempo es de 48 horas, con volúmenes de sedimento de 180 y 350  $\text{cm}^3$  respectivamente.

Mendoza (2009): En su trabajo de investigación tiene por objetivo la remoción de cromo VI de las aguas residuales procedentes de la planta de curtiembre del centro de investigación y producción, adicionando virutas de hierro, en donde concluye que los reactivos utilizados en el tratamiento no incrementan la contaminación en las aguas, deduciendo esto de los análisis que realizó.

García y Tongombol (2015): En su trabajo de publicación los relaves mineros, su efecto en el ambiente y la salud, en donde concluyen que los relaves mineros son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, los cuales son usualmente mezcla de tierra, minerales, agua y rocas, y que vienen a ser uno de los mayores contaminantes ambientales.

Requena (2008): En su trabajo de investigación donde el objetivo se centra en el tratamiento integral de aguas residuales industriales, concluyendo en que la recirculación de

las aguas industriales tratadas a los procesos de planta de beneficio y de mina disminuye el consumo de agua fresca en las operaciones minero-metalúrgicas.

Bravo (2017): En su trabajo de investigación sobre los coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales, los cuales se están investigando continuamente como sustitutos de los coagulantes químicos convencionales, debido a que los usos de coagulantes sintéticos en las operaciones de tratamiento de agua están afectando el medio ambiente, estos sustitutos en su mayoría son semillas, a partir de las cuales se ha extraído los agentes coagulantes activos que contienen esencialmente polisacáridos de alto peso molecular y compuestos proteínicos usados para la remediación de aguas residuales, contaminadas con tintes, altos niveles de turbidez, sustancias químicas, Demanda Química de Oxígeno y los iones de metales pesados. Logrando la reducción de contaminantes de hasta un 90%.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. Minado a tajo abierto por terrazas.**

Según Herrera (2006), este método se basa en una minería de banqueo de avance unidireccional. Se aplica en yacimientos relativamente horizontales que pueden ocurrir en estratos de uno o varios niveles mineralizados y con recubrimientos potentes; asimismo, también se aplica en yacimiento morrénico de concentración fluvial. Este método también te permite realizar un cierre progresivo de la mina, depositando el material estéril en el espacio del pit ya minado.

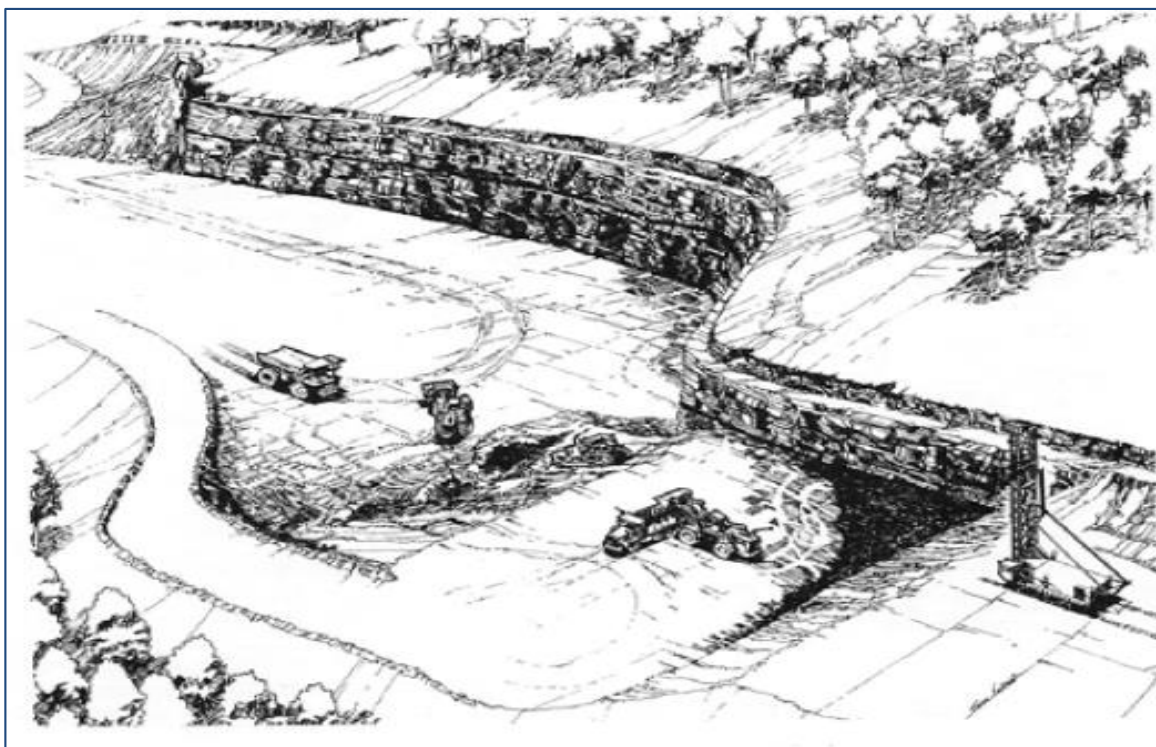
El proceso de minado emplea equipos móviles convencionales compuesto por equipos de carguío y transporte; y también puede emplear equipos fijos como es el caso de las fajas transportadoras. La elección de qué tipo equipo dependerá de la envergadura de la operación y la capacidad de inversión del propietario. Véase la figura 2.1.

### **2.2.2. El proceso de concentración gravimétrico.**

#### **Definición y concepto.**

Según definen Concha y Manuel (2007), es la separación de dos o más especies minerales de diferente peso específico, debida del movimiento relativo en un medio acuoso o en el aire como respuesta de los sólidos a las fuerzas gravitacionales de arrastre y empuje.

Es la más adecuada para la minería placer y morrénico glacial porque: No usa reactivos de ningún tipo, solo usa agua y esta agua puede reutilizarse después de su clarificación mediante sedimentación, generalmente de fácil manejo, tiene bajos costos de operación, sirve para una gran variedad de minerales como el oro, la volframita, tantalita, casiterita, sulfuros, etc.



**Figura 2.1.** Método por terrazas.

Fuente: (Herrera, 2006).

### **Principios de la concentración gravimétrica.**

De acuerdo con Manuel y Concha (2015), la concentración gravimétrica separa el mineral de interés de la ganga o estéril que en principio tienen distintas densidades. Esta separación se realiza por el movimiento ejercido por el agua y por la acción de la gravedad.

La concentración del mineral de interés A1 que está compuesta con el material estéril B1, es sometida a una aceleración y movimiento ejercido por el agua, siendo la densidad de A1 =  $d_1$  y de B1 =  $d_2$ , además que  $d_1$  tiene marcada una amplia diferencia de densidad comparado a  $d_2$ , de acuerdo a la ley de Newton, la partícula B1 sufrirá un mayor aceleración que A1, lo cual hará que este se mueva más fácil por la fuerza del fluido haciendo que venza la resistencia del plano inclinado y pase por este para separarse de la partícula A1. Por otro lado la partícula A1, tendrá una menor aceleración por su mayor densidad y al pasar por plano inclinado este no podrá vencer su resistencia, quedándose atrapado en los intersticios del plano inclinado por la acción de la gravedad y la resistencia.

Entonces, para que se produzca una buena concentración del mineral debe tenerse en cuenta los siguientes puntos:

**Liberación de partículas:** como el mineral rico se encuentra unido con la ganga el cual posee distintos tamaños, por lo general en el mineral morrénico tipo glacial, es necesario

realizar una separación de tamaños mediante mallas, con la finalidad de uniformizar los tamaños de partículas.

**Distribución de las partículas:** para una óptima operación se debe tratar de no tener una distribución granulométrica muy amplia.

**Forma de las partículas:** las partículas según su forma se comportan hidrodinámicamente diferente aunque sean de igual densidad, por ello si existe el chancado de mineral para una liberación de partículas, estos jamás deben mezclarse con un material morrénico fluvial, donde el material es más esférico.

**Diferencia de densidad:** esta debe ser notoria y diferenciada para que exista una buena separación lo cual se conoce como criterio de concertación (CC).

**Disponibilidad de agua:** generalmente la concentración gravitacional se efectúa en un medio acuoso, por ello es importante disponer de una cantidad suficiente de agua en el sitio donde se encuentra la planta de beneficio.

#### **Proceso operativo.**

Según refieren Alvarez *et al.* (2012), el proceso operativo de la concentración del mineral aurífero por el método gravimétrico aprovecha en gran manera dos propiedades relevantes del oro: primero, este se encuentra en partículas brillantes y en pepitas de oro combinados en forma libre con arenas y gravas; segundo, la densidad del oro es muy alta ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) lo cual facilita la separación de este con otras particular asociadas.

Este proceso operativo se da cuando el mineral morrénico proveniente de la cantera pasa un proceso sistemático de recuperación y concentración gravimétrica, la cual se detalla a continuación:

**Lavado del material aurífero:** El objetivo de esta operación es concentrar a las partículas de oro del material estéril que pueden ser arcillas, gravas, arenas y pedregones. La disgregación del material semi-consolidado se realiza por medio de chorros de agua usando monitores artesanales en la tolva de alimentación o chute. Este primer proceso es importante, ya que con un correcto lavado del material se permitirá liberar el oro de la mejor manera posible.

Para una óptima operación de este proceso, es necesario que el recurso hídrico tenga las condiciones físicas y químicas, tales como: una claridad perceptible del agua, no debe existir sustancias oleo-contaminantes, la presión de trabajo debe permitir disgregar los materiales, la relación de agua/material debe ser la indicada. La tolva de alimentación, también conocido como *chute* el cual es construido de distintos material como; tablas de madera, puntales de madera y alfombras de jebe y es instalada a una determinada inclinación.

Las dimensiones de la tolva de alimentación variaran de acuerdo a la envergadura de la operación, siendo lo recomendable de tamaños menores donde permitan concentrar el trabajo del agua. El monitor (bomba), es el dispositivo que provisiona el agua a una determinada presión y caudal, la cual envía el agua a través de mangueras hasta las cabinas de operación. Y cabinas de operación, Es el lugar donde un operador ejecuta las maniobras de lavado del material morrénico con el agua empleando mangueras. Ver anexo N° 03 – A

**Clasificación del material post liberación:** Es una operación conjunta con el lavado del material, la cual tiene la finalidad de separar el material grueso del material menor a una determinada tamiz (este puede ser  $\frac{1}{2}$ ""). El material grueso es rechazado parrilla hacia otra área para su disposición final, mientras que el material clasificado pasa a través de la parrilla hacia otra tolva que está conectada a canales de circulación para continuar el proceso de concentración.

La parrilla fija es construida de barras de acero, las cuales se disponen en forma de una malla de un determinada apertura (este puede ser  $\frac{1}{2}$ "") y que se instala a la salida del chute a una determinada inclinación. La tolva de recepción es el lugar donde se recibe el material clasificado y que se denomina pulpa del mineral.

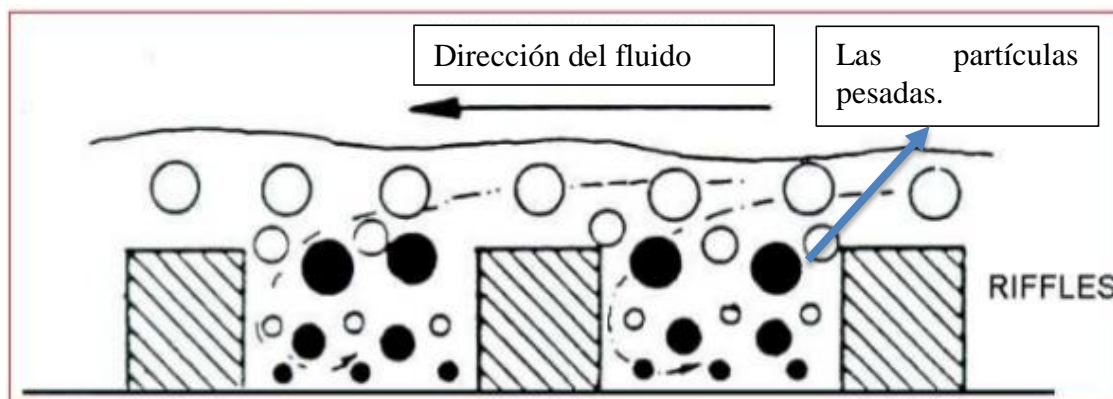
**Concentración en canaletas simples (sluices):** El escurrimiento en canaletas simples se caracteriza por la existencia de una masa de partículas minerales suspendidas (pulpa) las cuales son arrastradas por una corriente de agua a lo largo de una canaleta, sujeta a las fuerzas de gravedad y a la presión de la corriente, produciéndose una estratificación por densidades. La operación de las canaletas es intermitente. Una vez terminado el tratamiento, los *riffles* y las alfombras de jebe son desmontados y se recoge el material pesado, es decir, el oro concentrado.

Las canaletas simples (*sluices*) son construidas de módulos que facilitan su instalación y su remoción. El tamaño de la canaleta es variable. Existen canaletas de 12 pulgadas hasta 10 pies de ancho, por 6 pulgadas hasta 4 pies de profundidad. Presentan una inclinación que depende principalmente de los tamaños mayores que tenga la alimentación y de la cantidad de agua disponible. El largo de la canaleta generalmente varía de 50 a 150 metros. Este largo depende de la fineza y del peso específico de los minerales valiosos, así como, de la distancia que los minerales de ganga deben ser transportados. Ver anexo N° 3 - A:

Como esta operación es turbulenta y utiliza grandes volúmenes de agua, se emplea el principio de los *riffles* el cual es retener las partículas pesadas aprovechando la turbulencia

del fluido y conteniéndolas en pequeños muros. Los riffles son construidos de metal o madera.

Véase la siguiente figura:



**Figura 2.2.** Principio operativo de los riffles.

Fuente: (Alvarez, 2012).

**La amalgamación del oro:** La amalgamación se realiza utilizando bateas metálicas cónicas, donde se vierte el concentrado de oro para “batearlo”. El proceso consiste en frotar y combinar la pulpa concentrada con el mercurio para formar la **amalgama** (Au – Hg), luego se procede a un lavado circular con el propósito de asentar la amalgama en el fondo de la batea. Después de separar el material estéril, este será vertido a un dispositivo que filtrara el mercurio excedente mediante el uso de un filtro prensa. Ver anexo N° 03 - A

### 2.2.3. Las aguas residuales – industriales.

#### El agua como disolvente universal.

Se considera que el agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004, p. 3).

#### Calidad del agua.

Según refieren Wikipedia *et al.* (2018), la calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito. Se utiliza con mayor frecuencia por referencia a un conjunto de normas contra los cuales puede evaluarse el cumplimiento. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable.

Para evaluar la calidad del agua se realiza técnicas analíticas adecuadas para el uso específico de cada agua, ya que no es lo mismo evaluar para el consumo humano que para el uso industrial. Así pues, para que los resultados de estas determinaciones sean representativas, es necesario dar mucha importancia a los procesos de muestreo, a las unidades y terminología empleadas, y a las características físicas y químicas del agua.

### **Características físicas del agua.**

De acuerdo a Canepa, *et al.* (2004), las características físicas del agua, son llamadas así porque pueden impresionar a los sentidos (vista, olfato y tacto), y tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua.

Dentro del ámbito del estudio las propiedades más importantes serán:

**La Turbidez:** Es originada por la presencia de partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra, arena, etc.); las cuales reducen la transparencia del agua en menor a mayor grado. La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU).

**Sólidos en suspensión:** El total de sólidos en suspensión (SST) indica la cantidad de sólidos presentes en suspensión que son medidos habitualmente en miligramos por litro (mg/l) y que pueden ser separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración en un laboratorio.

**El color:** Esta característica del agua puede estar ligada a la turbiedad o presentarse independientemente de ella. Se denomina color aparente a aquel que presenta el agua cruda o natural y color verdadero al que queda luego de que el agua ha sido filtrada. Existen muchos métodos de remoción del color. Los principales son la coagulación por compuestos químicos como el alumbre y el sulfato férrico a pH bajos y las unidades de contacto o filtración ascendente.

**Temperatura del agua:** Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

**El potencial de hidrogeno (pH):** Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 9. El pH influye en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Así pues, Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación.

### **Las aguas residuales.**

De acuerdo a Morales *et al.* (2013), las aguas residuales - industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua, incluyéndose los líquidos residuales, aguas de proceso y aguas de drenaje. Estas aguas residuales contienen todo tipo de contaminantes, que si son vertidos a riachuelos, ríos o mares, tienen un alto potencial de contaminación.

#### **2.2.4. Tratamiento de aguas residuales – Nivel primario.**

Según refieren Ramalho *et al.* (1993), el tratamiento de aguas residuales tienen varios procesos definidos desde los físicos hasta los químicos. De forma global, estos procesos pueden ser la transferencia de sólidos, iones, de gases y molecular o de nutrientes. No obstante, de acuerdo al alcance de este estudio, solo el proceso de transferencia de sólidos será desarrollado.

La transferencia de sólidos e iones, es referido también como tratamiento preliminar o tratamiento nivel primario, el cual tiene la finalidad de remover todos los sólidos que se encuentran en el agua.

El tratamiento preliminar consiste en los siguientes procesos:

**El cribado:** Consiste en hacer pasar el agua a través de rejillas o tamices con la finalidad de retener sólidos de tamaño como: ramas, palos y toda clase de residuos sólidos.

**La sedimentación:** Este proceso tiene por objetivo separar los coloides en suspensión del agua.

**La flotación:** El objetivo de este proceso es promover condiciones de reposo, para que los sólidos cuya densidad es menor que la del agua asciendan a la superficie de la unidad de donde son retirados por desnatado. Para mejorar la eficiencia del proceso, se emplean agentes de flotación.

**Neutralización y Filtración:** La neutralización consiste en agregar iones que modifiquen las propiedades químicas del agua para hacerlos más tratables en otros procesos. La filtración es un proceso final de pulimento de la turbiedad del agua, utilizándose carbón, arena u otro medio.

#### **La sedimentación.**

De acuerdo a la definición de Crites *et al.* (2000), la sedimentación de la material coloidal y en suspensión del agua residual mediante separación por gravedad constituye una de las operaciones de tratamiento de agua más ampliamente usada. Esta operación consiste en separar las partículas sólidas del líquido en donde se encuentran suspendidas (dispersas)



basándose en la diferencia del peso específico y la acción de la gravedad. En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual.

Dentro del proceso de sedimentación existen tres tipos, los cuales son:

**Sedimentación discreta:** Se refiere a la sedimentación por gravedad en donde las partículas suspendidas mantienen su individualidad ósea que, no se somete a un proceso de coalescencia en donde las demás partículas intervengan con otras para cambiar sus propiedades físicas. El fundamento para la sedimentación de partículas discretas es la ley de Newton, que se basa en la suposición de que las partículas son esféricas con diámetros homogéneos. Este fundamento nos dice que cuando una partícula se sedimenta, va acelerándose hasta que las fuerzas que provocan la sedimentación las cuales son el peso específico de la partícula y la fuerza de la gravedad, se equilibran con las resistencias o fuerzas de fricción ofrecidas por el líquido. Cuando se llega a este equilibrio, la partícula alcanza una velocidad de sedimentación constante, denominada velocidad final de sedimentación de la partícula. Para la operación efectiva en pozas de sedimentación rectangulares, este proceso depende de la altura de la poza (H) y sobre todo de la longitud (L), la cual optimiza el proceso cuanto más grande es L. Es por ello que, por lo general este proceso solo es usado para aguas con baja concentración de sólidos o también solo para un pre proceso.

**Sedimentación con floculación:** Se refiere a la aglomeración de las partículas que va acompañada de cambios de la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. Esta sedimentación se lleva a cabo en sedimentadores primarios y clarificadores.

**Sedimentación por zonas:** Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las cuales las fuerzas entre las partículas son suficiente para intervenir a partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, encontrándose tres fases dentro de este tipo de sedimentación. La fase líquida – superior, la fase líquida y sólida – intermedia, y la zona de sedimentación – inferior. Un ejemplo de esta sedimentación se encuentra en el proceso secundario de clarificación en la sedimentación de lodos activos.

