



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN  
SECUNDARIA DE ULTRAFINOS DE RELAVES MINEROS CHILENOS.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIOAMBIENTE HÍDRICOS.

CATALINA LÓPEZ ESPEJO

PROFESOR GUÍA:  
CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CLAUDIA CASTILLO OCARANZA  
HUMBERTO PALZA CORDERO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
Proyecto Fondecyt 1160971 .

SANTIAGO DE CHILE  
2021

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA DE ULTRAFINOS DE RELAVES MINEROS CHILENOS.**

Durante los últimos años se ha incrementado la complejidad y persistencia de los problemas operativos en las plantas de procesamiento de minerales chilenos, asociados a la presencia de arcillas. Es probable que esta tendencia persista en el tiempo, considerando que el escenario mineralógico-energético ha cambiado con respecto a las condiciones bajo las cuales se diseñaron originalmente las plantas y las filosofías operativas. A medida que las leyes de cobre han disminuido, se deben tratar volúmenes más grandes para mantener la producción constante, y el porcentaje de la alimentación que comprende finos ha aumentado, ya que los tamaños de liberación de los minerales de cobre son progresivamente más pequeños.

La recuperación del agua de proceso para la recirculación es crucial, ya que el costo de agregar agua dulce adicional es una restricción económica que a menudo es prohibitiva. Por lo tanto, se necesita investigar para comprender cómo las partículas finas, y en particular las arcillas de cuarzo, caolinita y bentonita sódica, impactan en el proceso óptimo de separación sólido-líquido.

En el presente trabajo se evalúa el efecto de la presencia de estas arcillas en la separación sólido-líquido de relaves sintéticos de sulfuro de cobre, cuantificando el impacto en la eficiencia de separación, considerando la velocidad de sedimentación y la turbidez del sobrenadante. Se monitorearon las variables fisicoquímicas que controlan la suspensión y las tendencias observadas se explicaron por variaciones en propiedades como el potencial zeta y el pH. La caracterización y cuantificación del impacto de las arcillas en la operación nos permitirá sentar las bases para el desarrollo de un enfoque novedoso para el tratamiento secundario del agua sobrenadante turbia de los espesantes.

Tras el estudio, se pudieron distinguir efectos dispares en la eficiencia de sedimentación dependiendo del tipo de arcilla y el agua en el que está inmersa: en el caso de relaves con presencia de arcillas de caolinita, se ve que la mayor eficiencia de sedimentación se da en el caso de la floculación en agua destilada, y al mismo tiempo, la salinidad o presencia de coagulantes catiónicos va en desmedro de ésta. Para el caso de relaves con presencia de arcillas de bentonita, la eficiencia de sedimentación aumenta conforme hay una mayor concentración de sales catiónicas (coagulación-agua de mar sintética). En contraste, para el caso del agua destilada la eficiencia de floculación es baja, por lo que se recomienda añadir un aditivo catiónico, considerando además el bajo costo económico que estos implican. En el caso de los relaves con presencia de arcillas de cuarzo, no se puede distinguir un efecto claro en el aumento o disminución de la eficiencia de sedimentación con la adición de floculantes, coagulantes o al trabajar en agua de mar.

*Y de pronto vemos que el amor  
nos cuesta todo lo que somos  
y todo lo que podemos ser.  
Y sin embargo es el amor  
lo único que nos libera.*

***Maya Angelou***

*Dedicada a Liliana,  
Nunca dejes de soñar y amar.*

# Agradecimientos

Terminando este proceso, bastante más largo de lo esperado, tengo mucho por lo que agradecer y dedicar parte de este trabajo de tesis.

Primero, agradezco a mi familia por todo lo que han tenido que tolerar durante estos casi 3 años: A mi mamá por no dudar en confiar en este proyecto del postgrado y apoyarme económica y emocionalmente durante todos este tiempo a mi hermano, por ser mi guía y a quien más admiro, a mi papá por su cariño y preocupación y a mis 6 perros Denty, Isaac, Hiena, César, Sara y Dogger por hacer mejor mi vida. También le agradezco por todo a Victor y su familia. Me siento honrada de que me hayan incluido en su familia. En particular, agradezco el haber conocido a Victor, soy muy afortunada de saber que puedo contar contigo en todos los pasos de mi vida.

También debo agradecer profundamente la inmensa posibilidad que Christian Ihle me dio de poder especializarme. Sin haberme conocido hizo un voto de confianza en mí y a pesar de todas las adversidades fue paciente y comprensivo conmigo. En este párrafo debo agradecer de forma sincera a todos los que formaron parte del LRF durante estos años (Claudia, Cristian, Nico, Brunito y Seba). Por supuesto que, al igual que la tesis anterior, le agradezco por todo a Sebastián Contreras, si no hubiese sido por su motivación a "tocar puertas" toda esta historia no sería posible.

No pueden faltar en este agradecimiento mis amigos: Los que estaban antes de esta aventura: Clau, Nicol, Conthy, Caro, Ja, Beltrán, Valin, VP, Fede, Eileen, Alpaca, Carlitos, Cony, Paola, Joaquín, Erótico, Ignacio, y a los que conocí durante esta odisea : Nery, Micol, José, Manuel y Octavio. Tengo mucha suerte de habermelos topado en mi vida.

El último párrafo va dedicado a lo más importante de mi vida: El teatro. Durante estos años he tenido la bendición de vivirlo, disfrutarlo, sufrirlo y gozarlo. En esto debo destacar particularmente a mis amigos Juan, Kris y Manuel por todo lo que hemos vivido durante estos años, de seguro nos esperan muchas historias más.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y problemática . . . . .	1
1.2. Métodos de tratamiento de ultrafinos de relaves . . . . .	4
<b>2. Objetivos</b>	<b>6</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	6
2.2. Objetivos específicos . . . . .	6
<b>3. Marco teórico</b>	<b>7</b>
3.1. Recuperación de agua en procesos mineros . . . . .	7
3.1.1. Espesamiento de relaves . . . . .	7
3.1.2. Proceso de coagulación y floculación . . . . .	11
3.2. Propiedades de las arcillas y sus efectos en el proceso de espesamiento . . . . .	16
3.3. Efecto de la arcilla en el procesamiento de minerales . . . . .	18
3.3.1. Molienda y trituración . . . . .	19
3.3.2. Clasificación y concentración . . . . .	19
3.3.3. Pilas de lixiviación . . . . .	20
3.3.4. Flotación . . . . .	21
3.3.5. Espesamiento, filtración y disposición de relaves . . . . .	22
<b>4. Metodología</b>	<b>25</b>
4.1. Materiales y métodos . . . . .	25
4.1.1. Muestras de relave artificial . . . . .	25
4.1.2. Composición del agua a utilizar en el estudio . . . . .	27
4.1.3. Otros reactivos utilizados . . . . .	28
4.2. Equipos y procedimientos usados . . . . .	29
4.2.1. Caracterización de la velocidad de sedimentación y turbidez del sobrenadante . . . . .	29
4.2.2. Concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	32
4.2.3. Potencial zeta . . . . .	33
4.3. Procedimiento experimental . . . . .	33
4.4. Parámetros de eficiencia de sedimentación . . . . .	34
4.5. Hipótesis . . . . .	35
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>36</b>
5.1. Curva de calibración para relacionar turbidez y concentración de ultrafino . . . . .	36
5.1.1. Sin finos (SF) . . . . .	36
5.1.2. Presencia de finos . . . . .	37

5.2.	Estudio de proceso de sedimentación sin finos (SF) . . . . .	40
5.2.1.	Estudio de la velocidad de sedimentación . . . . .	40
5.2.2.	Análisis de la concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	44
5.2.2.1.	Potencial zeta . . . . .	46
5.3.	Caracterización de Cp/Dosis de floculante óptima para el estudio . . . . .	47
5.4.	Sedimentación de relaves sintéticos con presencia de arcillas, sin aditivos . .	49
5.4.1.	Velocidad de sedimentación . . . . .	49
5.4.2.	Concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	51
5.5.	Proceso de floculación de relaves sintéticos con presencia de arcillas . . . . .	52
5.5.1.	Velocidad de sedimentación . . . . .	52
5.5.2.	Concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	54
5.5.3.	Potencial zeta . . . . .	55
5.6.	Coagulación de relaves sintéticos con presencia de arcillas . . . . .	55
5.6.1.	Velocidad de sedimentación . . . . .	56
5.6.2.	Turbidez y concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	57
5.6.3.	Potencial zeta . . . . .	58
5.7.	Floculación-Coagulación de relaves con presencia de arcillas . . . . .	59
5.7.1.	Velocidad de sedimentación . . . . .	59
5.7.2.	Concentración de sólidos en el sobrenadante . . . . .	61
5.7.3.	Potencial zeta . . . . .	62
5.8.	Resumen de los principales resultados . . . . .	63
5.8.1.	Agua destilada . . . . .	63
5.8.2.	Agua de mar . . . . .	64
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>7.</b>	<b>Sugerencias</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>68</b>

# Índice de Tablas

1.1.	Disponibilidad de recursos hídricos y porcentaje de éstos destinados a operaciones mineras en regiones donde existen importantes yacimientos. (Elaboración propia basada en información de [2].) . . . . .	2
1.2.	Definición de ultrafino dependiendo del origen de colas chilenas. . . . .	4
4.1.	Características del material grueso utilizado en el estudio. Este material fue caracterizado por parte del proveedor. [29]. . . . .	25
4.2.	Características del material fino utilizado en el estudio, previamente caracterizado por [29]. . . . .	26
4.3.	Composición de relaves artificiales utilizados en este estudio, previamente definidos por [29]. . . . .	27
4.4.	Composición de agua de mar sintética utilizada para este estudio [30]. . . . .	28
4.5.	Propiedades medidas del agua de mar sintética utilizada en este estudio. . . . .	28
4.6.	Propiedades promedio del Agua destilada utilizada en este estudio. . . . .	28
4.7.	Características del floculante SNF704 utilizadas en el estudio [31] . . . . .	29
4.8.	Características de los coagulantes utilizados en el estudio [32], [33] . . . . .	29
5.1.	Ajuste lineal de curva de calibración concentración de sólidos (eye x) y turbidez (eye y) para relaves sin presencia de finos en agua destilada y agua de mar sintética. . . . .	37
5.2.	Ajuste lineal de curva de calibración concentración de sólidos (eye x) y Turbidez (eye y) para relaves artificiales con presencia de arcillas en agua destilada . . . . .	38
5.3.	Ajuste lineal de curva de calibración Concentración de sólidos (eye x) y turbidez (eye y) para relaves artificiales con presencia de arcillas en agua de mar sintética. . . . .	39
5.4.	Velocidad de sedimentación promedio en función del $C_p$ de la solución a tratar modificando la dosis de floculante para caso Sin fino y en agua destilada y agua de mar sintética . . . . .	44
5.5.	Potencial zeta de sobrenadante tras floculación para el caso sin finos en agua destilada. . . . .	46
5.6.	Potencial Zeta de sobrenadante tras floculación para el caso Sin finos en agua destilada. . . . .	46
5.7.	Velocidad de sedimentación y valor de la eficiencia de sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos. . . . .	50
5.8.	Concentración de sólidos de sobrenadante pasados 5 minutos iniciados el proceso de sedimentación sin adición de químicos para relaves sintéticos con la presencia de arcillas en agua destilada y agua de mar sintética. . . . .	51
5.9.	Velocidad de sedimentación y valor de la eficiencia de sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos. Se omite el caso SF, a 100 % en eficiencia de sedimentación. . . . .	53

5.10.	Concentración de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos añadido el floculante para relaves sintéticos con contenido de arcilla. . . . .	54
5.11.	Potencial zeta y pH de sobrenadante tras 5 minutos iniciado el proceso de floculación para relaves artificiales con presencia de arcillas comparado con valor de potencial zeta de muestra sin finos. . . . .	55
5.12.	Velocidad de sedimentación de proceso de coagulación para relaves sintéticos con contenido de arcillas en agua destilada. . . . .	56
5.13.	Turbidez del sobrenadante y concentración de sólidos en el sobrenadante tras 30 minutos transcurridos desde la adición de coagulante. . . . .	58
5.14.	Eficiencia de remoción de sólidos en el sobrenadante tras 30 minutos iniciada la adición de coagulantes para relaves sintéticos con presencia de arcillas. . . . .	58
5.15.	Potencial Zeta [mV] y pH de sobrenadante tras 30 minutos iniciada la coagulación de relaves sintéticos con contenido de arcillas. . . . .	59
5.16.	Velocidad de sedimentación y eficiencia de sedimentación de proceso Coagulación-Floculación para relaves con presencia de arcillas de Bentonita. . . . .	61
5.17.	Turbidez del sobrenadante y concentración de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos transcurridos desde la adición del floculante. . . . .	62
5.18.	Porcentaje de remoción de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos iniciada la adición de floculante para relaves sintéticos con presencia de arcillas. . . . .	62
5.19.	Potencial zeta y pH de sobrenadante tras 30 minutos iniciada la coagulación de relaves sintéticos con contenido de arcillas y Potencial zeta equivalente al caso sin fino. . . . .	62
5.20.	Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la velocidad de sedimentación para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua destilada. . . . .	63
5.21.	Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la concentración de sólidos en el sobrenadante para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua destilada. . . . .	63
5.22.	Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la velocidad de sedimentación para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua de mar sintética . . . . .	64
5.23.	Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la concentración de sólidos en el sobrenadante para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua de mar sintética. . . . .	64