#### **Unidades de sedimentación.**

Según refieren Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo (2004), el proceso de sedimentación se realiza en distintas unidades las cuales se pueden clasificar en:

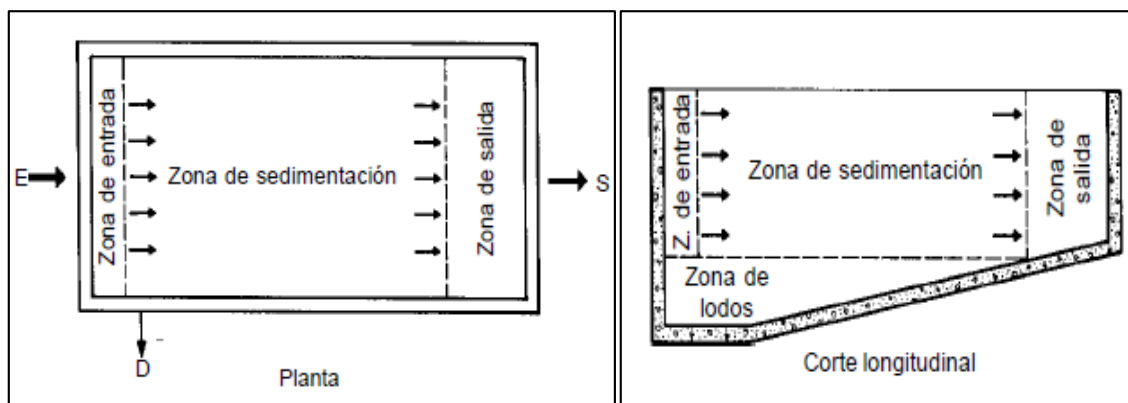
Sedimentadores o decantadores estáticos

Decantadores dinámicos

Decantadores laminares.

### Sedimentadores y decantadores estáticos.

De acuerdo a Canepa, *et al.* (2004), En este tipo de unidades puede producirse la sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición. Por lo general, este tipo de unidades poseen las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas: zona de entrada y distribución de agua, zona de sedimentación propiamente dicha, zona de salida o recolección de agua, y zona de depósito de lodos. Véase la siguiente figura.



**Figura 2.3.** Sección planta y longitudinal de los sedimentaros y decantadores estáticos.

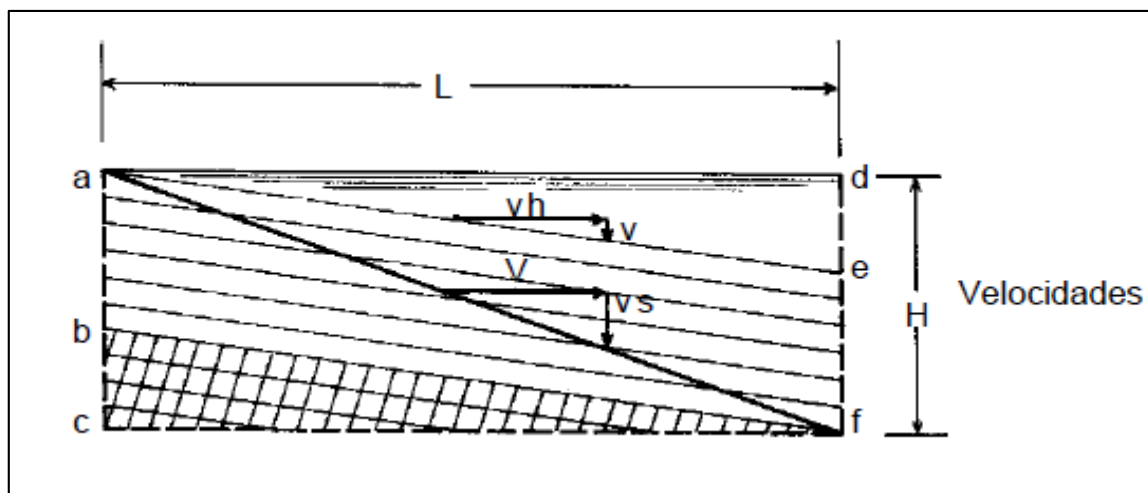
Fuente: (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004).

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad  $V_H$  constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido ( $V_H$ ) y su propia velocidad de sedimentación ( $V_S$ ). Véase la figura 2.4.

### Tipos de unidades de los sedimentadores y decantadores estáticos.

Entre los que se mencionara a:

**Los desarenadores:** Los desarenadores tienen por objeto remover del agua cruda la arena y las partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente y la interferencia en los procesos de coagulación y floculación. El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0.2 milímetros. Una granulometría inferior corresponde a los procesos de pre sedimentación o sedimentación (Canepa, Maldonado, Barrenechea, & Aurazo, 2004, p. 25).



**Figura 2.4.** Parámetros que intervienen en los sedimentarios y decantadores estáticos.

Fuente: (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004).

**Los sedimentadores rectangular:** Dentro del contexto de este estudio se refiere a las pozas de sedimentación en donde se tiene lugar a la clarificación de aguas con el proceso de coagulación y floculación.

#### **La sedimentación con floculación.**

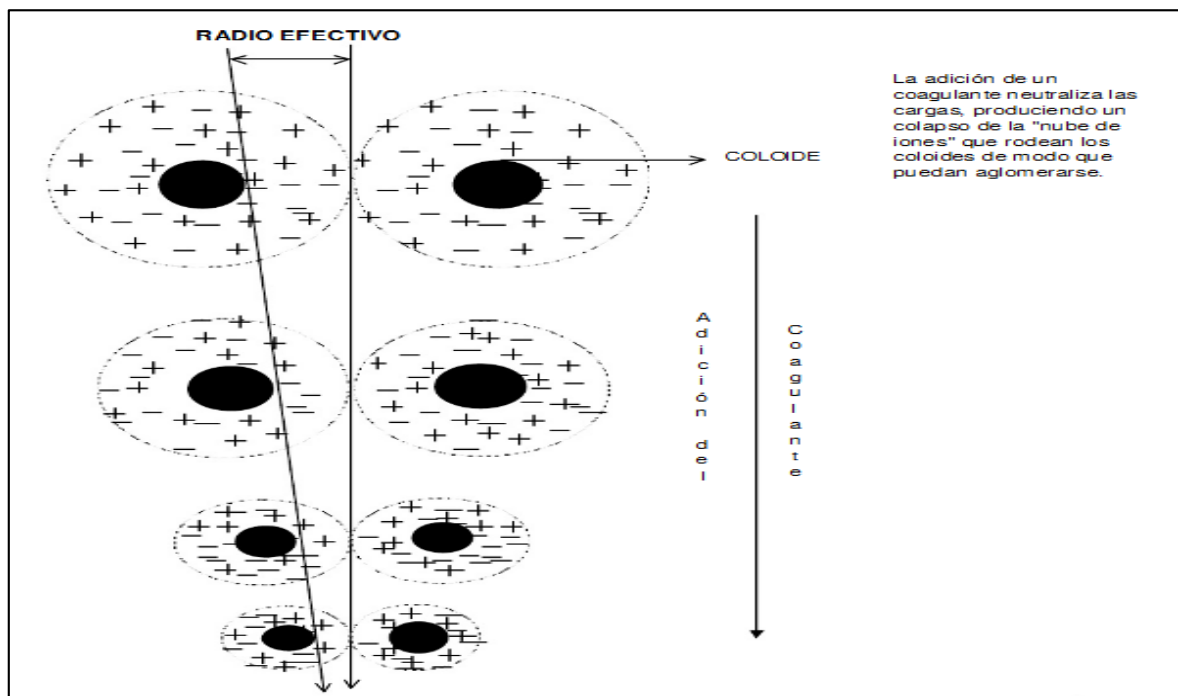
Conforme a Ramalho *et al.* (1993), es el proceso donde la partículas en suspensión se aglomeran generando cambios en la densidad de las partículas lo cual favorece a que las partículas sedimenten más rápidamente. Así pues, la sedimentación con floculación puede darse de forma **ordinaria**, cuando las partículas dispersas en el líquido no se comportan como partículas discretas sino que tienen agruparse, sedimentándose de esta forma. Asimismo, la sedimentación con floculación puede darse de forma **acelerada**, cuando se utilizan aditivos para proceder primero con la coagulación y luego con la floculación para acelerar el proceso de sedimentación de partículas. Este tipo de sedimentación es la más óptima y más utilizada ya que mejora el proceso de reciclaje del agua tanto en tiempo como en dinero. Los dos procesos que intervienen en una sedimentación con floculación acelerada son: La coagulación – como etapa 1 y la floculación – como etapa 2.

#### **La coagulación – etapa 1.**

Según refieren Oré *et al.* (2014), las partículas suspendidas en el agua 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. La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de coagulantes químicos. Es un método universal de la sedimentación pues elimina una gran cantidad de partículas en

suspensión de distintas naturalezas y peso específicos al menor costo, no obstante, puede representar un gasto relevante cuando el proceso no es bien realizado.

El proceso de coagulación inicia con la adición de una sal de aluminio y hierro, este reacciona con el agua formando especies hidrolizadas con cargas positivas las cuales anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Véase la siguiente figura.



**Figura 2.5.** Proceso de coagulación.

Fuente: Montalvo (2013).

### Mecanismo de la coagulación.

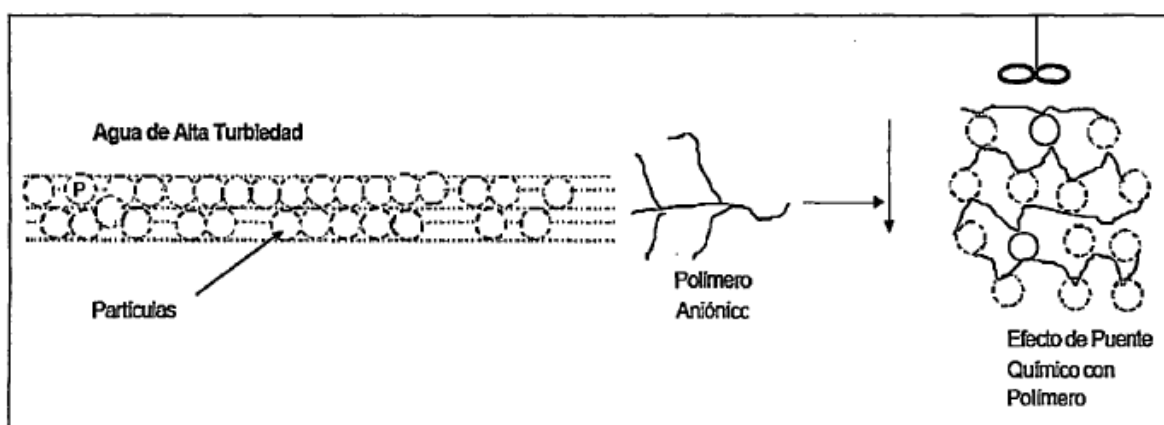
Conforme a Canepa, *et al.* (2004), la desestabilización de la acción del coagulante se obtiene los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

**Compresión de la doble capa:** Las partículas en suspensión en un líquido cuando se acercan generan una fuerza de repulsión a causa de sus capas difusas. El potencial de repulsión está en función a la distancia que los separa y este puede ser reducido incrementando iones de carga opuesta con la adición de un coagulante.

**Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado:** Las partículas desestabilizadas se pueden atrapar dentro de un floc. Cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalentes como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  o cloruro férrico  $FeCl_3$ , el floc está formado de moléculas de  $Al(OH)_3$  o  $Fe(OH)_3$ . La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado; lo cual se da con la formación de un anillo externo por parte de las partículas y

un anillo interno por parte de las sales en la reacción del floc. Esto indica que puede requerir una menor cantidad de coagulantes para una concentración importante de partículas.

**Adsorción y puente:** Una sedimentación menos costosa se obtiene utilizando un polímero aniónico y/o catiónico cuando las partículas están cargadas negativamente. Las moléculas de polímero contienen grupos de químicos en cadenas largas las cuales pueden absorber varias partículas en sus distintas ramificaciones, formando así puentes entre las partículas coloidales. Cabe mencionar que un exceso de estos polímeros puede reestablecer la suspensión de las partículas. Véase la siguiente figura:



**Figura 2.6.** Proceso de formación de puente.

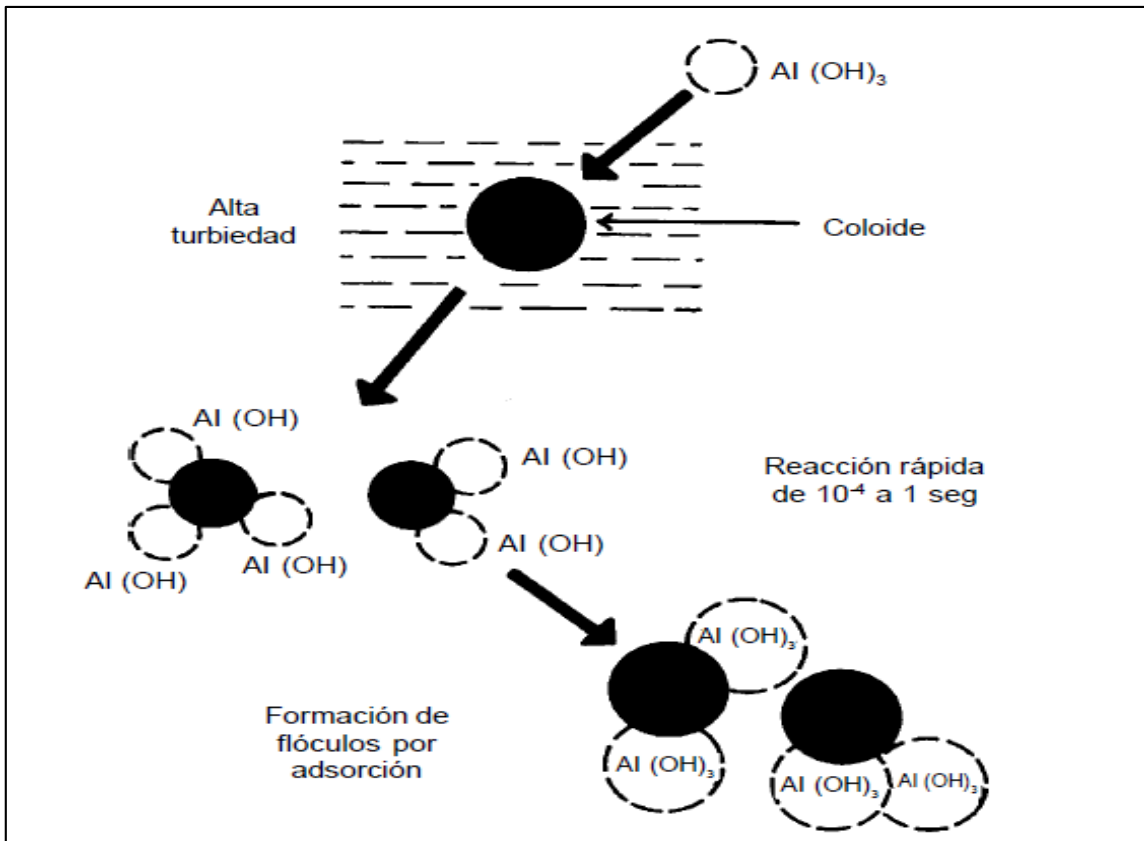
Fuente: (Oré, 2014).

### **Tipos de coagulación.**

Según refieren Canepa, *et al.* (2004), se presentan dos tipos predominantes de la coagulación, siendo estos:

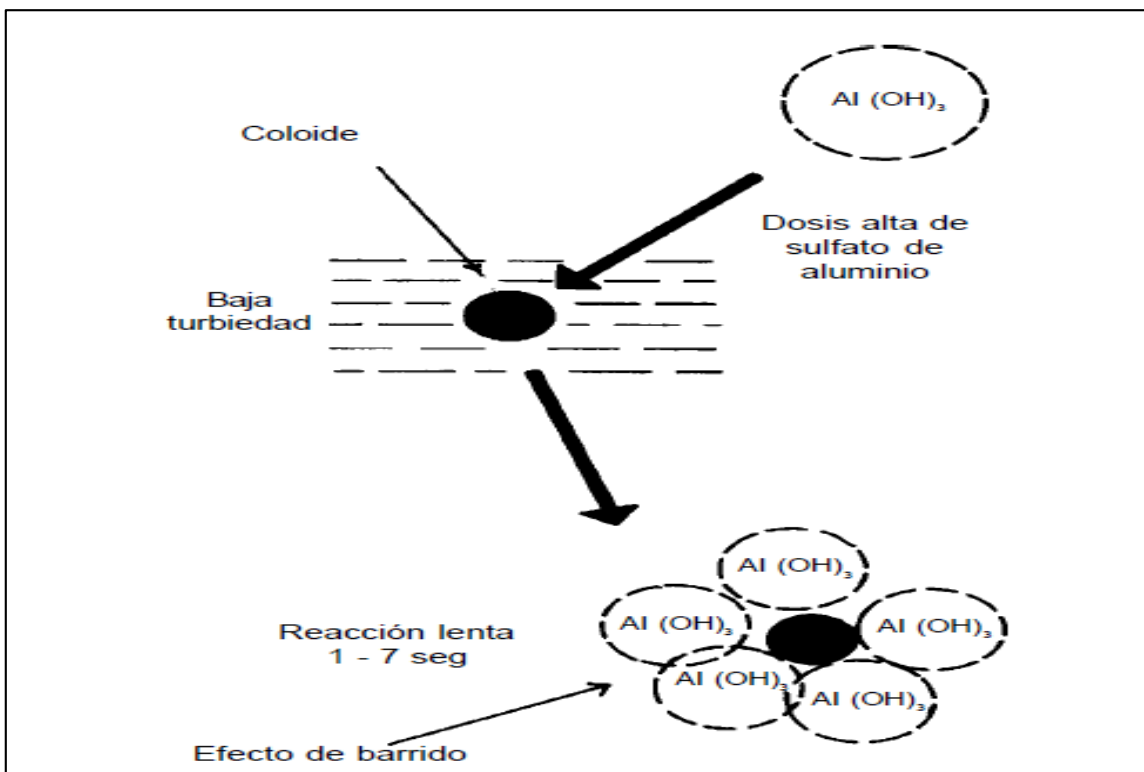
**Por adsorción:** Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal, y cuando el coagulante es adicionado al agua turbia, los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los floculos de forma instantánea. Véase la figura 2.7.

**Por barrido:** Se presenta cuando el agua presenta baja turbiedad y la cantidad de coloides es pequeña, en este caso las partículas son envueltas al producirse una sobresaturación de sulfato de aluminio o cloruro férrico. Véase la figura 2.8.



**Figura 2.7.** Coagulación por adsorción.

Fuente: (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004).



**Figura 2.8.** Coagulación por barrido.

Fuente: (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004).

### **Coagulantes utilizados.**

De acuerdo a Canepa, *et al.* (2004), los principales coagulantes utilizados para producir el floc, tanto por absorción y barrido son:

- Sulfato de aluminio.
- Aluminato de sodio.
- Cloruro de aluminio.
- Cloruro férrico.
- Sulfato férrico.
- Sulfato ferroso.
- Polímeros (polielectrolitos).

### **Factores que influyen en la coagulación.**

Conforme a Oré, Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo (2014), existen factores o propiedades tanto del agua como del coagulante que influyen en el proceso de formación del floc, estos factores son:

**Influencia del pH:** El pH es un factor muy importante en la coagulación. La naturaleza del agua a tratar tendrá un rango de pH de acuerdo a la composición de los iones y la alcalinidad. Asimismo, el rango de pH condiciona al tipo de coagulante a utilizar; si la coagulación se realiza fuera del rango óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante lo que significa que la dosis empleada del coagulante es alta. Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8,0; mientras que para sales de hierro, el rango de pH es de 5,5 a 8,5 unidades.

**Influencia de la temperatura:** Es importante en zonas de climas muy marcados, principalmente cuando se alcanzan temperaturas de congelación. A temperaturas entre 10 y  $>0^{\circ}$  C, la viscosidad del agua aumenta, el pH decrece, por lo que desfavorece a la coagulación. En el rango de 10 a  $40^{\circ}$  C se encontró que la eficiencia era cada vez mejor al aumentar la temperatura porque se incrementaba la tasa de colisiones entre las partículas. Dentro de este rango, son importantes la turbiedad y la alcalinidad. No obstante, a temperaturas muy elevadas, la coagulación también se ve desfavorecida.