# Índice de Ilustraciones

1.1.	Proyección de consumo de agua asociado a la minería del cobre en el periodo 2019-2030 para agua de mar como de agua continental [1]. . . . .	2
1.2.	Producción de cobre mina 2017 y proyección periodo de 2018 a 2029, a nivel nacional [1]. . . . .	3
1.3.	Métodos de tratamiento de ultrafinos (Elaboración propia basada en [7]). . . . .	5
3.1.	Procesos de recuperación de agua en la minería del cobre. Elaboración propia basado en [10]. . . . .	7
3.2.	Esquema de un sedimentador circular, ampliamente utilizado en operaciones mineras(Extraído desde [10] y modificado para el trabajo de investigación presentado). . . . .	8
3.3.	Representación física de la Sedimentación y Consolidación [11]. . . . .	9
3.4.	Ilustración de tres tipos de espesadores en el procesamiento de minerales, (A) Convencional, (B) alta capacidad y (C) alta densidad (imagen modificada de [11]).	10
3.5.	Ilustración de la diferencia entre (A) espesador Convencional y (B) espesador de alta capacidad(imagen modificada de [11]). . . . .	10
3.6.	Esquema de la doble capa eléctrica que rodea una partícula suspendida en un líquido polar [14]). . . . .	12
3.7.	Esquema de la Teoría DLVO [14]). . . . .	13
3.8.	Mecanismo de Floculación electrostática [16]). . . . .	14
3.9.	Mecanismo del proceso de floculación de puente: A) formación de un puente entre las partículas y el floculante; B) agregación de partículas unidas por un polímero de cadena larga [11]). . . . .	14
3.10.	Puente de iones metálicos entre la superficie de las partículas cargadas negativamente y un floculante aniónico [11]). . . . .	15
3.11.	Estructura química de los principales floculantes utilizados en la Industria Minera [11]). . . . .	15
3.12.	Estructura de láminas (T) de arcillas [18]. . . . .	16
3.13.	Estructura de las láminas (O) de arcillas [18]. . . . .	17
3.14.	Estructura de los principales tipos de arcillas encontrados en la industria minera [18]. . . . .	18
3.15.	Representación de la migración de partículas ultrafinas [15]. . . . .	20
3.16.	Representación gráfica del Hinchamiento de arcilla [15]. . . . .	20
3.17.	Representación gráfica de la Migración de arcillas inducida por el Hinchamiento [15]. . . . .	21
4.1.	Montaje experimental para el registro de la velocidad de sedimentación. Elaboración propia, basado en [35]. . . . .	30
4.2.	Ilustración de proceso de sedimentación por gravedad en probeta. Elaboración Propia basada en [36]. . . . .	31

4.3.	Representación gráfica de la velocidad de sedimentación por gravedad en probetas. . . . .	32
4.4.	Esquema de obtención de curvas de calibración. . . . .	33
4.5.	Equipo Stabino® Particle Metrix, utilizado para medición de potencial zeta y pistón de 100 nm usado en los experimentos. . . . .	33
5.1.	Resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso sin finos. . . . .	37
5.2.	Resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso de arcillas puras. A la derecha las curvas de calibración del agua destilada y a la izquierda el caso de agua de mar. . . . .	38
5.3.	Resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso de mezclas de arcillas. A la derecha las curvas de calibración del agua destilada y a la izquierda el caso de agua de mar. . . . .	39
5.4.	Variación de altura con respecto al tiempo en proceso de sedimentación con dosis de floculante de 25 [g/ton seca] para caso sin finos. . . . .	40
5.5.	Variación de altura de la suspensión utilizando una dosis de floculante de 25 [g/ton seca] para caso sin finos en agua destilada. . . . .	41
5.6.	Variación de altura de la suspensión utilizando dosis de floculante de 12.5 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] para caso sin finos en agua destilada. . . . .	42
5.7.	Variación de altura de la suspensión utilizando dosis de floculante de 12.5 [g/ton seca], 25 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] para caso sin finos en agua de mar. . . . .	43
5.8.	Concentración de sólidos en el sobrenadante en función de la dosis de floculante para un $C_p$ fijo en agua destilada. . . . .	45
5.9.	Concentración de sólidos en el sobrenadante en función de la dosis de floculante para un $C_p$ fijo en agua de mar. . . . .	45
5.10.	Potencial zeta a distintos pH de solución de relave sintético sin finos, con $C_p=10\%$ y una dosis de floculante de 25 g/ton. . . . .	48
5.11.	Distribución de largo de cuerdas de muestra sólida sin finos utilizando un equipo FBRM (Resultados extraídos del software específico de Metler Toledo). . . . .	49
5.12.	Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de floculante para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas en agua destilada y agua de mar. . . . .	50
5.13.	Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de floculante para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas en agua destilada y agua de mar. . . . .	52
5.14.	Variación en la velocidad de sedimentación de los casos MQ y KQ para distintas dosis de floculante. . . . .	54
5.15.	Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$ arriba y $CaCl_2$ abajo, ambos a 500 [mg/l]) para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas. . . . .	57
5.16.	Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$ arriba y $CaCl_2$ abajo, ambos a 500 [mg/l]) y floculante SNF704 para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas. . . . .	60
5.17.	Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$ arriba y $CaCl_2$ abajo, ambos a 500 [mg/l]) y floculante SNF704 para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas. . . . .	61

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y problemática

La minería del cobre es la actividad económica más importante del país. Contribuye aproximadamente el 13,1 % del Producto Interno Bruto, el 14,3 % de los impuestos recaudados y representa el 57 % de las exportaciones entre 2008 y 2019 [1].

Se proyecta que el consumo de agua asociado al proceso de obtención del cobre vaya en aumento con los años. En la Figura 1.1 se puede ver la evolución del consumo de agua a nivel nacional proyectado hasta el año 2030 asociado a la minería del cobre para dos tipos de aguas: Agua continental (definidas como aguas que se encuentran en zonas superficial y de subsuelo tales como las aguas subterráneas) y de mar. Analizando este gráfico, se pueden apreciar dos resultados importantes: Primero, las actividades mineras proyectadas implican un aumento sustancial en el uso de los recursos hídricos, tal cual como se puede apreciar en la curva del consumo de Agua Total esperado, por lo que se hace esencial la mejora del proceso de recuperación del recurso y asegurar la calidad suficiente para la reutilización de ésta en los procesos de recuperación del metal. Otra conclusión importante que se rescata de esta proyección es el aumento de uso de agua de mar en un 156 % comparando el periodo 2019-2030 y una disminución del uso de agua continental de un 6 %. Se proyecta que ambos consumos convergerán a partir del año 2027, requiriendo un análisis del uso de agua continental y de mar.

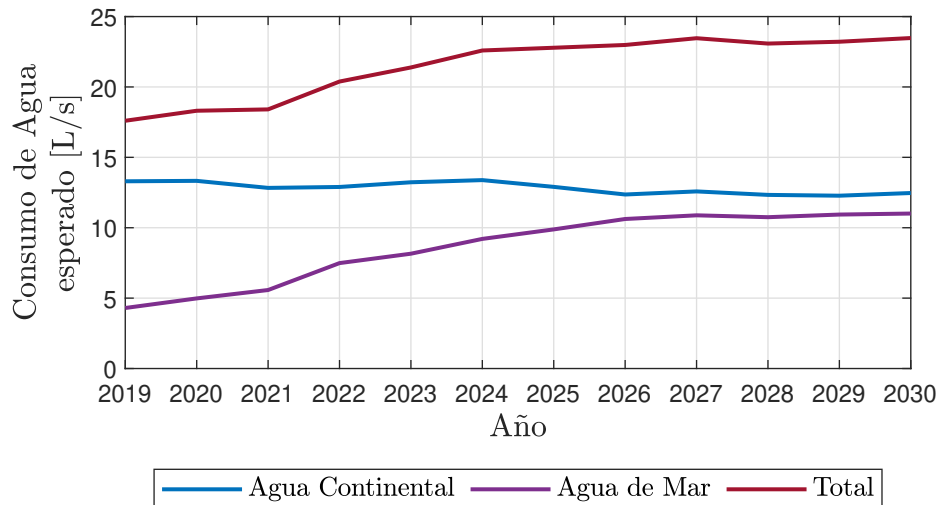


Figura 1.1: Proyección de consumo de agua asociado a la minería del cobre en el periodo 2019-2030 para agua de mar como de agua continental [1].

Si bien, el consumo de recursos hídricos asociados únicamente a la minería no corresponde más allá del 5% del total [2], es importante mencionar que la distribución de los procesos mineros, en particular de extracción de cobre, se concentran en la zona norte y centro del país, donde el clima es árido o semiárido. Dicho esto, a pesar de que las demandas de agua son relativamente bajas a nivel nacional, si lo son a nivel local. La Tabla 1.1 muestra la disponibilidad per cápita de recursos hídricos para aquellas regiones en donde existen operaciones mineras, además del porcentaje de uso de éstos para operaciones mineras.

Tabla 1.1: Disponibilidad de recursos hídricos y porcentaje de éstos destinados a operaciones mineras en regiones donde existen importantes yacimientos. (Elaboración propia basada en información de [2].)

Región	Disponibilidad per cápita de Recursos Hídricos [m <sup>3</sup> /año/per cápita]	Porcentaje de uso de agua para operaciones mineras [%]
Región de Tarapacá	1000	Sin información
Región de Antofagasta	500	65
Región de Atacama	700	60
Región de Coquimbo	1700	10
Región Metropolitana	900	10
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	10000	15

Considerando además el impacto del cambio climático en la zona, con aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones [2], resulta imperante contar con alternativas que reduzcan el uso del consumo hídrico por parte de la industria.

Si bien, se ha progresado en la reducción del uso del agua dulce, mejorando la eficiencia de procesos reemplazando su uso por el de agua de mar o aumentando la recirculación de ésta, se está en la búsqueda de alternativas que permitan prescindir aún más de este recurso, a falta de una ruta de proceso viable que prescinda o reduzca de manera substancial su uso. De forma análoga, se debe responder a las nuevas necesidades de la industria de extracción de mineral.

Durante las últimas décadas la demanda del cobre ha aumentado drásticamente. De 1991 a 2015, la extracción total mundial se ha duplicado, pasando de 9,3 millones a 18,7 millones de toneladas. Adicionando a esto, COCHILCO estima que la producción de cobre aumentará hasta el año 2029, como se puede ver en la Figura 1.2.

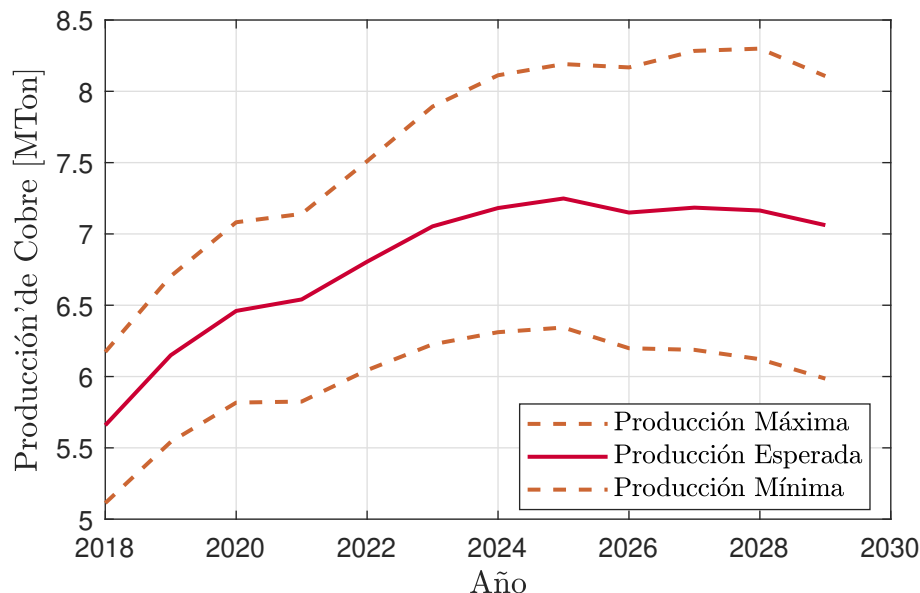


Figura 1.2: Producción de cobre mina 2017 y proyección periodo de 2018 a 2029, a nivel nacional [1].

En la actualidad, el promedio mundial de leyes de mineral para las minas de cobre es aproximadamente el 0.62% y se espera que este número disminuya a medida que, los yacimientos con leyes de mineral más altas se agoten, por lo que los tamaños de liberación del metal son de menor tamaño y la mineralogía de los desechos del proceso, denominado cola o relave, resulta de mayor complejidad [3].

En general, el proceso de extracción de cobre a partir de minerales se puede dividir en dos etapas dependiendo de su impacto, especialización técnica y procesos involucrados: Recuperación de cobre y Recuperación de agua para la disposición final de los relaves o residuos de esta actividad. Es en el segundo conjunto de procesos en donde se centró el trabajo realizado. Las colas provenientes del proceso de extracción de minerales son mezclas heterogéneas de diferentes sólidos suspendidos que contienen una gran variedad de especies solubles. Los principales criterios de clasificación asociados a la fase sólida son el tamaño de grano, mineralogía y morfología.

1. Clasificación de tamaño: Por convención, se clasifican las fracciones de tamaño de las componentes sólidas de los relaves como “arena” (grueso), “limo” (fino) y “arcilla” (ultrafino). Los tamaños de corte exactos para estas clases pueden variar según el origen y las aplicaciones. En general, se supone que un Ultrafino es aquel material cuyo tamaño es menor o igual a 2  $\mu\text{m}$  [4]. Datos obtenidos de un relave de El Teniente y de Carén, El Teniente de CODELCO muestran la diversidad y complejidad de definir un promedio de ultrafinos presente en los relaves de cobre [5], [6].

Tabla 1.2: Definición de ultrafino dependiendo del origen de colas chilenas.

Origen de cola	Arena	Limo	Arcillas	Fuente
El Teniente, CODELCO	>75 [ $\mu\text{m}$ ]. 66,1 % (p/p)	38-75 [ $\mu\text{m}$ ]. 30 % (p/p)	<38 [ $\mu\text{m}$ ]. 3.9 % (p/p)	[5]
Carén, El Teniente, CODELCO	>63 [ $\mu\text{m}$ ]. 11 % (p/p)	2-63 [ $\mu\text{m}$ ]. 68 % (p/p)	<2 [ $\mu\text{m}$ ]. 21 % (p/p)	[6]

2. Mineralogía y morfología de relaves de cobre [7]: Se ha estudiado y caracterizado la mineralogía de sólidos y la morfología de los relaves de la industria del cobre. Aquí se puede ver que los relaves de sulfuro de cobre contienen minerales arcillosos y óxidos metálicos. Dentro de los minerales de filosilicato presentes en los relaves de cobre, la mayoría se clasifican como minerales de arcilla y se concentran en las fracciones de ultrafinos. Estos materiales provienen de la meteorización de los minerales y tienen láminas tetraédricas de silicio y oxígeno como el bloque de construcción básico. Otros tipos de capas se unen químicamente en paralelo a cada lámina tetraédrica para formar la capa unitaria para una variedad de arcillas [8]. Los procesos de extracción de minerales se ven perjudicados por la presencia de las arcillas debido a que se reducen las tasas de flotación y complejizan el tratamiento de colas, taponeando los sistemas de bombeo presentes en el proceso.
3. Composición del sólido de relaves de cobre: En la industria chilena del cobre, se presentan principalmente dentro de las gangas la combinación de 5 minerales [8]: 3 arcillas (2 bentonitas y Caolinita), Cuarzo y Mica Blanca.
4. Composición líquida de relaves de cobre [7]: Dependerá del proceso de extracción de cobre utilizado: pH 9.2-10.2 para la flotación alcalina de minerales de sulfuro; pH neutro reportado para relaves de pórfido; Datos limitados de salinidad del agua.