**Influencia de la calidad del agua cruda:** En la siguiente tabla se esquematiza sus parámetros.

**Influencia de la dosis óptima:** La influencia de este factor define la eficiencia del proceso de coagulación. Así pues, la aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación, la cual se puede observar en la figura 2.9, estas zonas son:

**Tabla 2.1:** La calidad del agua cruda.

Tipo de agua		Tipo de Coagulación		Requerimientos
Turbidez	El pH			
Baja concentración de coloides	Baja alcalinidad	Formación de precipitado	Floc tipo barrido	Altas dosis de coagulantes. Adición de bentonita, preferentemente arcilla.
Baja concentración de coloides	Alta alcalinidad	Formación de precipitado	Floc tipo barrido	Altas dosis de coagulantes. Uso alternativo de bentonita, preferentemente arcilla.
Alta concentración de coloides	Baja alcalinidad (pH 4 a 7)	Absorción de polímeros metálicos (+)	Floc tipo adsorción	Determinar solo la dosis del coagulante óptimo.
Alta concentración de coloides	Alta alcalinidad (pH >7)	Absorción de polímeros metálicos (+)	Floc tipo adsorción	Dosis del coagulante se incrementa con la concentración de partículas.

Fuente: Tratamiento de Agua para Consumo Humano: Plantas de Filtración Rápida - Tomo I.

Zona 1: Cuando la dosis del coagulante es mínima, el cual no es suficiente para desestabilizar las cargas de las partículas, por consiguiente no se produce la coagulación.

Zona 2: Cuando la dosis del coagulante se encuentra en el rango óptimo, se produce una rápida aglutinación de los coloides, lográndose sedimentar.

Zona 3: Cuando la dosis del coagulante se encuentra por encima del valor óptimo, el coagulante re estabiliza las cargas de las partículas (carga inversa), generando una re dispersión de los coloides.

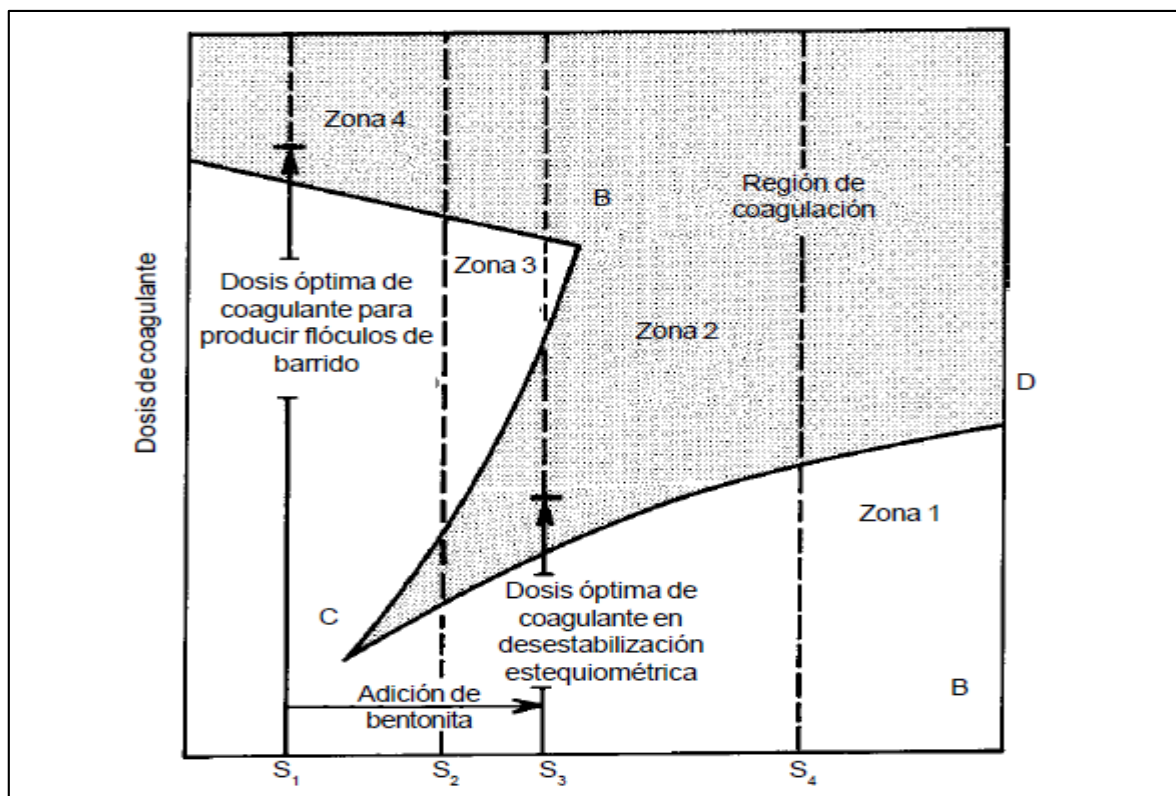
Zona 4: Cuando la dosis del coagulante se incrementa mucho más, el coagulante se sobresatura en la mezcla generando el proceso de barrido, lo cual arrastra (captura) a las partículas generando una nueva sedimentación.

**Influencia de la concentración óptima – mezcla del coagulante:** La aplicación uniforme del coagulante al agua es la principal dificultad para la realización de una coagulación eficiente. El problema reside en que las cantidades de coagulante son muy pequeñas comparadas con el volumen de la masa de agua; esto es, la dosis es muy pequeña comparada con el volumen de agua que se va a tratar. Es por ello que, es necesaria una suficiente turbulencia, lo que permita que la dispersión del coagulante sea más efectiva cuando mayor sea el volumen de solución o más diluida sea esta, lo que resultará en una mejor remoción de la turbiedad porque el coagulante entrará más rápido y más fácilmente en contacto con el mayor número de partículas coloidales.

**La floculación – etapa 2.**

De acuerdo a Oré, *et al.* (2014), la floculación es el proceso que le sigue a la coagulación, el cual tiene por objetivo principal reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.





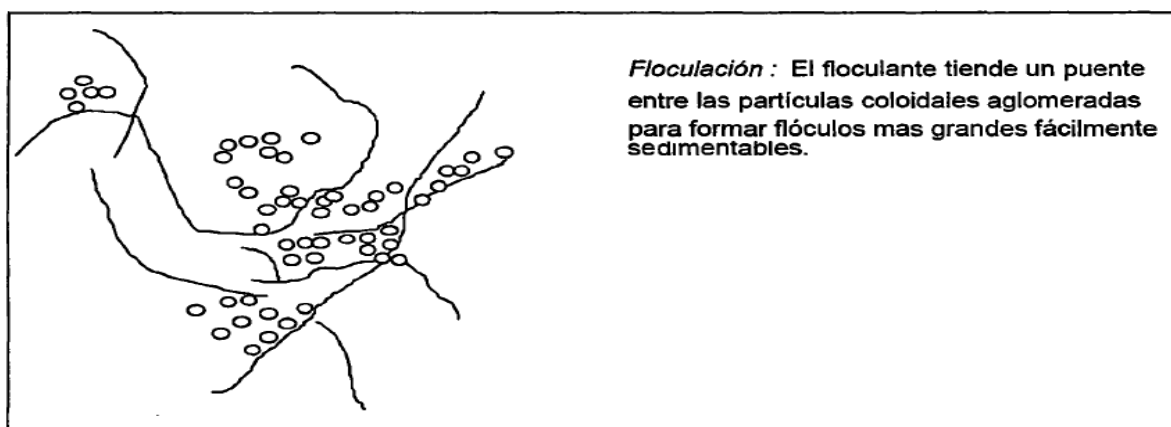
**Figura 2.9.** Sedimentación de los coloides con sales de hierro y aluminio.

Fuente: (Canepa, Maldonado, Barrenechea y Aurazo, 2004).

La floculación se da agregando un nuevo aditivo: floculante, el cual se mezcla en la solución de forma lenta con la finalidad de formar puentes entre los flóculos, esto permite aglomerar flóculos que no puedan sedimentar rápidamente, optimizando así el proceso de sedimentación del coagulante. Véase la figura 2.10.

**Tipos de floculación.**

De acuerdo a Oré, *et al.* (2014), la floculación es un proceso causado por la colisión entre partículas. Así pues existen dos tipos de floculación:



**Figura 2.10.** Sedimentación de los coloides con sales de hierro y aluminio.

Fuente: (Oré, 2014).

**Floculación pericinética:** Es producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento también es conocido como movimiento Browniano.

**Floculación ortocinética:** Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua el cual es inducido por una energía exterior a la masa del agua y que pueden ser de origen mecánico o hidráulico.

#### **Parámetros de la floculación.**

Según Oré (2014), los parámetros que caracterizan a la floculación son los siguientes:

Floculación ortocinética que dependerá por el grado de agitación.

Gradiente de velocidad.

Numero de colisiones entre los flóculos que dependerá de la gradiente de velocidad.

Densidad y tamaño del floc.

Tiempo de retención.

Volumen de lodos.

#### **Tipo de floculantes.**

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados de moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros repetidos en cadenas largas. Estos floculantes pueden ser de naturaleza: mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis (Oré, 2014, p. 40).

**Floculantes minerales:** Principalmente la sílice el cual debe ser preparado antes de emplear. Su preparación es muy delicada y presenta riesgo de gelatinización por lo que esto reduce mucho su eficiencia.

**Floculantes orgánicos naturales:** Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales. Los más representativos son los alginatos cuya estructura polimérica son: los ácidos manuránicos y los ácidos glucónicos.

**Floculantes orgánicos de síntesis:** Son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, los cuales son obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> g/mol. Estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros: aniónicos que generalmente copolímeros de acrilamida y del ácido acrílico, neutros o no iónicos (poliacrilamidas), y catiónicos: generalmente copolímeros de acrilamida y un monómero catiónico.

#### **2.2.5. La poliacrilamida aniónica.**

La poliacrilamida aniónica es un floculante - coagulante aniónico altamente efectivo. Este polielectrolito acondiciona con eficacia los sólidos para las operaciones de

deshidratación y ayuda en los procesos de clarificación de agua en una amplia variedad de industrias. Estos floculantes muestran un excepcional desempeño en las separaciones sólido-líquido en un amplio rango de condiciones.

La poliacrilamida aniónica es un polímero de origen sintético que contiene grupos ionizantes de cadenas largas, por ello se le conoce también como polielectrolito. Véase su fórmula química:



Para efectos de este estudio de investigación, la poliacrilamida aniónica utilizada la serie poliacrilamida seca (PAM) catiónica: Kemira SUPERFLOC A-100. La Hoja de Datos de Seguridad de Kemira, además de algunas especificaciones técnicas se puede apreciar en el anexo N° 01.

**Aplicaciones y beneficios.**

Los productos de la serie Kemira SUPERFLOC A-100 pueden ser aplicados en cualquier proceso de separación sólido-líquido. Están recomendados para:

Ayudantes de coagulación.

Coagulante primario.

Flotación por medio de aire disuelto.

Filtración.

Sedimentación por gravedad.

Deshidratación mecánica.

Remoción de fósforo.

Asimismo, los beneficios de estos productos son:

El producto seco minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento.

Uso económico: eficaz a bajas dosis.

Remoción de sólidos altamente eficaz.

Efectivo en un amplio rango de pH, no modifica el pH del sistema.

Elimina o reduce el uso de sales inorgánicas.

Gran estabilidad de almacenamiento.

**Dosificación del producto y distribución.**

Para su dosificación de estos productos se pueden preparar soluciones madre con una

concentración de hasta un 0,5% a través de una unidad de preparación automatizada o por lotes. Las soluciones se deben dejar añejar unos 30 a 60 min para lograr la máxima eficacia. Se debe utilizar agua de alta calidad. El agua de la dilución secundaria debe añadirse a la solución madre justo antes de preparar, en una proporción al menos 10:1. Se deben evitar bombas centrífugas en la transferencia de polímeros. Por lo general, requieren solo un tiempo de contacto entre 30 y 60 min y se usan dosis pequeñas (máximo 1 mg/l).

Estos productos se distribuyen en sacos de 25, 500, 750 o 1000 kg; y son resistentes a la humedad.

### 2.3. Marco referencial del proyecto

#### 2.3.1. Ubicación del proyecto.

La Unidad Minera Operativa Halcón de Oro, perteneciente a la Cooperativa Minera Halcón de Oro de Ananea Ltda., dueño de la concesión minera San Antonio – María el cual abarca un área de 430 has; se encuentra ubicado en paraje denominado Vizcachani - Mosoj Minas del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, región de Puno, aproximadamente a 90 km al noreste del lago Titicaca, entre las coordenadas centrales: este 443,387 y norte 8°37'023; a una altitud comprendida entre 4,600 y 4,900 msnm. Véase la figura de la ubicación geográfica en el anexo N° 02.

#### 2.3.2. Accesibilidad.

La Unidad Operativa Minera Halcón de Oro es accesible mediante la red vial nacional 34H la cual se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 2.2.** Acceso por tramos al proyecto.

<b>Tramos (Puno – Mina)</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Vía (terrestre)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Condición</b>
<b>Puno - Juliaca</b>	45	Asfaltada	00h 40 min.	Buena
<b>Juliaca - Desvío Huancané</b>	50	Asfaltada	00h 45 min.	Buena
<b>Desvío Huancané – Putina</b>	40	Asfaltada	00h 45 min.	Buena
<b>Putina – Ananea</b>	60	Asfaltada- Afirmada	01h 10 min.	Regular
<b>Ananea – U. O. Halcón de Oro</b>	3	Tratada	10 min	Regular
<b>Total:</b>	198		03h 30 min.	

Fuente: IGAC 2014, Proyecto San Antonio – María

#### 2.3.3. Geología local y económica del yacimiento.

**Geología local:** Ananea se encuentra dentro de una subunidad morfoestructural deno

minada depresión de Crucero-Ananea, la cual forma parte de la unidad morfoestructural del altiplano y se encuentra ubicada entre la cordillera oriental y la pre-cordillera de Carabaya. La depresión se originó por un juego de fallas longitudinales de rumbo noroeste, de edad post Miocénica; las cuales fueron posteriormente rellenadas por depósitos glaciares, fluvioglaciares, aluvionales y fluviales.

Localmente el área de influencia comprende las siguientes unidades litoestratigráficas: Formación Ananea (SD-a), Grupo Tarma (P-ta) y Formación Arco-Aja. (Q-aj).

**Geología económica:** El depósito tipo morrénico glacial de la concesión San Antonio - María, se originó a partir de la cordillera Oriental las cuales se encuentran localizadas en el flanco norte del valle de Carabaya. Este yacimiento morrénico posee tenores de oro mayores de mínimos y máximos oscilan entre 0,15 y 0,30 g/m<sup>3</sup> en varios lugares (morrenas Vizcachani). Los espesores de los depósitos glaciares varían de algunos metros a más de 100 m. La mayor parte de ellos tienen potencias promedio de 50 m.

Asimismo, el yacimiento tiene un potencial de oro con una ley promedio de 0,225 g/m<sup>3</sup> de Au con un estimado un total de 199 057 864.00 m<sup>3</sup> de material con contenido aurífero y una ley de corte de 0,171 g-Au/m<sup>3</sup>,

#### **2.3.4. Mineralización del depósito tipo morrénico.**

**Emplazamiento del oro:** La mineralización aurífera consiste en grano de oro nativo libre, con una pureza promedio de 92.4 % (denominados localmente charpas) y en oro contenido en bloques y cantos rodados de cuarzo aurífero, ambos dispersos en forma totalmente irregular y aleatoria en toda la masa aglomerada de las morrenas. Hasta el momento no se ha encontrado alguna estructura o lineamiento de control de la distribución de oro, ni un área de influencia para el muestreo.

La forma de los granos de oro es irregular achatada, con bordes ganchudos, y su eje principal es 5 a 10 veces mayor que el eje menor, existen formas muy similares a las de oro primario de los filones auríferos de la formación Ananea. La granulometría del oro varía de 0,1 mm a 2,6 cm; sin embargo, el 85% del mismo está comprendido entre 0,2 y 4 mm y solo una pequeña proporción (1%) sobrepasa los 4 mm.

**Control mineralógico:** En el muestreo de diversas áreas de yacimiento, se ha determinado la presencia de los siguientes minerales: clastos pesados de pizarra con altos contenidos de hierro, hematita y casiterita que no son muy abundantes. Como minerales accesorios lo cuales no siempre presentes se tiene: al cuarzo, pirita, arsenopirita, wolframita, marcasita, circón, berilio; y muy raramente plata nativa y estibina.

Los sulfuros son abundantes solo en ciertos sectores de concentración fluvial (placeres), que son denominados veneros por los mineros de la región. En la base de algunos lentes de grava arenosa existen concentraciones de sulfuros y obviamente oro. Los primeros dan una coloración característica a la base del banco (oxidación parcial de los sulfuros), que permite su fácil reconocimiento, por otro lado la oxidación total de la pirita en estos veneros liberaría el oro, lo que incrementa el tenor de oro recuperable de dichos placeres.

### 2.3.5. Las operaciones de minado.

La Unidad Operativa Minera Halcón de Oro en su concesión minera San Antonio – María, extrae el oro del yacimiento tipo morrénico por el método a tajo abierto – tipo terraza. Minándose 600 m<sup>3</sup>/día; 10 800 m<sup>3</sup>/mes y 157 320 m<sup>3</sup>/año, con una ley promedio de 0,25 g/m<sup>3</sup> y una ley de corte de 0,22 g/m<sup>3</sup>.

La operación se realiza en la cantera San Antonio – María que tiene una altura máxima de banco de 20 m, un ancho de berma de 8,50 m, un ángulo de talud de banco de 65° - 70°, y un ángulo overall de 48° a 51°.

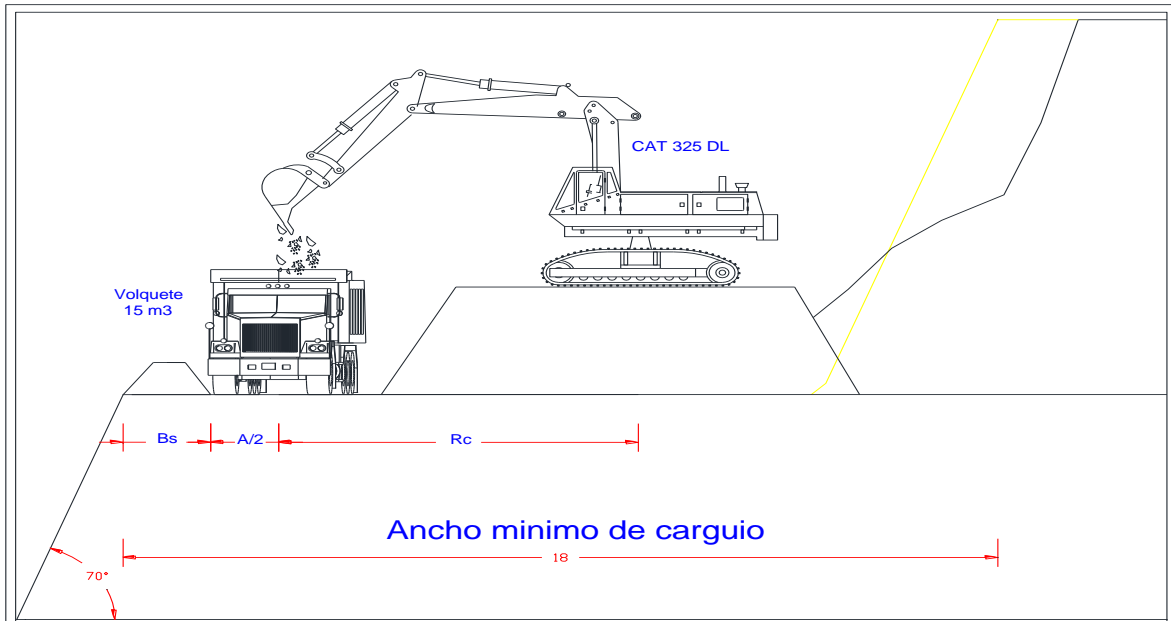
El proceso de minado en la cantera San Antonio – María se detalla a continuación:

**Desbroce y arranque:** Esta es la primera operación unitaria llevada a cabo en la cantera San Antonio – María, el cual consiste en arrancar el material, tanto mineral y desmonte, aprovechando el material morrénico de muy poca dureza para poder proceder con el carguío del mineral.