## 1.2. Métodos de tratamiento de ultrafinos de relaves

La comprensión empírica y semi-empírica de la naturaleza de los constituyentes de los relaves minerales finos y sus interacciones ha conducido a una transición gradual de las prácticas de manejo de los relaves finos, desde el vertido absoluto de estos desechos al tranque de relaves hasta el desarrollo y aceptación de varias tecnologías de densificación y consolidación por parte de las industrias mineras de todo el mundo. En la Figura 1.3 se puede ver un esquema generalizado de los métodos de tratamiento de ultrafinos de relaves más importantes.

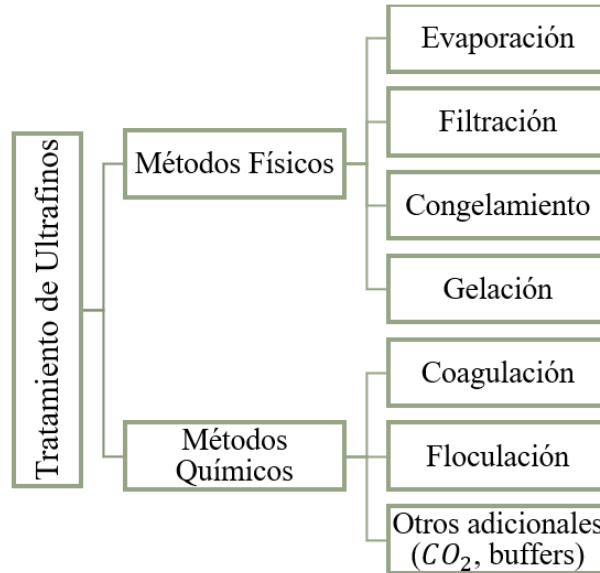


Figura 1.3: Métodos de tratamiento de ultrafinos (Elaboración propia basada en [7]).

El tratamiento de suspensiones de minerales ultrafinos se ha centrado tradicionalmente en la concentración de éstos utilizando equipos como hidrociclones, espesadores, filtros y centrifugadoras para eliminar el exceso de agua y así tener una mejor manipulación del material y reducir los costos de transporte [9]. Para efectos de esta investigación, se desarrollarán alternativas factibles para el tratamiento de ultrafinos de relaves mineros de cobre mediante métodos químicos. El procedimiento general es conseguir la agrupación de partículas mediante el uso de agentes químicos, orgánicos para el caso de la floculación y sales inorgánicas en el caso de la coagulación.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Comparar experimentalmente métodos químicos de separación de finos, en el caso particular de arcillas de relaves de sulfuros de cobre, evaluando factibilidad técnica y operativa para distintas condiciones de relaves sintéticos y así obtener un óptimo de recuperación de aguas en el proceso de sedimentación de relaves mineros chilenos.

### 2.2. Objetivos específicos

- Comprensión de métodos de separación de arcillas en los relaves mineros.
- Determinar de factores que afectan la sedimentación de ultrafinos.
- Desarrollar un modelo experimental para determinar el óptimo operacional de la sedimentación de ultrafinos en dos aspectos: Velocidad de Sedimentación y Concentración de sólido en el sobrenadante tras el proceso de separación.
- Realizar proceso de sedimentación primaria y secundaria en conjunto y analizar posibilidades de optimización operacional desde el punto de vista de la recuperación de agua.



# Capítulo 3

## Marco teórico

### 3.1. Recuperación de agua en procesos mineros

La recuperación de agua desde los relaves habitualmente consiste en etapas de separación sólido–líquido que buscan recuperar de los desechos de la operación de extracción de cobre el mayor volumen de agua posible para así recircularlo al proceso y conseguir con esto menores costos asociados al consumo de agua y disminución del volumen del residuo final. Usualmente se realiza la siguiente secuencia de operaciones [10]:

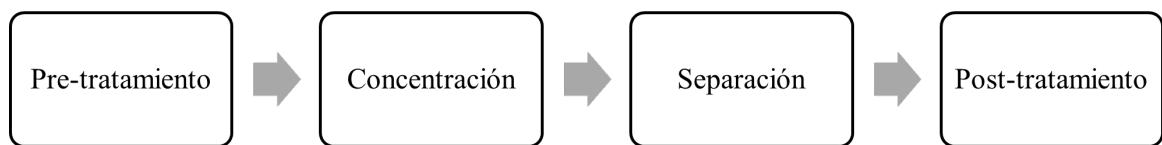


Figura 3.1: Procesos de recuperación de agua en la minería del cobre. Elaboración propia basado en [10].

La primera etapa que se investigó en este trabajo es la de Concentración, denominada Espesamiento de relaves.

#### 3.1.1. Espesamiento de relaves

La operación de espesamiento es una de las operaciones de separación sólido–líquido más utilizada a nivel industrial. En promedio, se alcanzan recuperaciones de 55-65 % del agua utilizada en procesos anteriores, presenta una capacidad de procesamiento continua y además sugiere bajos costos de mantención y operación [10].

La separación sólido–líquido se logra en un tanque espesador de sedimentación (Figura 3.2) donde los sólidos se separan de la fase líquida por sedimentación.

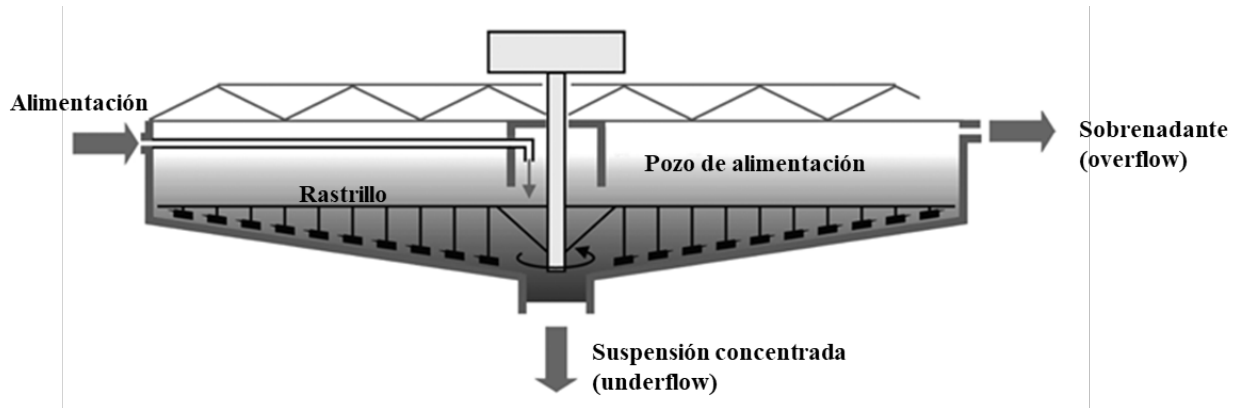


Figura 3.2: Esquema de un sedimentador circular, ampliamente utilizado en operaciones mineras (Extraído desde [10] y modificado para el trabajo de investigación presentado).

El mecanismo físico que origina que las partículas se depositen en el fondo del tanque espesador consiste en el hecho que éstas tienen una gravedad específica más alta que el agua. Al mismo tiempo, el material puede sedimentar como partículas libres o como partículas agregadas, llamadas flocúlos. De esta manera, el propósito principal del espesamiento es la disminución de sólidos en el sobrenadante, permitiendo que el agua sea reutilizada en la operación de procesamiento de minerales. Además, el espesador tiene como objetivo aumentar la concentración del flujo de alimentación para su posterior disposición en el tranque de relaves.

Lo que hace que el espesamiento sea una técnica ampliamente utilizada es su rentabilidad, ser un proceso de alta capacidad y, además, el hecho que se asocia a fuerzas de cizallamiento muy bajas, lo que proporciona buenas condiciones para la floculación de partículas finas. El proceso de espesamiento consta de dos fenómenos superpuestos; sedimentación y consolidación de las partículas en suspensión: La sedimentación es el asentamiento de partículas libres y la aglomeración de partículas en el fondo del equipo debido a la fuerza de la gravedad. A medida que las partículas se asientan en suspensión, interactúan entre sí y con el fluido circundante limitando la velocidad de sedimentación de partículas libres. La consolidación, por otro lado, comienza cuando la sedimentación de las partículas se acerca al fondo del equipo y éstas comienzan a entrar en contacto. Si las partículas son incompresibles, el proceso de espesamiento termina ahí, sin embargo, cuando las partículas son compresibles, como es el caso de los relaves provenientes de la extracción de cobre, el peso de la floculación superior comprime la capa de sólidos que están en la zona inferior y el agua se exprime de las partículas floculadas. En la Figura 3.3 se puede ver una representación de los dos fenómenos ya descritos.

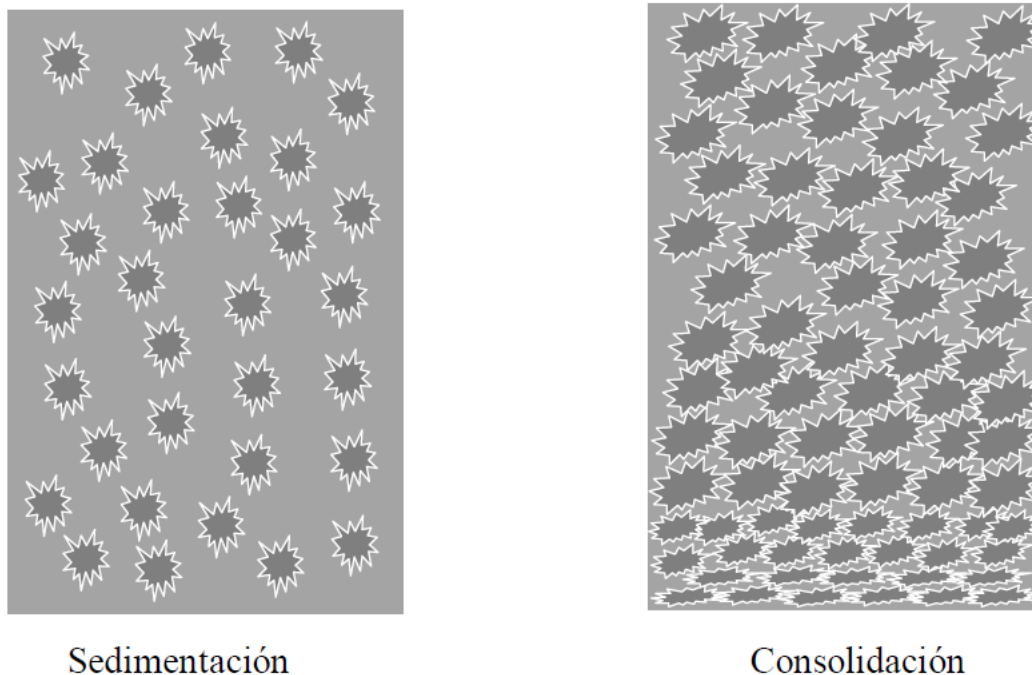


Figura 3.3: Representación física de la Sedimentación y Consolidación [11].

**Equipamiento del espesador** El espesador no ha cambiado mucho en términos de apariencia desde su primera invención en 1905 [11]. Sin embargo, a lo largo de los años, el tamaño del tanque del espesador ha aumentado, se utilizan materiales más resistentes y se han desarrollado componentes que hacen más eficiente el acondicionamiento del flujo de alimentación. No obstante, los componentes principales se han mantenido y consisten en lo detallado a continuación:

1. Tanque espesador: Principal estructura del espesador, generalmente de forma cilíndrica, pero la forma de la base es cónica; esto permite una mejor descarga de la suspensión concentrada (*underflow*). El material del tanque puede ser madera o acero para estructuras de hasta 30 metros de diámetro, mientras que para estructuras superiores a 30 metros se utiliza hormigón [11].
2. Pozo de alimentación (*Feedwell*): Permite el ingreso de la alimentación con un mínimo de turbulencia y una distribución adecuada en el Tanque Espesador, lo que provoca un rápido asentamiento de partículas. Además, proporciona las mejores condiciones para flocular los sólidos, como es el punto donde se agrega el floculante y donde ocurre el proceso de floculación. Consiste en una tubería sostenida por un puente que transporta la alimentación de floculante al Tanque Espesador.
3. Mecanismo de rastras: Está destinado a desplazar los sólidos sedimentados hasta el punto de descarga del concentrado, incrementando la concentración de partículas mientras ocurre este proceso. Pueden tener una variedad de formas y tipos. Presenta además un conjunto de impulsores cuyo objetivo es proporcionar un control del mecanismo.

4. Sobreflujo (*Overflow*): Ubicado fuera del tanque, tiene como objetivo recibir el agua limpia posterior al proceso de sedimentación (denominado Sobrenadante). La capacidad hidráulica debe ser suficiente para evitar inundaciones, las que pueden causar cortocircuitos en la alimentación y deterioro de la densidad del sobrenadante.

En la Figura 3.2 se puede ver la disposición de las componentes previamente descritas en el equipo.