**Carguío del mineral:** Esta operación se realiza con un excavadora CAT 325 DL de una capacidad de cuchara 1,4 m<sup>3</sup> y un rendimiento promedio de 57,43 m<sup>3</sup>/hr. La operación de carguío comprende perfilado de los taludes, arrancar el material morrénico, realizar la maniobra de giro y cargar al camión volquete. Véase la figura 2.11.

**Transporte:** Esta operación se realiza con tres camiones volquete de 15 m<sup>3</sup>, los cuales recorren una distancia promedio de 1,2 km desde la cantera San Antonio – María hasta los pilas de mineral. Ver ANEXO N° 03 - A.

**Servicios auxiliares:** Esta operación se realiza con dos cargadores frontales de 3,5 m<sup>3</sup> de capacidad y un camión volquete de 15 m<sup>3</sup>. Asimismo, los servicios auxiliares se dividen en dos faenas: la faena 1 – alimentación donde el cargador se utiliza para alimentar la tolva del mineral en un primer lavado, también para el relavado del mineral en una segunda tolva. Ver Anexo N° 03 - A. y la faena 2 – limpieza donde el cargador se utiliza limpieza del desarenado, asimismo para la disposición del desmonte en un botadero acondiciona en conjunción con el volquete. Véase la figura 2.12.

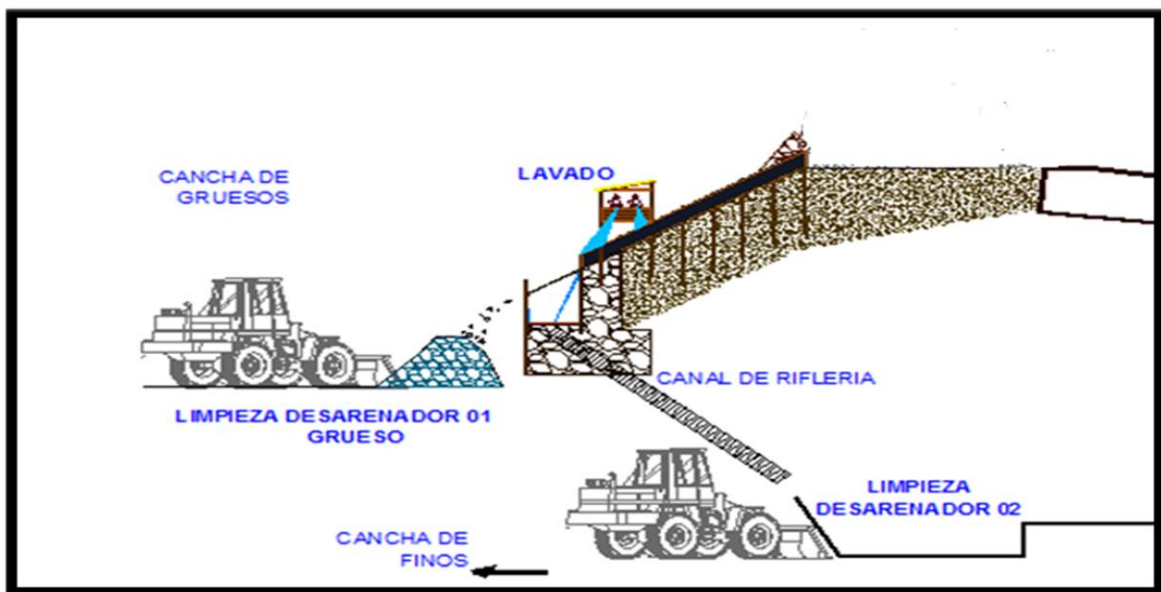


**Figura 2.11.** Vista de la operación de carguío del material morrénico.

Fuente: Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo, P.M. San Antonio - María.

**2.3.6. El proceso de beneficio del mineral.**

Para recuperar el oro morrénico, la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro en su concesión minera San Antonio – María, utiliza el proceso de concentración gravimétrica para recuperar en oro. El sistema del proceso de beneficio se puede visualizar en el anexo N° 03. Del mismo modo, el flujo de operaciones de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro se puede visualizar en el anexo N° 04.



**Figura 2.12.** Vista de la limpieza del desarenador.

Fuente: Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo, P.M. San Antonio - María.

## **2.4. Formulación de la hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general.**

El uso de poliacrilamida aniónica como floculante sedimenta el nivel de la turbidez y clarifica las aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

### **2.4.2. Hipótesis específicas.**

Una dosis óptima de poliacrilamida aniónica sedimenta la turbidez y clarifica las aguas las aguas residuales de relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

El porcentaje de sedimentación de la turbidez y el porcentaje de clarificación de las aguas residuales de relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro es buena usando la dosis óptima de poliacrilamida aniónica.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Diseño metodológico

##### 3.1.1. Tipo de investigación.

La investigación que se realizó es de tipo analítico y explicativo, porque el objetivo planteado indica evaluar el proceso de sedimentación. Es analítico, pues se hizo pruebas con el floculante poliacrilamida aniónica para determinar la dosis optima en el tratamiento de las aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro por medio de la sedimentación de la turbidez. Es explicativo, pues habiendo determinado la dosis se explica la efectividad que tiene el floculante en remoción de la turbidez y la clarificación de las aguas residuales – industriales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

##### 3.1.2. Alcance.

De acuerdo a sus resultados, el alcance de esta investigación es correlacional, pues se midió los efectos del uso del floculante poliacrilamida aniónica (causa) sobre la clarificación de las aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro (efecto).

##### 3.1.3. Diseño de la investigación.

El diseño de esta investigación es cuasi experimental, porque a través de las hipótesis, primero se determinó la dosis optima del floculante poliacrilamida aniónica mediante el procedimiento de prueba de jarras (*jar- test*) en el laboratorio de la FIM, esto se hace con la finalidad de lograr normalizar una sedimentación de las aguas residuales en el menor tiempo y con una dosis que minimice la cantidad en uso de poliacrilamida aniónica y su respectivo costo. Segundo, se analizó los resultados obtenidos midiendo la sedimentación de la turbidez (NTU) en el proceso de clarificación de aguas por medio de la sedimentación con

floculación. Esto determinó la eficacia en el tratamiento de las aguas residuales en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro.

### 3.2. Población y muestra

#### 3.2.1. La Población.

La población de este estudio de investigación es el circuito de pozas del tratamiento de aguas residuales de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro. La población involucra en específico de la zona de clarificación de aguas, es decir, el segundo proceso de tratamiento en donde se tiene lugar a la coagulación y floculación para la sedimentación de las partículas en suspensión.

El circuito de pozas en la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro tiene una capacidad de 18 200 m<sup>3</sup> y el flujo del proceso de tratamiento se puede ver en el anexo N° 05.

#### 3.2.2. Las muestras.

Las muestras seleccionadas para realizar las pruebas con el floculante poliacrilamida aniónica, fueron seleccionadas en temporada seca, en los meses abril y mayo del 2018. Estas muestras tuvieron un intervalo de 15 días, recogándose 10 muestras en total, esto es: 3 tomas para la Muestra 1, 3 tomas para la Muestra 2, y 4 tomas para la Muestra 3. Cada toma se hizo en baldes de 18 litros, lo cual, teniendo en cuenta las tres muestras tomadas, estas suman un total de 0,18 m<sup>3</sup> que representa un 0,0009% de la población. Véase a continuación las características promedio de cada muestra:

**Tabla 3.1.** Muestra 1 en el mes de abril.

N° Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-1	13-abr-18	9 470	0,43	8,46	12,4 (*)
	Categoría	Medio	Bajo	Alta alcalinidad	Ambiente

Fuente: Proyecto San Antonio – María.

En la tabla 3.1, se puede ver el promedio de la turbidez, ppt, pH y temperatura que se determinaron en el laboratorio de Monitoreo Ambiental del Facultad de Ingeniería de Minas para la Muestra 1 (M-1) de las 4 tomas realizadas el 13 de abril, mientras que, el detalle de medición de cada toma para la muestra 1 se puede ver en el anexo N° 06-A.

**Tabla 3.2.** Muestra 2 en el mes de mayo.

N° Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-2	04-may-18	13 500	0,53	8,56	12,6 (*)
	Categoría	Alto	Alto	Alta alcalinidad	Ambiente

Fuente: Proyecto San Antonio – María.

En la tabla 3.2, se puede ver el promedio de la turbidez, ppt, pH y temperatura que se determinaron para la Muestra 2 (M-2) de las 4 tomas realizadas el 4 de mayo, mientras que, el detalle de medición de cada toma para la Muestra 2 se puede ver en el anexo N° 06-B.

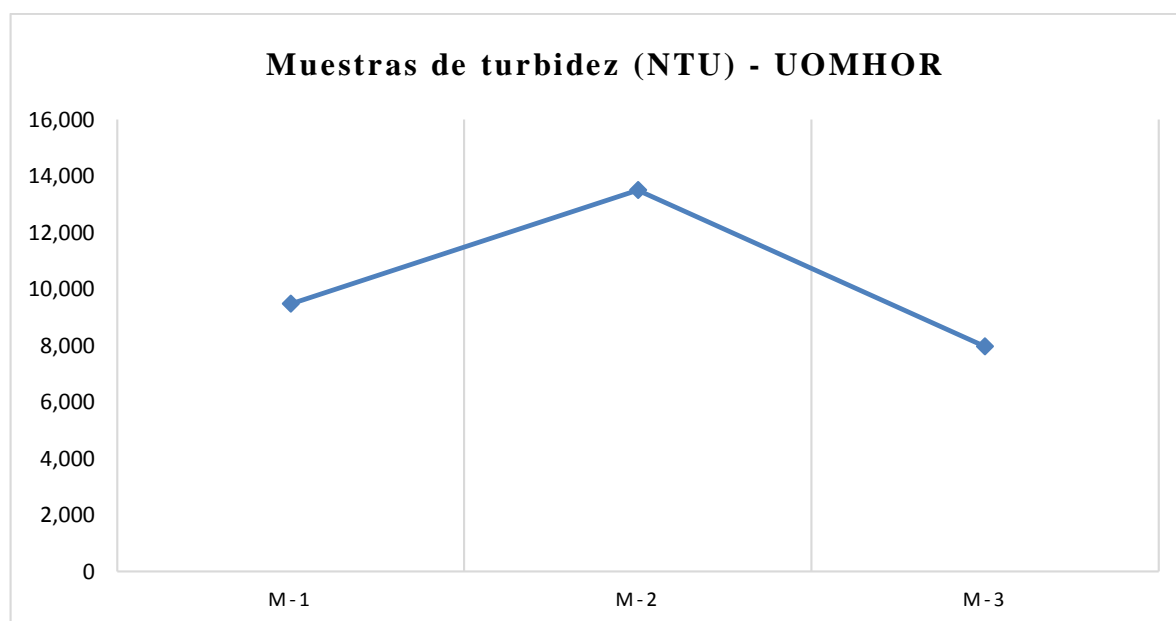
**Tabla 3.3.** Muestra 3 en el mes de mayo.

N° Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-3	17-may-18	7 960	0,36	9,62	12,8 (*)
	Categoría	Bajo	Bajo	Alta alcalinidad	Ambiente

Fuente: Proyecto San Antonio – María.

En la tabla 3.3, se puede ver el promedio de la turbidez, ppt, pH y temperatura que se determinaron para la Muestra 3 (M-3) de las 4 tomas realizadas el 17 de mayo, mientras que, el detalle de medición de cada toma para la Muestra 3 se puede ver en el anexo N° 06-C.

Asimismo, como se puede apreciar en las tablas 3.1 hasta 3.3, la turbidez y la concentración de solidos totales varían para cada muestra aun en temporada seca. Esto se debería a la variabilidad de la geología de material morrénico, con lo que ya se puede concluir que no solo debe existir una dosis optima así como refiere Tejada (2017), sino que la dosis óptima es variable de acuerdo para cada muestra y que debe ser seleccionado por un curva de comportamiento según refiere Oré (2014). Véase el comportamiento de la turbidez en la siguiente figura:



**Figura 3.1.** Vista de la variabilidad de la turbidez de cada muestra.

Fuente: Proyecto San Antonio – María.

### 3.3. Técnicas y procedimientos para la recolección de datos

Las técnicas, procedimiento y protocolos para la prueba de jarras, la determinación de la dosis óptima del floculante poliacrilamida aniónica, la determinación del pH, de la temperatura, la medición de los sólidos totales en suspensión y la turbidez se detallan a continuación:

#### 3.3.1. La prueba de jarras (jar – test).

La prueba de jarras simula a pequeña escala los procesos de coagulación y floculación con la finalidad de obtener la dosis óptima para luego llevarla a la planta de tratamiento a gran escala. Este método permite realizar variaciones en las dosis del floculante así como las velocidades de mezclado, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento a gran escala de tratamiento.

**El equipo para la prueba de jarras:** El equipo para la prueba de jarras solo puede operar con un solo vaso a la vez. El principio que utiliza este equipo para realizar el mezclado de las muestras con el floculante, es el giro electromagnético el cual se da con una base circular metálico que hace de base para el vaso con un mezclador cilíndrico (imantado) que mantiene su posición y proporciona el mezclado. Para medir la gradiente de velocidad (RPM), el equipo tiene una perilla con el cual se puede controlar los RPMs del mezclado. Véase la siguiente figura:



**Figura 3.2.** Vista del equipo Velp Científica para la prueba de jarras.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

**Procedimiento:** Se llena con la muestra de agua cruda en cada vaso precipitado de 500 ml. Un contenedor de 1000 ml se utilizara como control, mientras que otros 6 vasos se realizaran las pruebas, en seguida se coloca el vaso en la base del equipo conjuntamente con el agitador cilíndrico. Este último debe estar dentro del vaso. Luego se enciende el equipo y

se inicia el agitado a 300 RPM. Después se agrega la dosis del floculante con una pipeta al vaso y se agita por un tiempo de 1 min y por último se apaga el equipo, y retira el agitador cilíndrico del vaso. Finalmente se anota el tiempo de inicio de la sedimentación y espera por 30 min para luego medir la turbidez, los sólidos totales, el pH, y el total de agua clarificada.

**Limitaciones:** La principal limitación que tuvo en esta prueba de jarras, es el uso de un solo vaso a diferencia de otros equipos especializados que tienen de 4 a 6 vasos simultáneos. Esto hizo que el consumo de tiempo en la pruebas sea grande y que haya habido por lo menos 2 asistentes para la medición de los otros parámetros.

### 3.3.2. Determinación de la turbidez.

La turbidez es un indicador de la calidad del agua y es uno de los indicadores base de este estudio de investigación.

**Objetivo del análisis:** Determinar la turbidez (NTU) de las tres muestras de análisis para distintas concentraciones de poliacrilamida aniónica.

#### **Equipos y materiales.**

En este proceso se usaron los siguientes materiales:

Turbidímetro.

Frascos de medición.

Probetas de 10 ml.

Pipetas de 5 ml y 10 ml.

Papel de secado.

Frasco para el agua destilada.

#### **Reactivos.**

Los reactivos usados en este proceso son:

Agua destilada: Usada para el lavado de los frascos de medición del Turbidímetro.

Agua sedimentada: Extraída de cada vaso precipitado.

**Procedimiento:** Se lava los frascos de medición con agua destilada. Luego de ello se seca cada frasco de medición con papel de secado. Después se extrae con un pipeta de 10 ml, cuidadosamente, una muestra del vaso donde se encuentra la reacción de sedimentación con poliacrilamida aniónica para verter la muestra sobre el frasco de medición hasta la marca de 10 ml con la pipeta. Secar nuevamente la muestra y finalmente se enciende el turbidímetro. Luego se coloca el frasco de medición en la posición indicada por el turbidímetro. Después se procede a realizar la lectura de la turbidez presionando el botón “READ/ENTER” anotando el valor mostrado.

**Turbidímetro:** Es un equipo para medir la turbidez es muy simple y fácil de utilizar de marca y modelo Wag-WT3020. Se compone de las secciones: posición de muestra, pantalla y botones de mando. Véase la figura 3.4:

### 3.3.3. Determinación de la temperatura, potencial de hidrogeno y la concentración de sólidos.

Los indicadores como temperatura, pH y la concentración de solidos se midieron en un mismo proceso y con un mismo equipo.

**Objetivo del análisis:** Determinar la temperatura (°C), el potencial de hidrogeno (pH) y la concentración de sólidos (ppt) para distintas concentraciones de poliacrilamida aniónica.



**Figura 3.3.** Vista del equipo Wagtech – WT3020 para medir la turbidez.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

#### **Equipos y materiales.**

En este proceso se usaron los siguientes materiales:

Multi-paramétrico.

Vasos precipitados de 500 ml.

Frasco para el agua destilada.

#### **Reactivos.**

Los reactivos usados en este proceso son:

Agua destilada: Usada para el lavado del electrodo de medición.

Agua sedimentada: Las cuales permanecen en los vasos.

**Procedimiento:** Se lava el electrodo de medición del multi-paramétrico y luego se seca el electrodo. En seguida se coloca el multi-paramétrico dentro del vaso donde se hace el procedimiento de sedimentación hasta el límite del electrodo. Cabe mencionar que esta medición se hace después de determinación de la turbidez y final mente se enciende el equipo y se procede a medir cada parámetro. Para pasar de un parámetro a otro se debe presionar el botón “Change” anotando los valores medidos.

**Multi-Paramétrico:** Es un equipo muy versátil que puede medir varios parámetros del agua, entre ellos la temperatura, el pH y la concentración de sólidos (ppt). Se compone de dos secciones: Sección de mando – lectura, y la sección del electrodo. Véase la siguiente figura:



**Figura 3.4.** Vista del equipo Combo pH & EC para medir la temperatura, pH y SST.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

#### 3.3.4. Dosis de la poliacrilamida aniónica:

Para poder medir la eficacia de la poliacrilamida aniónica en el proceso de sedimentación, se dosificaron las dosis pesándose estas en un balanza de 0.1 mg de precisión.

##### **Objetivo del análisis.**

Determinar las dosis de la poliacrilamida aniónica tanto en proceso de adsorción y barrido.

**Equipos y materiales.**

En este proceso se usaron los siguientes materiales:

La balanza.

Papeles de contención de muestras.

Cuchara dosificadora.

Vasos precipitados de 100 ml.

Agitadores.

**Reactivos.**

Los reactivos usados en este proceso son:

Poliacrilamida aniónica: Que se tiene una muestra de 10 kg.

Agua destilada: Que se usa para lavar los vasos y para mezclar el floculante.

**Procedimiento:** Se enciende la balanza que tiene una precisión de 0.1 mg. Luego se tara el papel de contención dentro de la balanza. Seguidamente se introduce una cantidad determinada de la poliacrilamida aniónica con la cuchara dosificadora. Esta muestra debe estar dentro de la dosificación planeada. Una vez pesado la muestra, este se vierte sobre el vaso de 100 ml, luego se agrega agua destilada para agitar la muestra. Se debe agitar la muestra hasta que se haya disuelto en su totalidad la poliacrilamida aniónica. Esto se puede medir cuando el agua se vuelve gelatinosa.

**Dosificación:** En la pre-prueba se ha tenido dosificación de 0,1 g y 0,5 g. Para las pruebas en sedimentación por adsorción se dosificó en: 0,002; 0,005; 0,01; 0,013; 0,017; 0,022 gramos de poliacrilamida aniónica. En resumen, para la dosificación se utilizó concentraciones de poliacrilamida aniónica de 0,002% hasta 0,5%.

**Los equipos en general:** La balanza a precisión de 0,1 mg ha sido fundamental para la dosificación. Véase la figura 3.6.

Por otro lado, el uso de la poliacrilamida ha sido mínimo ya que al ser un polímero hidrolizado su acción en la sedimentación es mejor a bajas concentraciones. Véase la figura 3.7.

Otro material importante fue cada vaso precipitado en donde se preparó las distintas concentraciones de la poliacrilamida aniónica. Véase las figuras 3.8. y 3.9.