**Tipos de espesadores utilizados en operaciones mineras.** Ya descritos los componentes básicos del equipo, se pueden distinguir tres tipos de espesadores que se diferencian entre sí principalmente en la posición del pozo de alimentación y la altura (ver Figura 3.4):

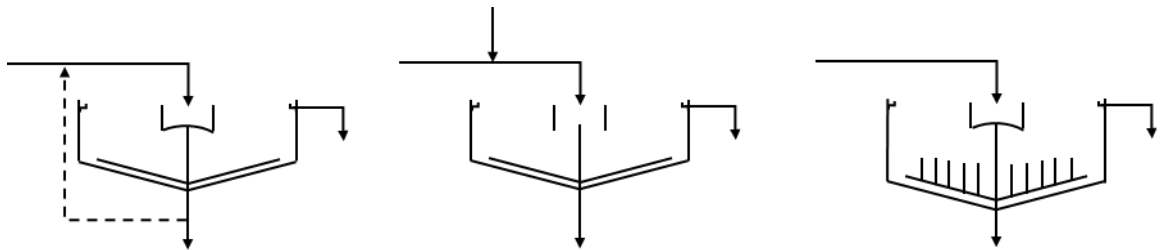


Figura 3.4: Ilustración de tres tipos de espesadores en el procesamiento de minerales, (A) Convencional, (B) alta capacidad y (C) alta densidad (imagen modificada de [11]).

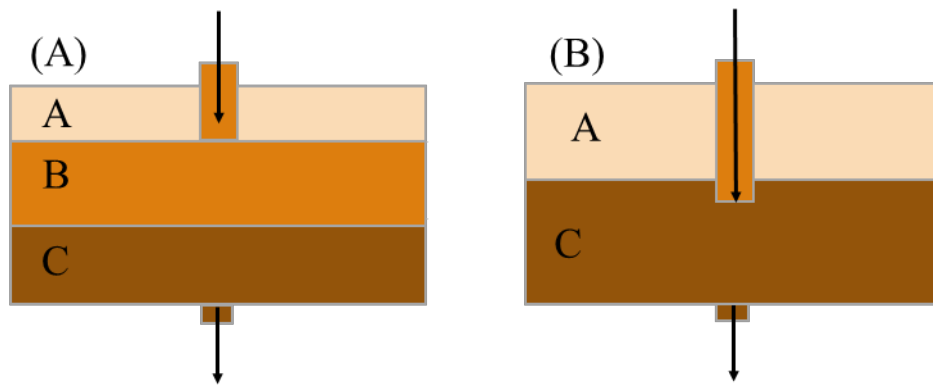


Figura 3.5: Ilustración de la diferencia entre (A) espesador Convencional y (B) espesador de alta capacidad(imagen modificada de [11]).

- Convencional: Este tipo de espesador se caracteriza por su pozo de alimentación montado en la parte superior del tanque. A medida que la alimentación entra en el espesador, éste se mezcla con parte del agua recuperada. La dilución formada en el pozo de alimentación sedimenta a una velocidad constante formando una capa de distribución dentro del tanque (ver Figura 3.5 (A)); agua clara en la parte superior, una suspensión intermedia en el medio del tanque y el lodo espesado en el parte inferior de la misma.
- Alta capacidad: Este tipo de espesador se compone por un pozo de alimentación que se introduce en una posición profunda que llega a la posición del lecho de lodos tal como se

ve en la Figura 3.5 (B). Por lo tanto, la alimentación floculada se mezcla directamente con el lodo espesado. Una ventaja de tener el pozo de alimentación en una posición más baja es que las partículas ultrafinas no floculadas permanecerán atrapadas en el lecho de lodo. De esta manera, el espesador de alta capacidad genera un overflow limpio y un underflow denso. Se pueden diferenciar dos zonas, el agua clara en la parte superior y el lodo espesado en la parte inferior. Estos espesadores suelen caracterizarse por una mayor dificultad para controlarlos en comparación con los espesadores convencionales.

- Alta densidad: Este equipo puede ser convencional o de alta capacidad, pero se caracteriza por una altura superior al de los espesadores previamente descritos. Este rasgo permite obtener una mayor concentración del lodo espesado.

### 3.1.2. Proceso de coagulación y floculación

Para lograr altas recuperaciones del metal de interés y, por lo tanto, generar altos ingresos económicos en la industria de procesamiento de minerales, es esencial liberar el mineral a través de una cadena de operaciones consecutivas. Entre las operaciones se encuentran la reducción de tamaño, concentración de minerales, separación sólido-líquido, etc. La parte clave de estas operaciones es la reducción de tamaño de partícula ya que es la más cara, y sin ella es imposible recuperar los distintos minerales valiosos. Sin embargo, a medida que los minerales de alta ley se están agotando, es necesario obtener beneficios materiales de los minerales de baja calidad. Estos minerales de baja ley tienen la característica de estar finamente diseminados en la matriz de la roca, por lo tanto, requiere un mayor tiempo de molienda para lograr el tamaño de liberación óptimo [11].

Por otro lado, es bien sabido que la flotación es uno de los procesos de concentración más realizados, y su eficiencia está determinada por el rango del tamaño de partícula [11]. Por ejemplo, las partículas grandes no pueden suspenderse mediante la agitación en la celda de flotación. Además, las partículas demasiado finas o el lodo no pueden flotar a medida que disminuye la probabilidad de colisión entre burbujas y partículas [11]. De la misma forma, el tamaño de partícula es una variable importante en los procesos de separación sólido-líquido, ya que la sedimentación de las partículas finas es muy lenta, por lo que se consigue una baja eficiencia de recuperación de agua [11].

Dado el escenario actual de la recuperación de cobre y otros metales [3], por un lado, es necesario moler más fino para lograr el tamaño de liberación y, a menudo, al hacerlo, se vuelve problemático para las operaciones posteriores, como la etapa de flotación y recuperación de agua para recirculación a los procesos. La solución a este problema es moler tan fino como sea necesario para lograr el tamaño de liberación y luego aglomerar las partículas resultantes. Al aglomerar las partículas, se logra un mayor tamaño de éstas y se puede procesar aguas abajo de manera adecuada, sin afectar el proceso. Pese a esto, la aglomeración se realiza ocasionalmente en el área de flotación, pero su uso principal es en la separación sólido-líquido. Dado que la aglomeración trae consigo aumento en el tamaño de partícula, no solo mejora la velocidad de sedimentación en los espesadores, sino que también mejora el proceso de filtración al mejorar la permeabilidad de la torta formada [12]. Se pueden distinguir tres procesos de aglomeración dentro de la industria minera; (1) coagulación, (2) floculación y (3) agregación hidrofóbica. Estos procesos se pueden diferenciar por su mecanismo de agregación, y son los primeros dos en la lista los que se discutirán a continuación.

**Coagulación** La coagulación es un proceso fisicoquímico de adición de partículas en suspensión, generalmente sales inorgánicas, que reducen la repulsión entre las partículas que se desean coagular [13]. Este fenómeno se puede dar ya sea por neutralización de carga o por la compresión eléctrica de doble carga que envuelve la partícula en suspensión tal como se puede ver en la Figura 3.6.