**Figura 3.5.** Vista de la balanza SHS HR-250A.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.



**Figura 3.6.** Vista de la poliacrilamida aniónica.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.



**Figura 3.7.** Vista del vaso precipitado N° 6 con 20 mg de PA.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

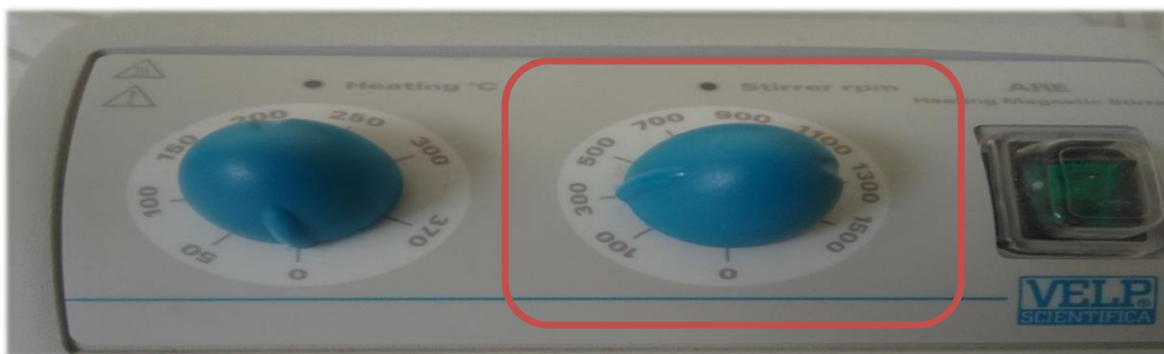


**Figura 3.8.** Vista de cada vaso con la poliacrilamida aniónica diluida en 100 ml.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

### 3.3.5. Gradiente y tiempo óptimo de la coagulación – floculación.

La dispersión de la poliacrilamida aniónica diluida dentro de cada muestra ha sido un factor importante cuando la sedimentación se hizo por adsorción. Para este proceso el tiempo de mezcla rápida fue a una velocidad de 300 RPM en un tiempo de 1 min. Mientras que, la sedimentación por barrido, la velocidad y el tiempo no fueron influyente en la acción de la poliacrilamida aniónica, ya que la sedimentación se presentaba casi inmediatamente después de agregar la poliacrilamida aniónica diluida.



**Figura 3.9.** Perilla de regulación del RPM del equipo VELP SC.

Fuente: Departamento de Monitoreo Ambiental - FIM.

### 3.3.6. Velocidad de sedimentación.

Para medir este parámetro, se tuvo en cuenta tanto la turbidez como la cantidad de agua clarificada. En la sedimentación por adsorción, se comparó cada valor para determinar el valor óptimo en concentración y dosis de la poliacrilamida aniónica midiendo la velocidad de sedimentación en cuanto a turbidez y agua clarificada; cabe mencionar que el tiempo de medida fue los 30 min. En la sedimentación por barrido, el tiempo de acción es inmediata, teniéndose a los 10 min derivación de datos, es decir, los valores ya no varían.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Determinando la dosis óptima de poliacrilamida aniónica para el tratamiento del proceso de sedimentación de las aguas residuales de la unidad operativa minera Halcón de Oro

Para determinar la dosis óptima de la poliacrilamida aniónica, como primer objetivo específico de esta investigación, se realizó una pre-prueba y un post prueba con lo cual se fijó una determinada concentración de poliacrilamida aniónica diluida en 100 ml. Cabe señalar que hubo fracasos en las pre pruebas, no obstante, se detallara la pre prueba con el que se tuvo éxito y también la post prueba para medir la variabilidad de la concentración de poliacrilamida aniónica para una variabilidad de NTU.

##### 4.1.1. La pre-prueba.

Esta pre-prueba se realizó con la muestra 1 que se detalla en la tabla 3.1, para ello se pesaron distintas cantidades de la poliacrilamida aniónica las cuales se iban a diluir en una cantidad igual a 100 ml de agua. Estas cantidades fueron: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5 gramos que dieron concentraciones diluidas de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% y 0,5% de poliacrilamida aniónica.

Muestra 1 en el mes de abril copiada de la tabla 3.1. Muestra 1 en el mes de abril.

Nº Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-1	13-abr-18	9,470	0,43	8,46	12,4
	Categoría	Medio	Bajo	Alta alcalinidad	Ambiente

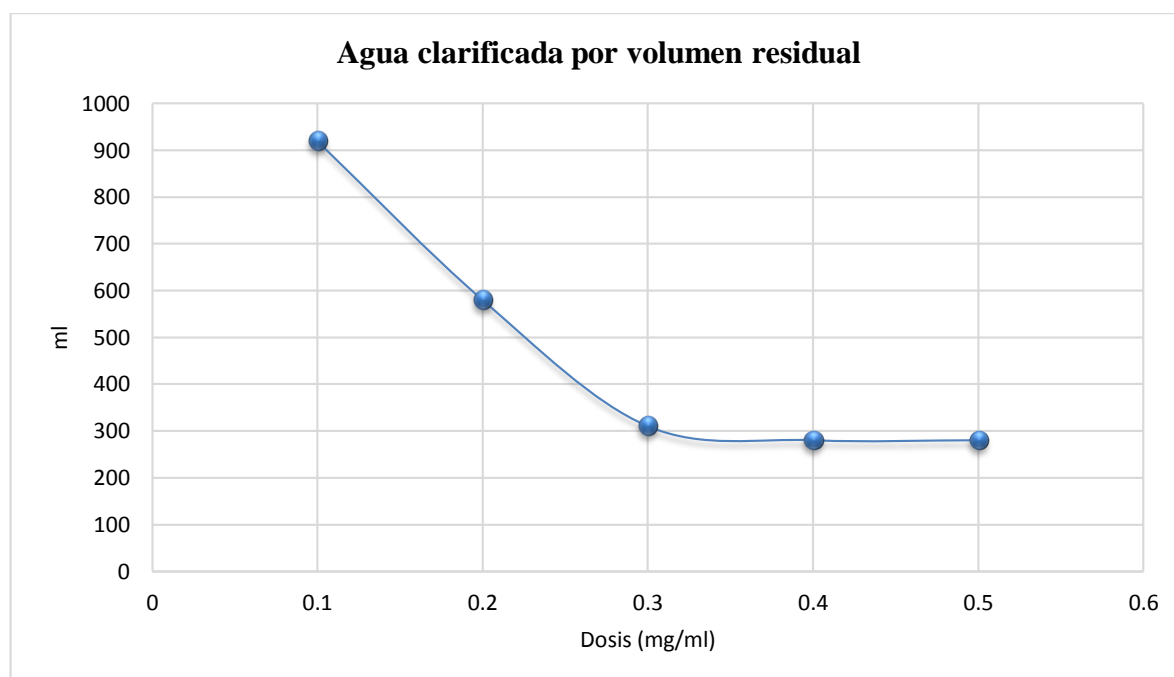
En esta pre-prueba se midió únicamente la clarificación del agua cruda de la muestra 1, las cuales se depositaron en vasos precipitados de 1 000 ml para agregar luego dosis diluidas de 10 ml de cada muestra (jarra). Los resultados en cuanto a clarificación se pueden ver a continuación:

**Tabla 4.1.** Clarificación del agua de la muestra 1 en 30 min.

Poliacrilamida aniónica por clarificación del agua en volumen (ml)						
N° de Jarra	Dosis-M (ml)	Dosis (g/ml)	ml	pH	Temp (°C)	
1	10	0,1	920	8,46	13,8	
2	10	0,2	580	8,46	13,7	
3	10	0,3	310	8,46	13,5	
4	10	0,4	280 (*)	8,46	13,9	
5	10	0,5	280 (*)	8,46	13,4	

De acuerdo a la tabla 4.1, la mejor clarificación del agua agregando una dosis de 10 ml de cada jarra en 30 min ha sido con una dosis de 0,4 g/ml y 0,5 g/ml sedimentándose en los 280 ml del vaso precipitado, manteniéndose así partir de la dosis de 0,5 g/ml en adelante, es decir, sin cambio alguno. Cabe recalcar que tanto en la jarra 4 y 5 los resultados obtenidos son menores a 5 min. Asimismo, el pH y la temperatura no sufren cambios relevantes.

Véase el comportamiento de esta sedimentación en la siguiente figura:



**Figura 4.1.** Comportamiento de la clarificación del agua de la muestra 1.

De acuerdo al comportamiento de la sedimentación de cada dosis de la poliacrilamida aniónica diluida en 100 ml que se ve en la figura 4.1; la dosis óptima – relativa seleccionada es 0,4 g por tener menor cantidad de poliacrilamida aniónica, es decir, a una concentración de 0,4%, la cual se dosificada a 10 ml en el vaso precipitado de 1 000 ml, generando una

concentración real de 0,04 g de poliacrilamida aniónica. Es importante mencionar que a menor cantidad usada de poliacrilamida aniónica menor será su costo. Es por ello que se selecciona la concentración de 0,4% de poliacrilamida aniónica.

#### 4.1.2. La post prueba.

La post prueba deriva de la pre-prueba que se realizó con la muestra 1 que de acuerdo a su NTU se considera como turbiedad media. Ahora, según la tabla 4.1, la concentración de 0,3% no genera tan malos resultados, es por ello que, para la post prueba se analizó en la muestra 3, la cual tiene menor cantidad de turbiedad. Entonces para la post prueba, se pesaron distintas cantidades inferiores a 0,3 g de poliacrilamida aniónica las cuales se iban a diluir en una cantidad de agua igual a 100 ml. Estas cantidades fueron: 2, 5, 9, 12, 15 y 20 mg que dieron concentraciones diluidas de 2%, 5%, 9%, 12%, 15% y 20% de poliacrilamida aniónica.

Muestra 3 en el mes de mayo copiado de la tabla 3.3. Muestra 3 en el mes de mayo.

Nº Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-3	17-may-18	7 960	0,36	9,62	12,8
	Categoría	Bajo	Bajo	Alta alcalinidad	Ambiente

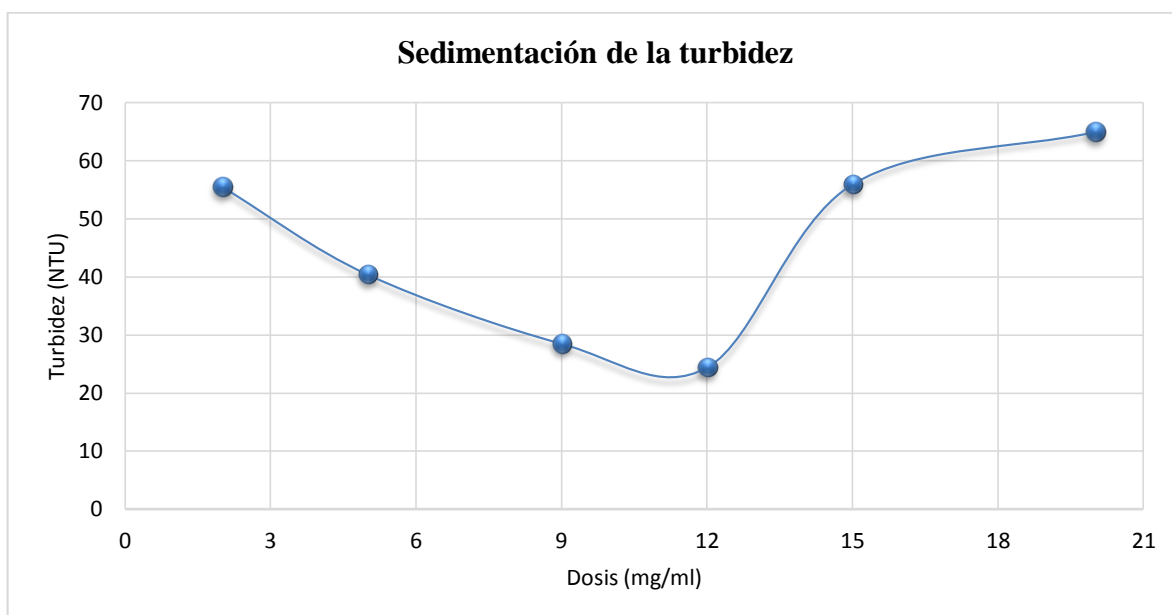
En esta post prueba se midió tanto la turbiedad como la clarificación del agua cruda de la muestra 3, las cuales se depositaron en vasos precipitados de 500 ml para agregar luego dosis diluidas de 5 ml de cada muestra (jarra). Los resultados en cuanto a turbiedad y clarificación se pueden ver a continuación:

**Tabla 4.2.** La turbiedad y la clarificación del agua de la muestra 3 en 30 min.

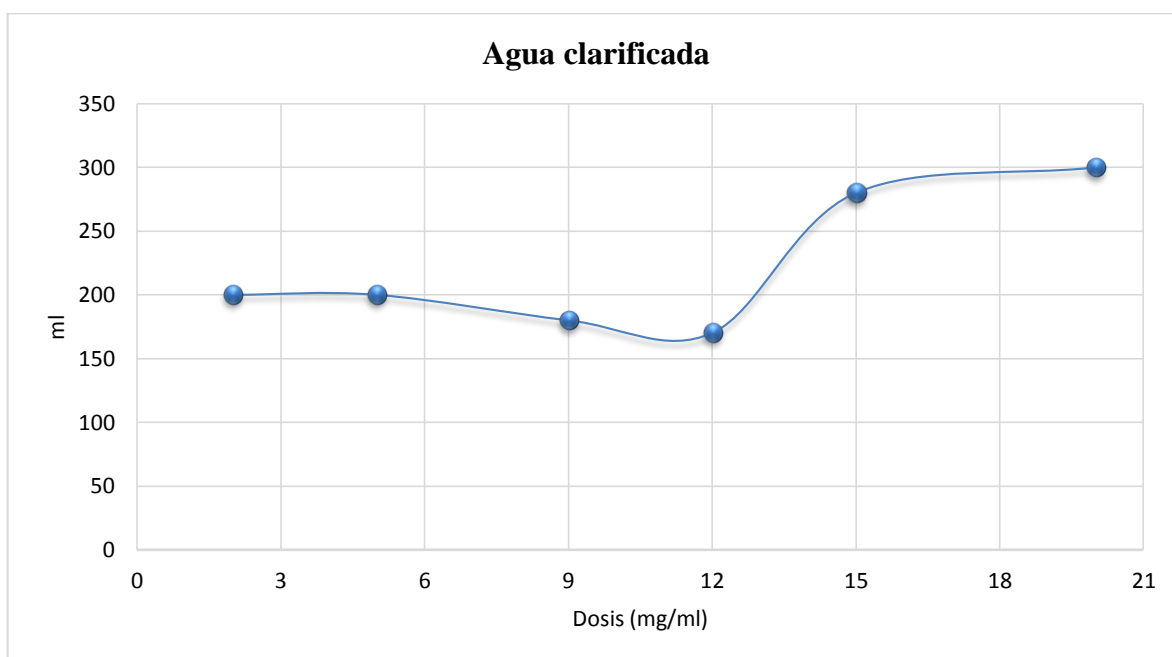
Poliacrilamida aniónica por Turbiedad (NTU) y Clarificación del agua							
Nº de Jarra	Dosis-M (ml)	Dosis (mg/ml)	NTU	ml-r	pH	Temp (°C)	
1	5	2	55,5	200	9,75	13,9	
2	5	5	40,4	200	9,63	13,8	
3	5	9	28,5	180	10,26	14,3	
4	5	12	24,4	170	10,14	14,1	
5	5	15	55,9	280	10,15	13,8	
6	5	20	64,9	300	10,13	14,2	

De acuerdo a la tabla 4.2, la menor turbiedad se obtiene con una dosis de 12 mg/ml, la cual en 30 min tiene un turbiedad final de 24,4 NTU, asimismo, esta misma dosis tiene la mejor clarificación del agua que en 30 min sedimento hasta 170 ml del vaso precipitado. El pH y la temperatura tampoco sufren cambios relevantes.

Para seleccionar la dosis óptima de poliacrilamida aniónica en la muestra 3 (M-3) se ha tenido en cuenta tanto la turbidez como la clarificación del agua, lo cual se hizo con las siguientes imágenes:



**Figura 4.2.** Comportamiento de la turbidez de la muestra 3.



**Figura 4.3.** Comportamiento de la clarificación del agua de la muestra 3.

Como se puede ver en las figuras 4.2 y 4.3, la dosis de 12 mg/ml tiene la menor turbidez tiene la mejor clarificación del agua.

#### 4.2. Determinando el porcentaje de sedimentación de la turbidez y la consecuente clarificación de las aguas residuales de la unidad operativa minera Halcón de Oro

Habiéndose determinado la dosis óptima relativa en el punto 4.1., en este punto se determinara el porcentaje de sedimentación de la turbidez y el porcentaje de clarificación de las aguas residuales de relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Halcón de Oro usando la dosis óptima relativa de la poliacrilamida aniónica; el cual corresponde como el segundo objetivo específico de esta investigación. Asimismo, se afinara la dosis óptima relativa de la poliacrilamida aniónica variando las dosis diluidas de 10 ml a 30 ml para medir la turbidez final y clarificación del agua cruda o residual. Véase este proceso en los siguientes puntos.

##### 4.2.1. Sedimentación con floculación de la muestra 3.

La muestra 3 también se trabajó en la post prueba con una vaso precipitado de 500 ml en donde se hallaba el agua residual y dosis diluidas de 5 ml, teniéndose concentraciones diluidas de 2%, 5%, 9%, 12%, 15% y 20% de poliacrilamida aniónica. Ya en este punto para determinar el porcentaje de sedimentación de la turbidez y la clarificación del agua, el agua cruda de la muestra 3 se depositaron en vasos precipitados de 1 000 ml para agregar luego dosis diluidas de 10 ml, 15 ml, 20 ml, 25 ml y 30 ml de la jarra que tiene una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica correspondiendo a la dosis de 12 mg/ml. A continuación, véase los resultados en turbidez y clarificación del agua para la muestra 3.

Muestra 3 en el mes de mayo copiado de la tabla 3.3. Muestra 3 en el mes de mayo.

N° Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-3	17-may-18	7 960	0,36	9,62	12,8
	Categoría	Bajo	Bajo	Alta alcalinidad	Ambiente

**Porcentaje de sedimentación de la turbidez:** Para determinar la variación de la turbidez en la sedimentación con floculación se utilizó el proceso de cálculo según Ramalho *et al.* (1993), los cuales se pueden apreciar en las siguientes tablas:

De acuerdo a la tabla 4.3, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, la menor turbidez en 30 min se obtiene con una la dosis diluida al 12% de 15 ml la cual tiene un turbidez final de 61,7 NTU. Véase la tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Variación de la turbidez en la muestra 3 de 5 min a 30 min.

N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis (ml)	Poliacrilamida aniónica - Turbidez del agua (NTU)			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	7 960	469	235	130
2	1,8	15	7 960	393	159	61,7
3	2,4	20	7 960	501	338	82,8
4	3	25	7 960	558	282	76,6
5	3,6	30	7 960	583	314	93,7

**Tabla 4.4.** El porcentaje de turbidez que queda después de los 30 min en cada jarra.

N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	Turbidez que queda (%) $y = (NTU_v/NTU_i) \times 100$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	7 960	5,89%	2,95%	1,63%
2	1,8	15	7 960	4,94%	2,00%	0,78%
3	2,4	20	7 960	6,29%	4,25%	1,04%
4	3	25	7 960	7,01%	3,54%	0,96%
5	3,6	30	7 960	7,32%	3,94%	1,18%

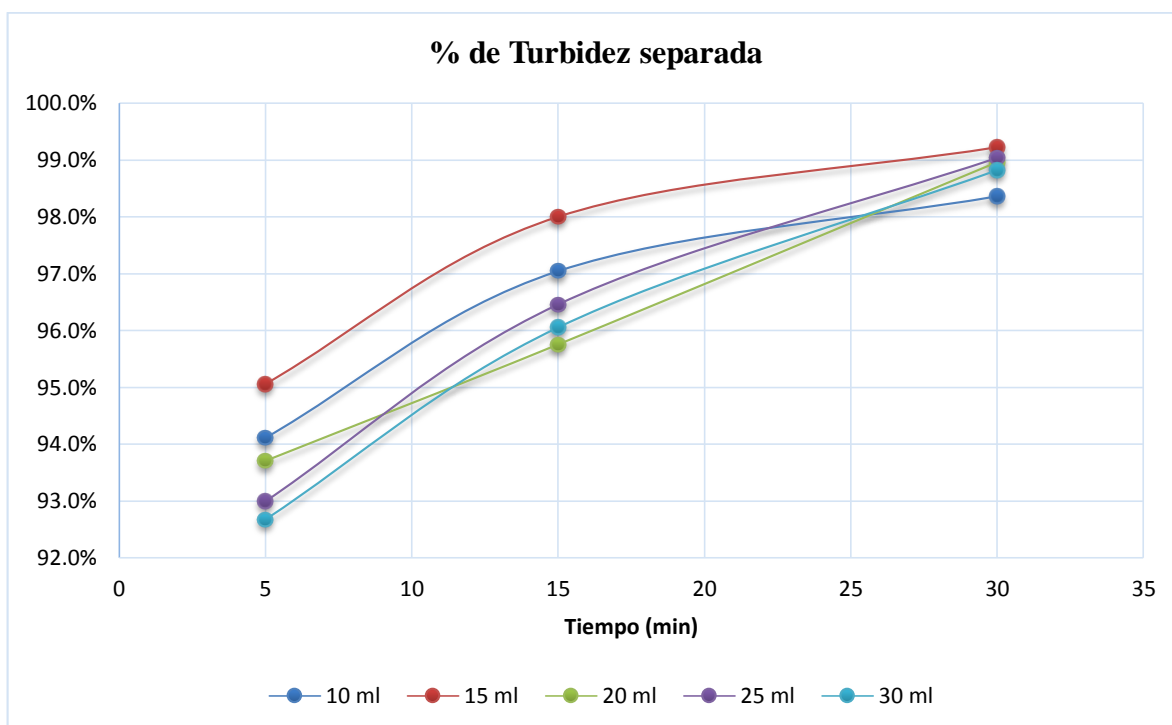
Según la tabla 4.4, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, el menor porcentaje de turbidez que queda después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 12% de 15 ml la cual tiene un porcentaje de turbidez restante final de 0,78%.

**Tabla 4.5.** El porcentaje de turbidez separada después de los 30 min en cada jarra.

N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	Turbidez separada (%) $z = 100 - y$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	7 960	94,1%	97,0%	98,4%
2	1,8	15	7 960	95,1%	98,0%	99,2%
3	2,4	20	7 960	93,7%	95,8%	99,0%
4	3	25	7 960	93,0%	96,5%	99,0%
5	3,6	30	7 960	92,7%	96,1%	98,8%
	Total:		100%			

Conforme a la tabla 4.5, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, el mayor porcentaje de turbidez separada después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 12% de 15 ml, la cual tiene un porcentaje de separación de la turbidez final de 99,2%. Véase el comportamiento para cada dosis diluida en la siguiente figura:





**Figura 4.4.** Variación del porcentaje de separación de la turbidez.

Como se puede apreciar en la figura 4.4, se tiene una variación de porcentaje de separación de la turbidez en un rango de tiempo de 5 a 30 min, donde la dosis de 15 ml tiene el mayor porcentaje de turbidez separada después de 30 min.

En resumen, la selección de la dosis óptima de poliacrilamida aniónica se hizo siguiendo los lineamientos de Oré (2014), que en cuanto a turbidez, se seleccionó el que resulto con menor NTU. Esta selección se puede apreciar en la siguiente tabla y figura a modo de resumen:

**Tabla 4.6.** La turbidez final a los 30 min de cada dosis.

N° de Jarra	Turbidez separada por NTU			pH	Temp (°C)
	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	NTU		
1	1,2	10	130	9,21	15,0
2	1,8	15	61,7	9,3	15,0
3	2,4	20	82,8	9,33	15,0
4	3	25	76,6	9,36	14,9
5	3,6	30	93,7	9,14	15,0

Así como en la post prueba, la muestra 3 que tiene baja turbidez, la dosis diluida de poliacrilamida aniónica requerida es menor, siendo en esta prueba la dosis optima al 12% igual a 15 ml, con la cual se obtiene una turbidez igual 61,7 NTU como se puede ver en la figura 4.5. Esto nos indica que la concentración en peso en cada 100 ml de poliacrilamida aniónica es igual a 1,8 mg. Entonces el ratio de uso por un litro sería:

18 mg de poliacrilamida aniónica → por 1 l de agua en solución

Esta dosis de poliacrilamida aniónica tendría una sedimentación de la turbidez de 99,2%, así como se muestra en la siguiente tabla 4.7. y figura 4.6.

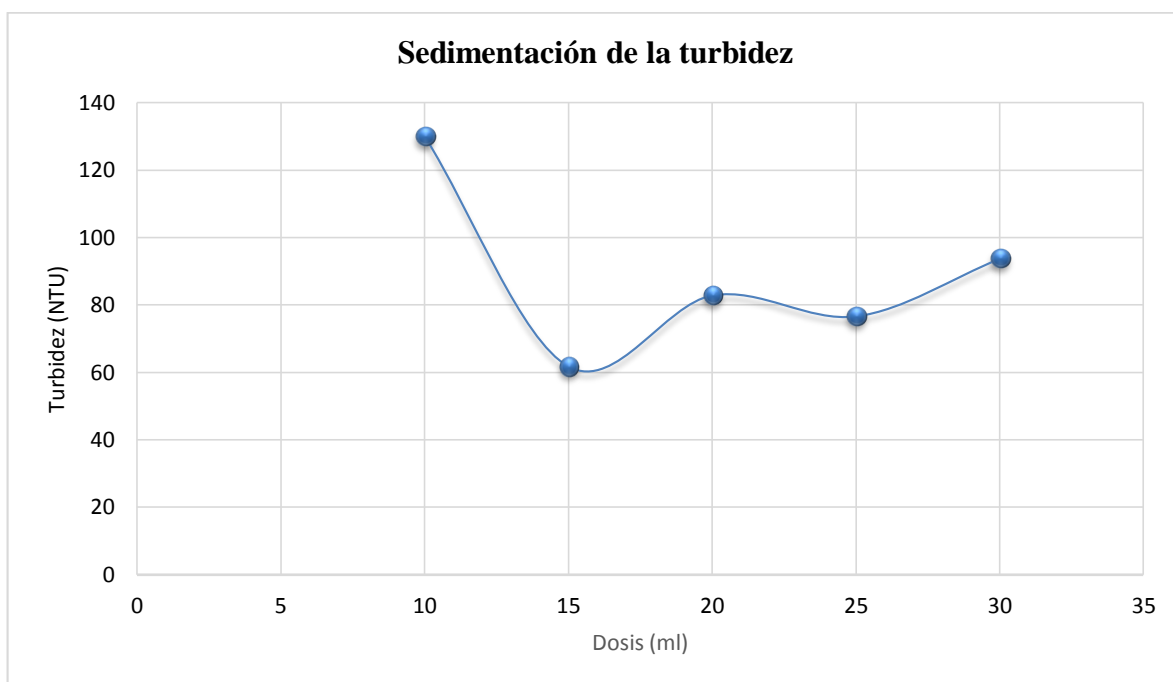


Figura 4.5. Variación de la turbidez después de 30 min.

Tabla 4.7. El porcentaje de la turbidez separada a los 30 min de cada dosis.

N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Turbidez separada por %		pH	Temp (°C)
		Dosis-d (ml)	% separada		
1	1,2	10	98,4%	9,21	15,0
2	1,8	15	99,2%	9,3	15,0
3	2,4	20	99,0%	9,33	15,0
4	3	25	99,0%	9,36	14,9
5	3,6	30	98,8%	9,14	15,0

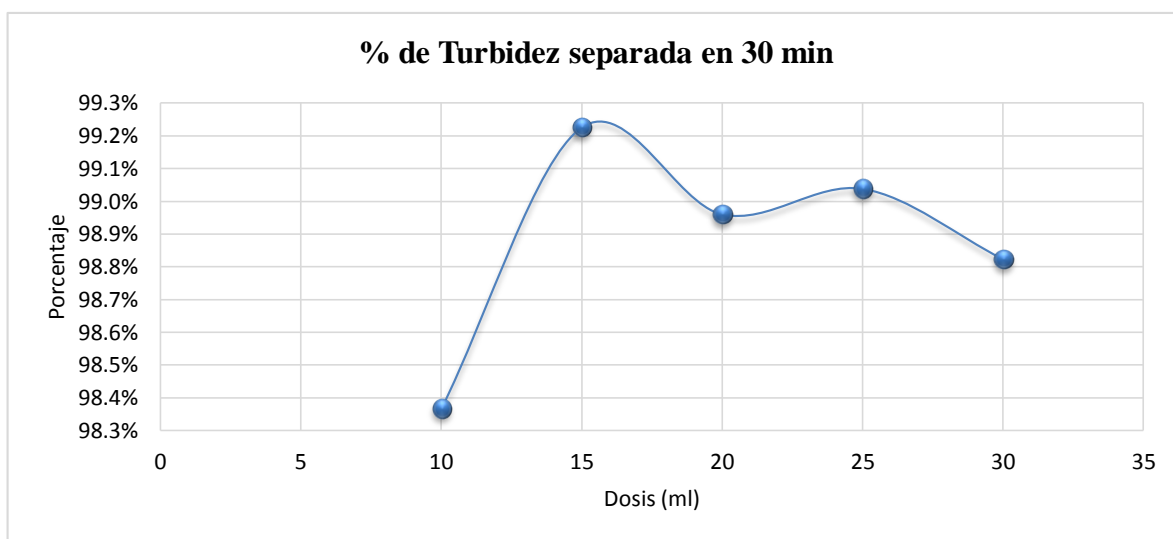


Figura 4.6. Variación del porcentaje de la turbidez separada después de 30 min.

Como se puede apreciar en la figura 4.6, la dosis de 15 ml tiene el mayor porcentaje de turbidez separada después de 30 min, con 99,2%.

Finalmente para acotar, ni el pH ni la temperatura sufren cambios importantes.

#### Porcentaje de la clarificación del agua.

Para determinar la variación de la clarificación del agua en la sedimentación con floculación, también se utilizó el proceso de cálculo según Ramalho *et al.* (1993), las cuales se pueden apreciar en las siguientes tablas:

**Tabla 4.8.** Variación del agua clarificada por volumen residual en la muestra 3.

Poliacrilamida aniónica - Clarificación del agua en volumen (ml)						
N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	1 000	750	480	360
2	1,8	15	1 000	600	400	310
3	2,4	20	1 000	800	670	400
4	3	25	1 000	880	600	410
5	3,6	30	1 000	860	530	460

De acuerdo a la tabla 4.8, se tiene la variación del agua clarificada por volumen residual del vaso precipitado en la muestra 3 en una rango de tiempo de 5 min a 30 min en donde, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, el menor volumen residual de la sedimentación en 30 min se obtiene con una la dosis diluida al 12% de 15 ml la cual tiene un volumen residual en el vaso precipitado en 310 ml.

**Tabla 4.9.** El porcentaje de agua por clarificar después de los 30 min en cada jarra.

Agua por clarificar (%) $y = (Vv/Vi) \times 100$						
N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	1 000	75,0%	48,0%	36,0%
2	1,8	15	1 000	60,0%	40,0%	31,0%
3	2,4	20	1 000	80,0%	67,0%	40,0%
4	3	25	1 000	88,0%	60,0%	41,0%
5	3,6	30	1 000	86,0%	53,0%	46,0%

Según la tabla 4.9, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, el menor porcentaje de agua por clarificar después un ratio de tiempo de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 12% de 15 ml, la cual tiene un porcentaje de agua por clarificar final de 31%.

**Tabla 4.10.** El porcentaje de agua clarificada después de los 30 min en cada jarra.

N° de Jarra	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	Agua clarificada (%) $z = 100 - y$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	1,2	10	1 000	25,0%	52,0%	64,0%
2	1,8	15	1 000	40,0%	60,0%	69,0%
3	2,4	20	1 000	20,0%	33,0%	60,0%
4	3	25	1 000	12,0%	40,0%	59,0%
5	3,6	30	1 000	14,0%	47,0%	54,0%
Total:			100%			

Conforme a la tabla 4.10, para una concentración diluida de 12% de poliacrilamida aniónica, el mayor porcentaje de agua clarificada después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 12% de 15 ml, la cual tiene un porcentaje de agua clarificada final de 69,0%. Véase el comportamiento para cada dosis diluida en la siguiente figura:

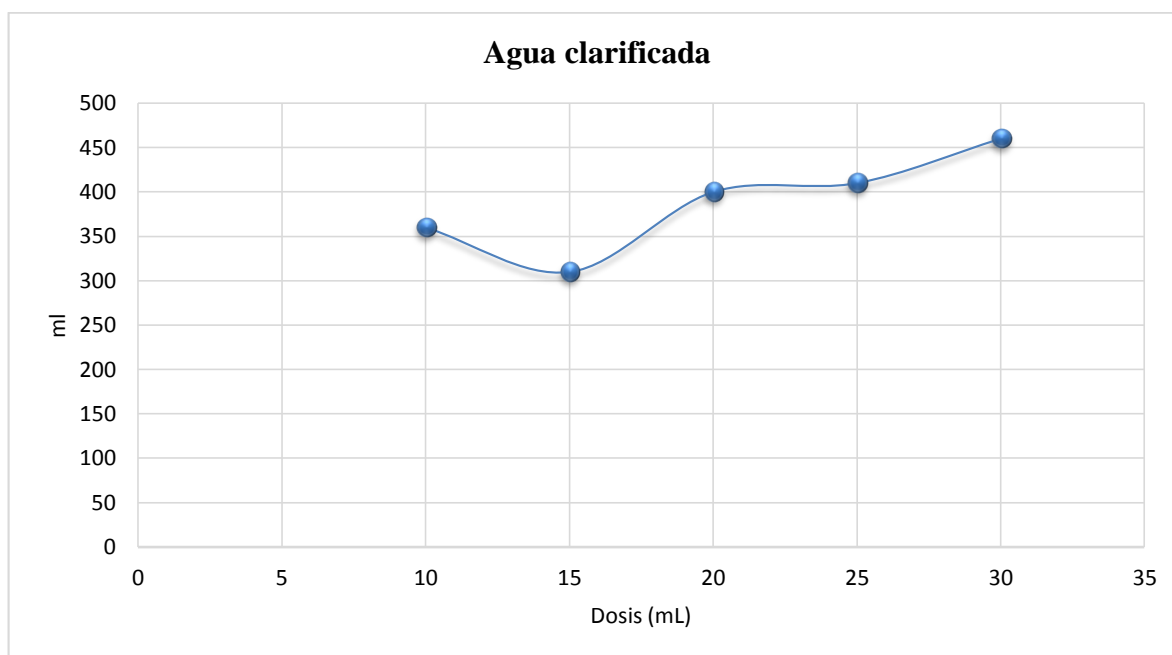


**Figura 4.7.** Variación del porcentaje de separación de agua clarificada.

En resumen para el agua clarificada, la selección de la dosis óptima de poliacrilamida aniónica se hizo atendiendo el problema de esta investigación, el cual requiere una mayor disponibilidad de agua clarificada, por lo que se seleccionó el que resulto con mayor % de agua clarificada. Esto, de acuerdo a la figura 4.7, es la dosis de 15 ml. Esta selección se puede apreciar en la siguiente tabla y figura a modo de resumen:

**Tabla 4.11.** Sedimentación residual en el vaso precipitado a los 30 min para cada dosis.

N° de Jarra	Agua clarificada por volumen residual			Ph
	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	ml-r	
1	1,2	10	360	9,21
2	1,8	15	310	9,3
3	2,4	20	400	9,33
4	3	25	410	9,36
5	3,6	30	460	9,14



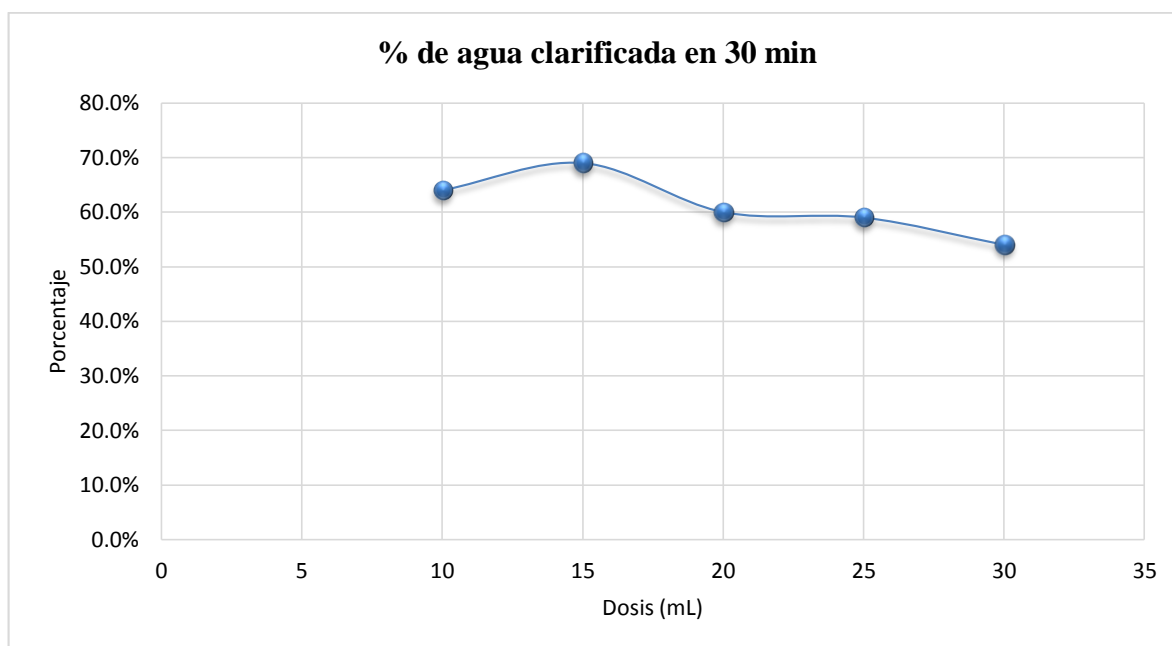
**Figura 4.8.** Variación de la sedimentación residual después de 30 min.

Así como en la post prueba, la muestra 3 que tiene baja turbidez, la dosis diluida de poliacrilamida aniónica requerida es menor, siendo en esta prueba la dosis optima al 12% igual a 15 ml, con la cual se obtiene una sedimentación residual igual a 310 ml.

Esta dosis de poliacrilamida aniónica tendría una clarificación del agua residual de 69,0% la cual sería un tanto mejor que los resultados de la post prueba. Los resultados de esta dosis se muestran en la siguiente tabla y figura:

**Tabla 4.12.** El porcentaje del agua clarificada a los 30 min de cada dosis.

N° de Jarra	Agua clarificada por %			pH
	Dosis (mg/ml)	Dosis-d (ml)	% Clarificado	
1	1,2	10	64,0%	9,21
2	1,8	15	69,0%	9,3
3	2,4	20	60,0%	9,33
4	3	25	59,0%	9,36
5	3,6	30	54,0%	9,14



**Figura 4.9.** Variación del porcentaje del agua clarificada después de 30 min.

Como se aprecia en la figura 4.9, la dosis de 15 ml tiene el mayor porcentaje de agua clarificada después de 30 min, con 69,0%.

Finalmente, la sedimentación con floculación de la muestra 3 que tiene una baja turbidez, se han obtenido buenos resultados con dosis bajas de poliacrilamida aniónica, así como se detalló en todo este punto con sus respectivas tablas y figuras. Estos resultados se ciñen mucho a la teoría de Canepa *et al.* (2004), el cual indica que aguas crudas con alcalinidad mayor a 7 y con menor cantidad de coloides, el uso de polímeros es menor, lo cual reduce por ende el costo por uso de la poliacrilamida aniónica cuando la turbidez del agua residual es baja.

#### **4.2.2. Sedimentación con floculación de la muestra 2.**

La muestra 2 que tiene una alta turbidez no se trabajó en ninguna prueba anterior, no obstante, su prueba se basó tanto en pre prueba y la post prueba. La muestra 2 al tener alta turbidez definitivamente no trabaja con la concentraciones de la post prueba, pues se obtuvo un rotundo fracaso; sin embargo, con la dosis optima de pre prueba, si se han generado buenos resultados. Por ello, ya en este punto para determinar el porcentaje de sedimentación de la turbidez y la clarificación del agua, el agua cruda de la muestra 2 se depositaron en vasos precipitados de 1 000 ml para agregar luego dosis diluidas de 10 ml, 15 ml, 20 ml, 25 ml y 30 ml de la jarra que tiene una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica correspondiendo a la dosis de 0,4 g/ml. A continuación, véase los resultados en turbidez y clarificación del agua para la muestra 2.

Muestra 2 en el mes de mayo copiado de la tabla 3.2. Muestra 2 en el mes de mayo.

Nº Muestra	Fecha	Turbidez (NTU)	Concentración de sólidos (ppt)	Potencial de H. (pH)	Temperatura (°C)
M-2	04-may-18	13 500	0,53	8,56	12,6
	Categoría	Alto	Alto	Alta alcalinidad	Ambiente

### Porcentaje de sedimentación de la turbidez.

Para determinar la variación de la turbidez en la sedimentación con floculación se utilizó el proceso de cálculo según Ramalho *et al.* (1993), los cuales se pueden apreciar en las siguientes tablas:

**Tabla 4.13.** Variación de la turbidez en la muestra 2 de 5 min a 30 min.

Poliacrilamida aniónica - Turbidez del agua (NTU)						
Nº de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	13 500	324	296	261
2	0,06	15	13 500	313	273	257
3	0,08	20	13 500	25,3	14,5	14,5
4	0,1	25	13 500	48,4	36	32,9
5	0,12	30	13 500	140	59,7	55

De acuerdo a la tabla 4.13, para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, la menor turbidez en 30 min se obtiene con una la dosis diluida al 0,4% de 20 ml la cual tiene un turbidez final de 14,5 NTU.

**Tabla 4.14.** El porcentaje de turbidez que queda en cada jarra de la muestra 2.

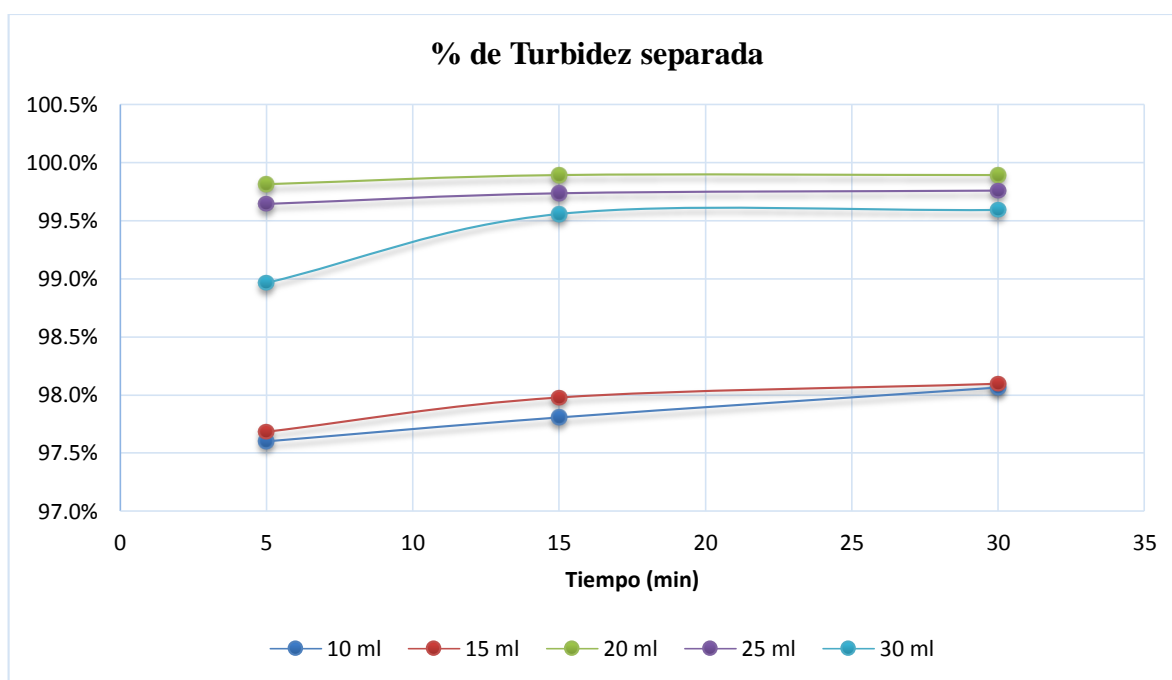
Turbidez que queda (%) y = (NTU <sub>v</sub> /NTU <sub>i</sub> ) x 100						
Nº de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	13 500	2,40%	2,19%	1,93%
2	0,06	15	13 500	2,32%	2,02%	1,90%
3	0,08	20	13 500	0,19%	0,11%	0,11%
4	0,1	25	13 500	0,36%	0,27%	0,24%
5	0,12	30	13,500	1,04%	0,44%	0,41%

Según la tabla 4.14, se tiene los porcentajes de turbidez que quedan en cada jarra de la muestra 2 en un rango de tiempo de 5 min a 30 min en donde, para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, el menor porcentaje de turbidez que queda después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 0,4% de 20 ml la cual tiene un porcentaje de turbidez restante final de 0,11%.

**Tabla 4.15.** El porcentaje de turbidez separada en cada jarra de la muestra 2.

N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Turbidez separada (%) $z = 100 - y$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	13 500	97,6%	97,8%	98,1%
2	0,06	15	13 500	97,7%	98,0%	98,1%
3	0,08	20	13 500	99,8%	99,9%	99,9%
4	0,1	25	13 500	99,6%	99,7%	99,8%
5	0,12	30	13 500	99,0%	99,6%	99,6%
Total:			100%			

Conforme a la tabla 4.15, se tiene los porcentajes de turbidez separada en cada jarra de la muestra 2 en un rango de tiempo de 5 min a 30 min en donde, para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, el mayor porcentaje de turbidez separada después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 0,4% de 20 ml, la cual tiene un porcentaje de separación de la turbidez final de 99,9%. Véase el comportamiento para cada dosis diluida en la siguiente figura:



**Figura 4.10.** Variación del porcentaje de separación de la turbidez en la muestra 2.

Como se puede apreciar en la figura 4.10, se tiene una variación del porcentaje de separación de la turbidez en M-2 en un rango de tiempo de 5 a 30 min donde la dosis de 20 ml tiene el mayor porcentaje de turbidez separada después de 30 min.

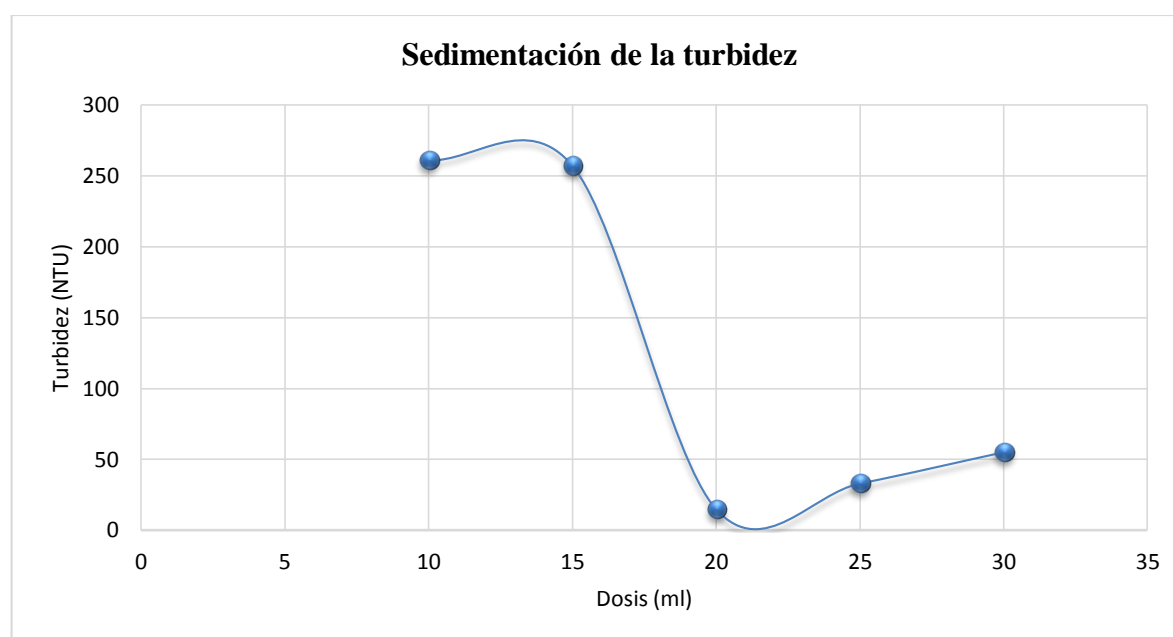
En resumen, la selección de la dosis óptima de poliacrilamida aniónica se hizo siguiendo los lineamientos de Oré (2014), que en cuanto a turbidez, se seleccionó el que



resultado con menor NTU. Esta selección se puede apreciar en la siguiente tabla y figura a modo de resumen:

**Tabla 4.16.** La turbidez final de la muestra 2 a los 30 min de cada dosis.

N° de Jarra	Turbidez separada por NTU			pH	Temp (°C)
	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	NTU		
1	0,04	10	261	8,18	14,7
2	0,06	15	257	8,17	14,6
3	0,08	20	14,5	8,16	14,7
4	0,1	25	32,9	8,16	14,7
5	0,12	30	55	8,2	14,6



**Figura 4.11.** Variación de la turbidez después de 30 min.

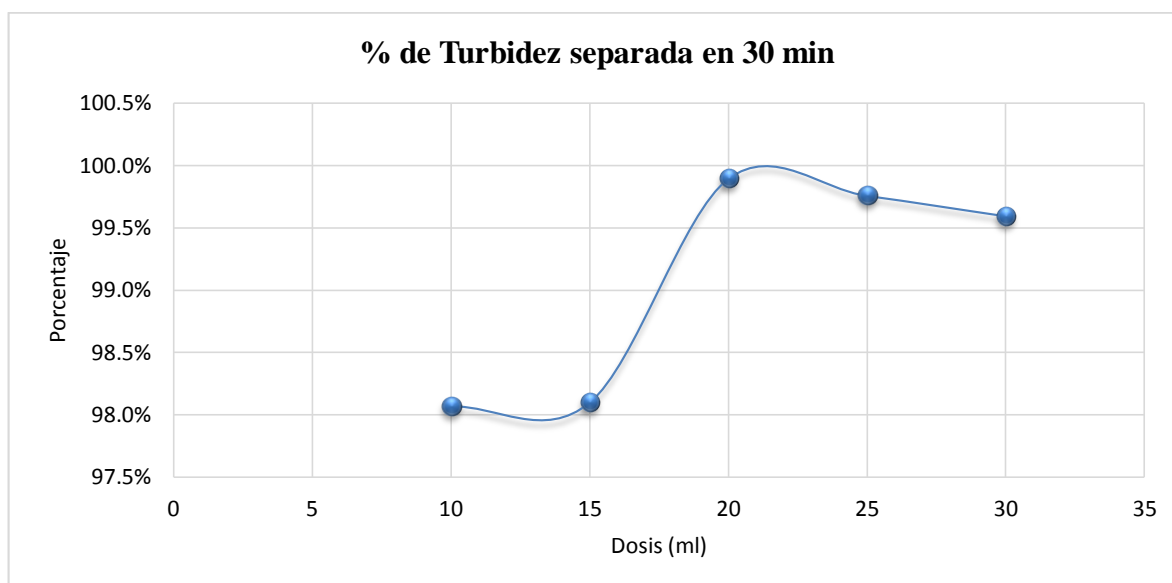
Viendo la figura 4.11, se puede apreciar una diferencia transicional en la sedimentación de la turbidez para menores concentraciones y mayores concentraciones de poliacrilamida aniónica, que en la muestra 2 que tiene alta turbidez, la dosis diluida de poliacrilamida aniónica requerida es mayor, siendo en esta prueba la dosis optima al 0,4% igual a 20 ml, con la cual se obtiene una turbidez igual 14,5 NTU. Esto nos indica que la concentración en peso en cada 100 ml de poliacrilamida aniónica es igual a 0,08 g. Entonces el ratio de uso por un litro sería:

0,8 g de poliacrilamida aniónica → por 1 litro de agua en solución

Esta dosis de poliacrilamida aniónica tendría una sedimentación de la turbidez de 99,9%, así como se muestra en la siguiente tabla y figura:

**Tabla 4.17.** El porcentaje de la turbidez separada de la muestra 2 en cada dosis.

N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Turbidez separada por %		pH	Temp (°C)
		Dosis (ml)	% separada		
1	0,04	10	98,1%	8,18	14,7
2	0,06	15	98,1%	8,17	14,6
3	0,08	20	99,9%	8,16	14,7
4	0,1	25	99,8%	8,16	14,7
5	0,12	30	99,6%	8,2	14,6



**Figura 4.12.** Variación del porcentaje de la turbidez separada después de 30 min.

También en la figura 4.12, se puede apreciar la separación de la acción de las diferentes dosis de poliacrilamida aniónica. Finalmente para acotar, ni el pH ni la temperatura sufren cambios importantes.

**Porcentaje de la clarificación del agua.**

Para determinar la variación de la clarificación del agua en la sedimentación con floculación, también se utilizó el proceso de cálculo según Ramalho *et al.* (1993), las cuales se pueden apreciar en las siguientes tablas:

**Tabla 4.18.** Variación del agua clarificada por volumen residual de la muestra 2

N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Poliacrilamida aniónica - Clarificación del agua en volumen (ml)			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	1 000	400	300	300
2	0,06	15	1 000	300	200	200
3	0,08	20	1 000	200	180	180
4	0,1	25	1 000	200	200	200
5	0,12	30	1 000	320	210	200

De acuerdo a la tabla 4.18, se tiene la variación del agua clarificada por volumen residual del vaso precipitado para cada jarra de la muestra 2 en un rango de tiempo de 5 min a 30 min. En donde para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, el menor volumen residual de la sedimentación en 30 min se obtiene con una la dosis diluida al 0,4% de 20 ml, la cual tiene un volumen residual en el vaso precipitado en 180 ml.

**Tabla 4.19.** El porcentaje de agua por clarificar en cada jarra de la muestra 2.

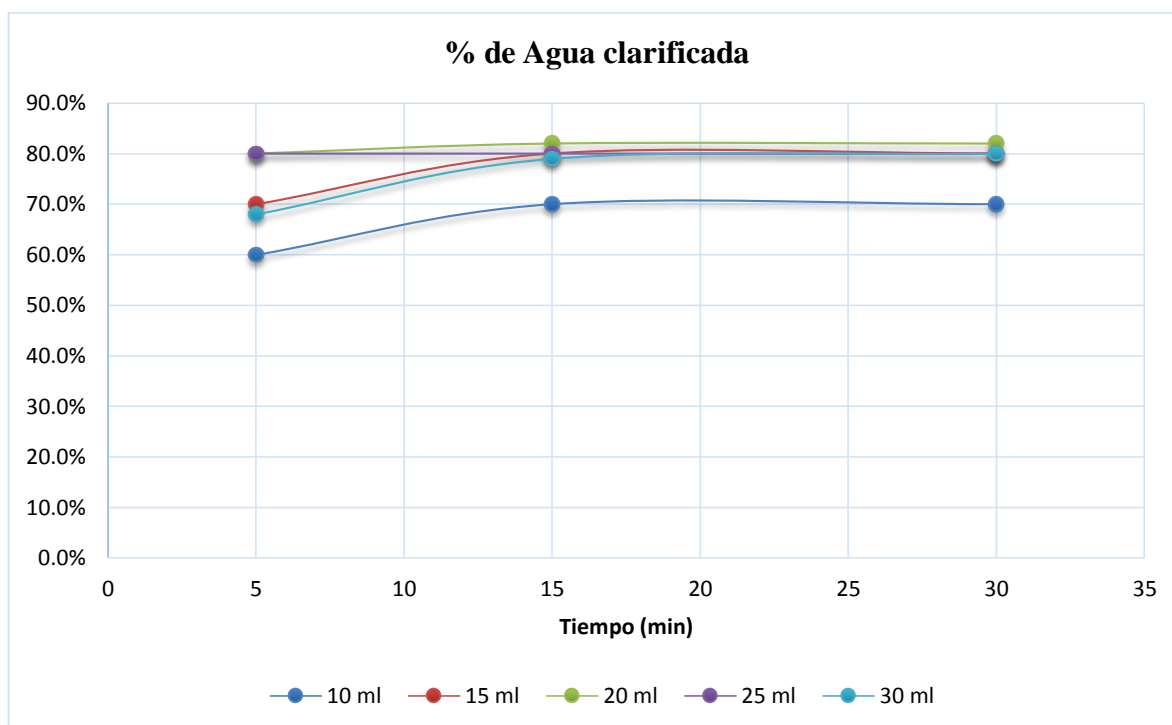
N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Agua por clarificar (%) $y = (Vv/Vi) \times 100$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	1 000	40,0%	30,0%	30,0%
2	0,06	15	1 000	30,0%	20,0%	20,0%
3	0,08	20	1 000	20,0%	18,0%	18,0%
4	0,1	25	1 000	20,0%	20,0%	20,0%
5	0,12	30	1 000	32,0%	21,0%	20,0%

Según la tabla 4.19, se tiene el porcentaje de agua por clarificar en cada jarra de la muestra 2 en un rango de tiempo de 5 min a 30 min. En donde para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, el menor porcentaje de agua por clarificar después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 0,4% de 20 ml, la cual tiene un porcentaje de agua por clarificar final de 18%.

**Tabla 4.20.** El porcentaje de agua clarificada en cada jarra de la muestra 2.

N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	Agua clarificada (%) $z = 100 - y$			
			Tiempo (min)			
			0	5	15	30
1	0,04	10	1 000	60,0%	70,0%	70,0%
2	0,06	15	1 000	70,0%	80,0%	80,0%
3	0,08	20	1 000	80,0%	82,0%	82,0%
4	0,1	25	1 000	80,0%	80,0%	80,0%
5	0,12	30	1 000	68,0%	79,0%	80,0%
Total:			100%			

Conforme a la tabla 4.20, se tiene el porcentaje de agua clarificada en cada jarra de la muestra 2 en un rango de tiempo de 5 min a 30 min. En donde para una concentración diluida de 0,4% de poliacrilamida aniónica, el mayor porcentaje de agua clarificada después de 30 min es correspondiente a la dosis diluida al 0,4% de 20 ml, la cual tiene un porcentaje de agua clarificada final de 80,0%. Véase el comportamiento para cada dosis diluida en la siguiente figura:



**Figura 4.13.** Variación del porcentaje de separación de agua clarificada de la muestra 2.

En resumen para el agua clarificada, la selección de la dosis óptima de poliacrilamida aniónica se hizo atendiendo el problema de esta investigación, el cual requiere una mayor disponibilidad de agua clarificada, por lo que se seleccionó el que resultado con mayor % de agua clarificada. Esto, de acuerdo a la figura 4.13, es la dosis de 20 ml. Esta selección se puede apreciar en la siguiente tabla 4.21 y figura 4.14 a modo de resumen:

**Tabla 4.21.** La sedimentación residual de cada dosis de la muestra 2

N° de Jarra	Agua clarificada por ml residual			pH
	Dosis (g/ml)	Dosis (ml)	ml	
1	0,04	10	300	8,18
2	0,06	15	200	8,17
3	0,08	20	180	8,16
4	0,1	25	200	8,16
5	0,12	30	200	8,2

En la muestra 3 que tiene una alta turbidez, la dosis diluida de poliacrilamida aniónica requerida es mayor, siendo en esta prueba la dosis óptima al 0,4% igual a 20 ml, con la cual se obtiene una sedimentación residual igual a 180 ml. Asimismo, cabe recalcar que a excepción de la dosis diluida de 10 ml, las demás dosis tienen casi el mismo comportamiento en cuanto a sedimentación, esto puede verse en la figura 4.14. La dosis de poliacrilamida aniónica de 0,4% en 20 ml tendría una clarificación del agua residual de 82,0%. Los resultados de esta dosis se muestran en la siguiente tabla 4.22 y figura 4.15:

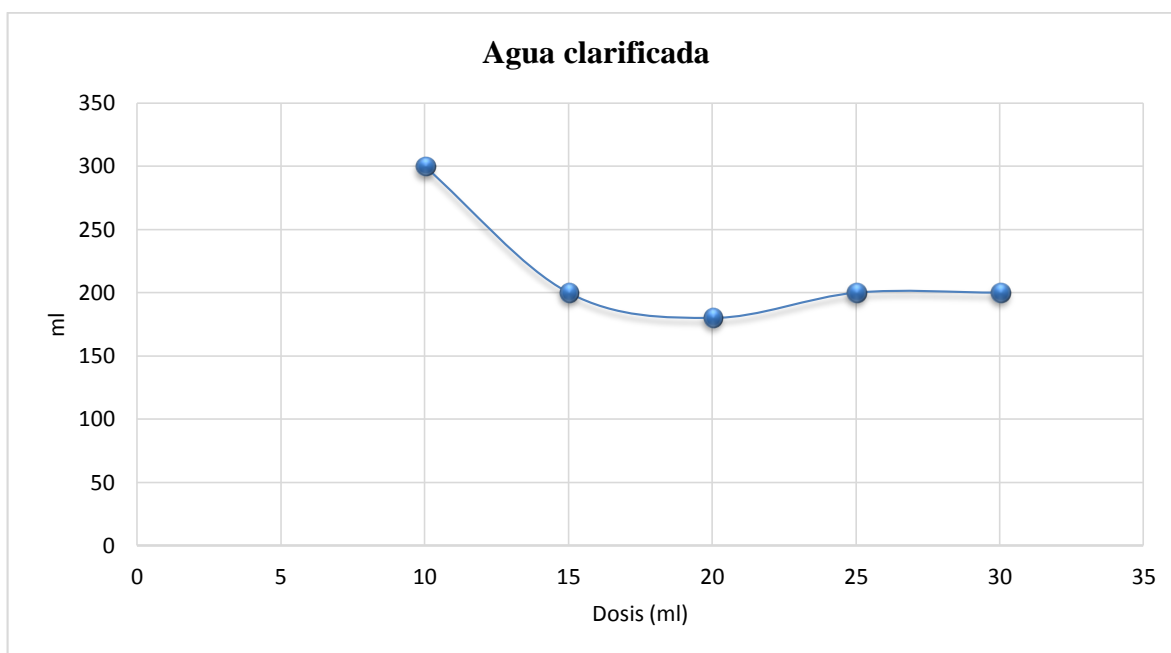


Figura 4.14. Variación de la sedimentación residual en la muestra 2 después de 30 min.

Tabla 4.22. El porcentaje del agua clarificada de cada dosis.

N° de Jarra	Dosis (g/ml)	Agua clarificada por %		pH
		Dosis (ml)	% Clarificado	
1	0,04	10	70,0%	8,18
2	0,06	15	80,0%	8,17
3	0,08	20	82,0%	8,16
4	0,1	25	80,0%	8,16
5	0,12	30	80,0%	8,2

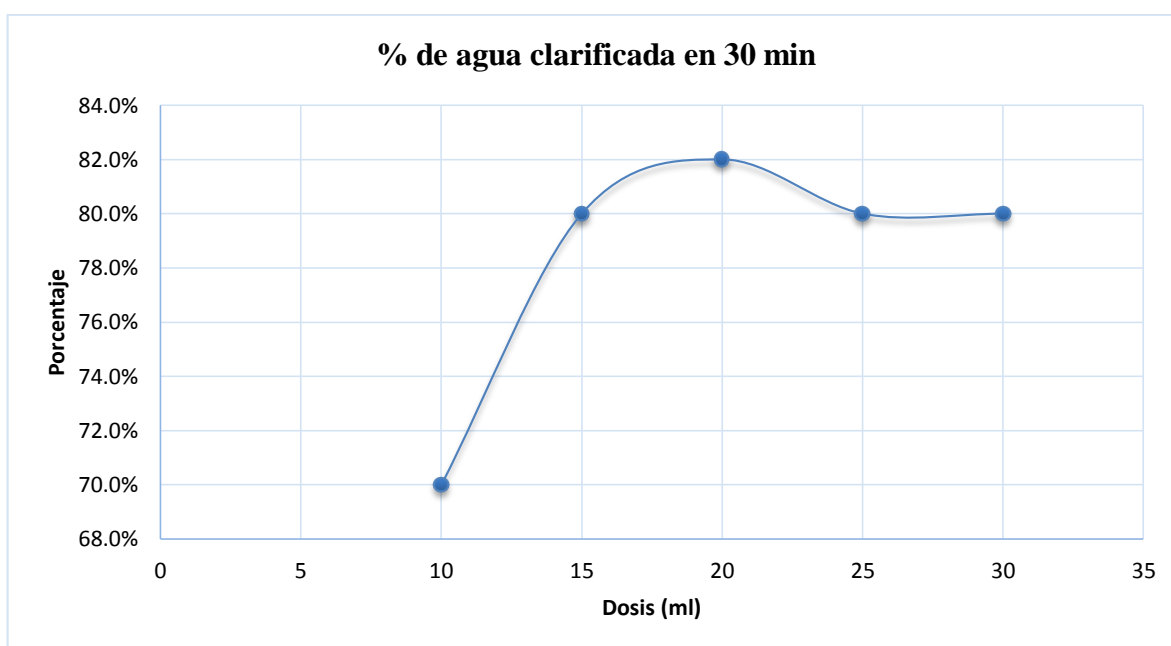


Figura 4.15. Variación del porcentaje del agua clarificada en la Muestra 2.

Como se aprecia en la figura 4.15, la dosis de 20 ml tiene el mayor porcentaje de agua clarificada después de 30 min, con 82,0%.

Finalmente, la sedimentación con floculación de la muestra 2 que tiene una alta turbidez, es muy distinta al de la muestra, pues los buenos resultados se obtuvieron con dosis altas de poliacrilamida aniónica, así como se detalló en todo este punto con sus respectivas tablas y figuras. Estos resultados también se ciñen mucho a la teoría de Canepa *et al.* (2004), el cual indica que aguas crudas con alcalinidad mayor a 7 y con mayor cantidad de coloides, es necesario usar una gran cantidad de polímero. Esto aumentaría el costo por uso de la poliacrilamida aniónica, no obstante se elimina gran cantidad de la turbidez y se clarifica gran cantidad de agua.

Finalmente, y para acabar con la parte de los resultados de esta investigación, la certificación de las mediciones así como las imágenes de los resultados para cada muestra, se pueden visualizar en el anexo N° 06-A, 06-B y 06-C.

#### **4.3. Discusión de los resultados.**

La discusión de los resultados se hará conforme a los procedimientos y resultados de los antecedentes de esta investigación, teniendo lo siguiente:

Con respecto a Tejada (2017): En esta investigación también se utiliza la prueba de jarras, con la principal diferencia que el coagulante – floculante es la Cal (CaO). De acuerdo a sus resultados, la lechada de cal de 6 ml/l a una concentración de 5% de cal considerada como la dosis óptima tiene un comportamiento parabólico inverso tanto en la turbiedad, SST y el agua clarificada que se genera por el comportamiento de la sedimentación en el tiempo. Esta dosis óptima sedimentó la turbiedad inicial de 81 900 NTU y sólidos totales iniciales de 67 400 mg/l a la turbiedad final a 19,39 NTU y los sólidos totales en suspensión final (SST) de 18,25 mg/l, ambos en 60 min, con lo cual se clarifica el 50,25%. La poliacrilamida aniónica al ser un polímero tiene un comportamiento muy distinto a la cal, el cual es casi sinusoidal, mostrando las etapas de coagulación y floculación con valores bajos y altos en una sedimentación por adsorción. La dosis óptima al 12% en una dosis diluida de 15 ml en una muestra 3 que tenía una turbiedad inicial de 7 960 NTU obtuvo una turbiedad igual 61,7 NTU. Mientras que, la dosis óptima al 0,4% en una dosis diluida de 20 ml en una muestra 2 que tenía una turbiedad inicial de 13 500 NTU se obtuvo una turbiedad igual 14,5 NTU. La conclusión más resaltante en base a los resultados obtenidos es que a baja concentración de coloides la cantidad de uso de la poliacrilamida aniónica también es baja, en el caso opuesto sería viceversa. En Tejada (2017) la prueba solo se realiza sobre una muestra y en donde no se puede medir la variabilidad de la cal a distintas concentraciones de coloides.

Con respecto a Oré (2014): En esta investigación también se utiliza la prueba de jarras, empleando el sulfato de aluminio como coagulante y el Polifloc (polímero) como floculante. La sedimentación es por barrido ya que trata agua para consumo humano con muy bajas concentraciones de NTU (20 a 200). El comportamiento del coagulante y el floculante tienen un comportamiento sinusoidal, siendo la dosis óptima del sulfato de aluminio 25 mg/l y del Polifloc 0,49 mg/l. A pesar de que el agua trata tiene baja turbiedad, las dosis del sulfato de aluminio y del Polifloc son relativamente altas porque la sedimentación se hace por barrido obteniendo una reducción de la turbidez hasta 1,46 NTU en promedio. La poliacrilamida aniónica es un polímero que actúa como coagulante y floculante, prescindiendo del uso de un coagulante. Si bien en este estudio de investigación el agua cruda tiene alta concentración de turbidez y sedimentación por adsorción, al contrario del estudio de Oré (2014), la poliacrilamida aniónica también podría ser usado para tratar agua para consumo humano, pues así como se detalla en la prueba para la muestra 2, se logra separar la turbidez en un 99,9%, reduciendo la turbiedad inicial de 13 500 NTU a una turbiedad final 14,5 NTU, no obstante, la sedimentación ya no sería por adsorción sino por barrido.

Con respecto a Canaza y Chambi (2013): Esta investigación es bastante distinta al que se desarrolló en este investigación, pues se utiliza el flujo ascensional para remover fosfatos de las aguas residuales, cabe recalcar que este proceso es posterior a la sedimentación discreta y sedimentación con floculación; no obstante, en esta investigación se utiliza cal y cloruro férrico como floculantes los cuales sedimentan concentraciones de turbiedad (NTU) en un 85,4% con cal viva, mientras que, la sedimentación de turbiedad con floculante  $FeCl_3$  es un 55,5%. En este estudio de investigación, con el uso de la poliacrilamida aniónica se logró sedimentar el 99,9% de la turbidez de la muestra 2, mientras que, en la muestra 3 se logró sedimentar el 99,2% de la turbidez.

Con respecto a Amanqui y Lopez (2004): Para esta investigación la sedimentación que contempla la separación de sólidos/líquidos, es un parámetro importante. Para ello, este estudio utilizó cal ( $CaO$ ), con lo cual se logró una sedimentación estable a las 10 horas con un volumen de 110  $cm^3$ . Esto permitió eliminar los metales disueltos, alcanzando valores de concentración cercanos al exigido por el reglamento del medio ambiente. En cuanto al uso de la poliacrilamida aniónica que es un polímero que actúa como coagulante y floculante, el tiempo que se considera como sedimentación estable es de solo 30 min, es decir, 95% menos que el que se logró en el estudio Amanqui y Lopez (2004), no obstante, el tiempo logrado de 30 min fue con una dosis óptima de poliacrilamida aniónica, lo cual marca una gran

diferencia con el uso de la Cal sin dosis optima, o en caso de Tejada (2017), la diferencia es de 50% menos del tiempo requerido en cuanto a dosis optimas tanto de la Cal en comparación a la poliacrilamida aniónica.

Con respecto a Mendoza (2009): En esta investigación indica que los reactores utilizados en el tratamiento no incrementa la contaminación en las aguas, la poliacrilamida aniónica tampoco es un contaminante tal como indica la hoja de medidas de seguridad, véase esto en el anexo N° 01-c.

Con respecto a Garcia y Tongombol (2015): En esta investigación indica que los relaves mineros son desechos tóxicos sub productos de procesos mineros y concentración de minerales, en este caso los sedimentos originados del proceso de lavado de material aurífero se considerarían contaminantes siempre en cuando sean vertidos a ecosistemas vulnerables, pero si se hace una disposición adecuada no representa un riesgo para el medio ambiente.

Con respecto a Requena (2008): En esta investigación indica que la recirculación de las aguas industriales tratadas a los procesos de planta de beneficio y de mina, disminuye el consumo de agua fresca en las operaciones minero metalúrgicas, el cual es necesario debido a que el recurso hídrico es escaso, teniéndose que aprovechar al máximo la reutilización del agua, el cual es posible con el uso de la poliacrilamida aniónica.

Con respecto a Bravo (2017): En esta investigación indica que los coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de la turbidez son más eficientes llegando hasta un 90% de eliminación de contaminantes, de ser el caso, estos coagulantes y floculantes naturales también serían una buena alternativa de solución para el tratamiento de las aguas residuales de la Unidad Minera Operativa Halcón de Oro. No obstante, cabe recalcar que con la poliacrilamida aniónica se logró sedimentar el 99,9% de la turbidez de la muestra 2, mientras que, en la muestra 3 se logró r sedimentar el 99,2% de la turbidez. Es decir, que la poliacrilamida aniónica que es un floculante sintético, ha sido superior los coagulantes y floculantes naturales. Sin embargo, en comparación de costos, las cosas serían distintas.



## CONCLUSIONES

La dosis óptima de poliacrilamida aniónica determinada en la Muestra 2 (M-2) que tenía una concentración inicial de turbiedad de 13 500 NTU fue de 0,08 g en una dosis de 20 ml para una concentración de 0,4% en 100 ml, con la cual se sedimentó a una turbidez final igual a 14,5 NTU en 30 min. En tanto, la dosis óptima de poliacrilamida aniónica en la Muestra 3 (M-3) que tenía una concentración inicial de turbiedad igual a 7 960 NTU, fue de 1,8 mg en una dosis de 15 ml para una concentración de 12% en 100 ml, con la cual se sedimentó a turbidez final a los 30 min igual a 61,7 NTU.

La dosis óptima de 0,08 g de poliacrilamida aniónica en la Muestra 2 (M-2), logró sedimentar el 99,9% de la turbidez y clarificar un 82,0% del agua cruda, en un intervalo de tiempo de 30 min. En tanto, la dosis óptima de 1,8 mg de poliacrilamida aniónica en la Muestra 3 (M-3), logró sedimentar el 99,2% de la turbidez y clarificar un 69,0% del agua cruda, también en un intervalo de tiempo de 30 min.

Finalmente, teniendo en cuenta la conclusión 1) y 2), para una concentración de turbiedad alta como la Muestra 2 (M-2) con 13 500 NTU; la dosis de poliacrilamida aniónica fue alta con 0,08 g; es decir, 0,8 g por cada litro de agua en solución. Mientras que, para una concentración de turbiedad baja como la Muestra 3 (M-3) con 7 960 NTU; la dosis de poliacrilamida aniónica fue baja con 1,8 mg; es decir, 18 mg por cada litro de agua en solución. Esto se ajusta mucho a la teoría de Canepa *et al.* (2004), el cual indica que aguas crudas con alcalinidad mayor a 7 y con mayor cantidad de coloides, es necesario usar una gran cantidad de polímero y con menor cantidad de coloides, el uso de polímeros es menor.

## RECOMENDACIONES

Si bien en las pruebas realizadas en cada muestra dentro de este estudio de investigación se midió la sedimentación de la turbidez y la clarificación; no se analiza ni se mide los sólidos totales en suspensión (SST) que de acuerdo a Oré (2014), es un método directo a diferencia de la turbiedad (NTU) que es un método indirecto pero que es válido y confiable, no obstante, el medir los sólidos totales en suspensión (SST) podría reforzar mejor los resultados en cuanto a la sedimentación con floculación de aguas residuales.

Si bien, la dosis baja de poliacrilamida aniónica en la muestra de baja turbidez da un buen resultado, este resultado no es tan bueno cuando se usa una alta dosis de poliacrilamida aniónica, en especial en el porcentaje de agua clarificada. Siendo importante realizar un balance costo-beneficio en usar poliacrilamida aniónica en altas dosis para clarificar mayor cantidad de agua, ya que las bajas dosis de poliacrilamida aniónica han clarificado 13% menos de agua que las altas dosis.

Sería importante reforzar este trabajo de investigación haciendo análisis a mas muestras de agua cruda, pues de acuerdo a las muestras M-1, M-2 y M-3, existe una variabilidad en la concentración de turbidez la cual es consecuente con la variabilidad de la geología de yacimiento morrénico. Habiendo esta variabilidad, también existe una versatilidad en cuanto al uso de cantidades de poliacrilamida aniónica. Esto permitirá fijar límites y parámetros de uso de la poliacrilamida aniónica que mejoraría el costo de su aplicación.

## REFERENCIAS

- Alvarez, D. (2012). *Concentración Gravimétrica*. SliderShare: es.SliderShare.com.
- Amanqui, D., & Lopez, F. (2004). *Tratamiento de Aguas Ácidas en la Mina Rinconada en el Alfuate del Balcon N° 3* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Bravo, M. A. (2017). *Coagulantes y Floculantes Naturales Usados en la Reducción de Turbidez, Sólidos en Suspensión, Colorantes y Metales Pesados en Aguas Residuales* (monografía de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Canaza, A., & Chambi, E. (2013). *Evaluación de Sedimentadores en Columna y Flujo Ascensional para Remoción de Fosfato de Aguas Residuales, Utilizando Floculantes Cal y Cloruro Férrico* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Canepa, L., Maldonado, V., Barrenechea, A., & Aurazo, M. (2004). *Tratamiento de Agua para Consumo Humano: Plantas de Filtración Rápida - Tomo I*. Lima, Perú: CEPIS.
- Concha, H. I. (2007). *Estudio de la Concentración Gravimétrica de Minerales Auríferos en un Jig de Laboratorio* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- García, C. A., & Tongombol, D. V. (2015). *Los Relaves Mineros, su Efecto en el Ambiente y la Salud*. Tarapoto, Perú: Universidad Peruana Unión.
- Herrera, J. H. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Manuel, E. (2015). *Recuperación Gravimétrica de Au en el Proceso de Flotación de Sulfuros Masivos* (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- Martínez, S. A., & Rodríguez, M. G. (2005). *Tratamiento de Aguas Residuales con MATLAB*. Mexico D.F., Mexico: Reverte Ediciones, S.A.
- Mendoza, E. (2009). *Tratamiento de las Aguas Residuales Procedentes de la Planta Curtiembre del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química UNAP* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Montalvo, R. (2013). *Remoción de Aceites en Aguas Residuales de Refinación del Petróleo Mediante la Adición de Reactivos Químicos y Separación por Flotación Natural o*

- con Aire Disuelto* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México.
- Morales, A. J. (2013). *Aguas Residuales Industriales*. SliderShare: es.SlideShare.com.
- Oré, L. (2014). *Evaluación de la Eficiencia del Floculante Sulfato de Aluminio y Polifloc Empleado en la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Quicapata- Ayacucho* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.
- P.M. San Antonio y María. (2017). *Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo*. Ananea, Perú: Consultores Glaciares SRL.
- Ramallo, R. S. (1993). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canadá: REVERTÉ S.A.
- Requena, M. A. (2008). *Sistema de Tratamiento Integral de Aguas Residuales en UEA Animon de Empresa Administradora Chungar SAC* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Tejada, R. (2017). *Tratamiento y Sedimentación de la Turbidez con Cal en las Aguas Residuales de los Realves Mineros en la Unidad Operativa Santiago - B* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Wikipedia. (2018). *Calidad del Agua*. Obtenido de Wikipedia: Enciclopedia Libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Calidad\\_del\\_agua](https://es.wikipedia.org/wiki/Calidad_del_agua)
- Wikipedia. (2018). *Total de sólidos en suspensión*. Obtenido de Wikipedia: Enciclopedia Libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Total\\_de\\_s%C3%B3lidos\\_en\\_suspensi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Total_de_s%C3%B3lidos_en_suspensi%C3%B3n)



## ANEXOS