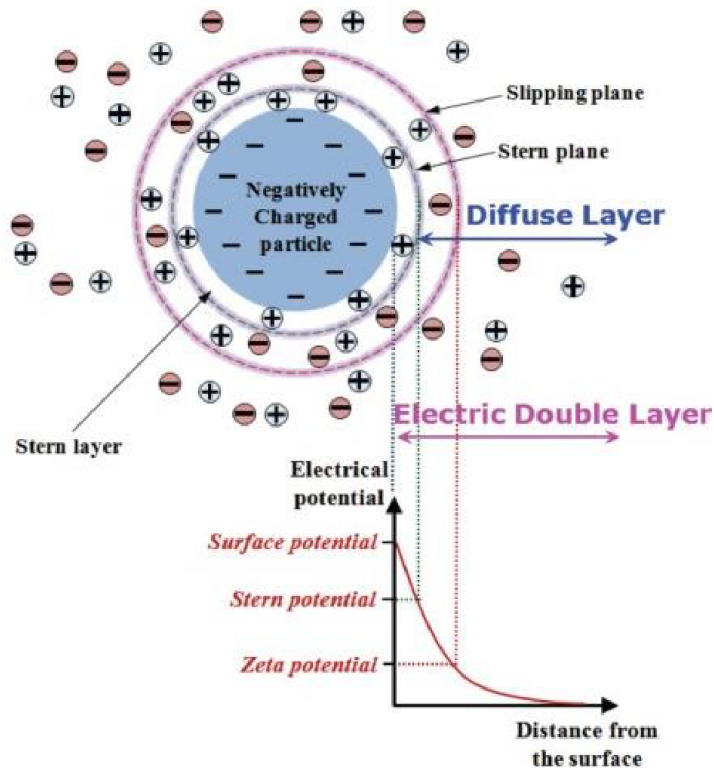


Figura 3.6: Esquema de la doble capa eléctrica que rodea una partícula suspendida en un líquido polar [14].

La doble capa eléctrica que rodea la partícula puede tener un grosor de hasta varios cientos de nanómetros, según la composición del entorno líquido. El potencial de voltaje eléctrico disminuye considerablemente con la distancia desde la superficie de la partícula, y su magnitud se interpreta con las medidas del potencial zeta, que es el potencial en el plano de deslizamiento entre una partícula y el líquido circundante [15].

La interacción entre partículas en una suspensión dispersa se debe a dos tipos de fuerzas; una fuerza de atracción limitada a aproximadamente 10 nm desde la superficie de la partícula llamada Van der Waals, y una fuerza repulsiva relacionada con las cargas superficiales de las partículas. Estas dos fuerzas explican la estabilidad de un coloide en sedimentación. Por ejemplo, si las partículas se aglomeran, significa que las fuerzas electrostáticas son lo suficientemente pequeñas, entonces, las partículas pueden acercarse lo suficiente para que se produzcan las fuerzas de Van der Waals.

Las fuerzas de interacción de la partícula se han cuantificado mediante la teoría de Derjagin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) que explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o separarse combinando dos curvas de repulsión electrostática y atracción de Van der Waals, formando así la curva de energía de interacción neta tal como se puede ver en la Figura 3.7.

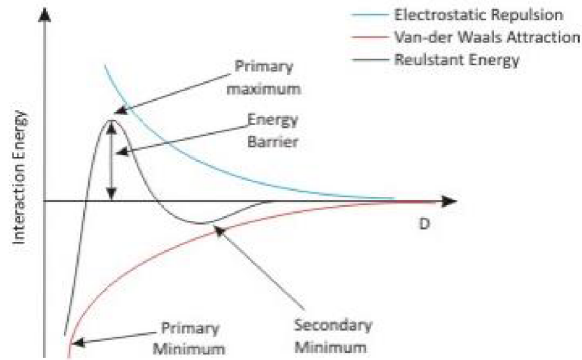


Figura 3.7: Esquema de la Teoría DLVO [14]).

El mínimo primario indica que las fuerzas repulsivas están ausentes, así, las partículas se coagulan de forma rápida e irreversible. El máximo primario actúa como una barrera de activación que debe superarse para que se produzca la coagulación. En otras palabras, a medida que las partículas se acercan, deben chocar con la energía suficiente para superar el máximo primario. El mínimo secundario podría verse como un estado débilmente coagulado, en donde las partículas aún necesitan acercarse con suficiente energía para cruzar la barrera potencial y coagularse en el estado mínimo de energía. La curva neta se puede manipular mediante el pH y la adición de iones, de esta manera se puede disminuir la doble capa de las partículas consiguiendo así la coagulación.

Los principales coagulantes utilizados en la industria minera son las sales de iones metálicos multivalentes como es el caso de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$ . Todos estos iones son absorbidos por la superficie de la partícula para inducir la coagulación, ya sea por neutralización de carga o por compresión eléctrica de doble carga que envuelve la partícula en la suspensión como se explicó anteriormente. La ventaja principal de utilizar este tipo de iones en forma de sales es el menor costo de reactivos en comparación con otros coagulantes más complejos y floculantes. Debido a que usualmente se debe conseguir un control de pH para facilitar la precipitación de los complejos formados, se utiliza cal ( $\text{CaO}$ ) junto con sales de los iones metálicos. Por ejemplo, se adiciona cal junto con los hierros para asegurar la precipitación del hierro como hidróxido [12].

**Floculación** La floculación se define como la aglomeración de partículas mediante la adsorción de polímeros de cadena larga. Los polímeros largos, denominados floculantes se añaden para acelerar la tasa de floculación o la fuerza en la que se forman los flóculos. Dependerá del tipo de floculante adicionado y las partículas en suspensión las aplicaciones y la eficiencia de este proceso [11]. Las variaciones en el rendimiento de la floculación generalmente se pueden atribuir a diferencias de distribución entre las partículas. Por ejemplo, la distribución desigual entre las partículas debido a una mala mezcla de la solución de polímero y la suspensión de éstas puede conducir a un rendimiento deficiente de separación sólido-líquido.

La floculación inducida por polímeros generalmente se produce mediante dos mecanismos:

1. Floculación electrostática: Floculación debida a la neutralización de cargas superficiales entre polímeros de bajo peso molecular y superficies de partículas con cargas opuestas. Conocido como “Mecanismo de Parche”, debido al bajo peso molecular del polímero, éste no es capaz de neutralizar las cargas electrostáticas en toda la superficie de las

partículas suspendidas, por lo que se crean sitios específicos (llamados "parches") en la capa externa de las partículas [17]. Esta área es un espacio específico en la superficie de la partícula donde la carga negativa es neutralizada por grupos funcionales positivos del polímero flocculante tal como se puede apreciar en la Ilustración 10.

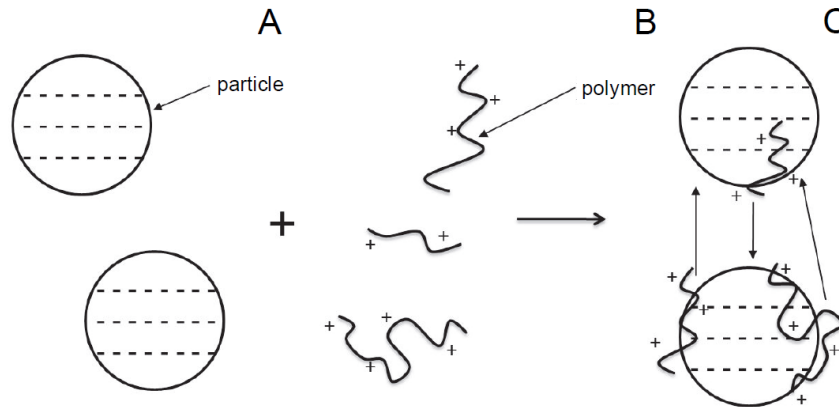


Figura 3.8: Mecanismo de Flocculación electrostática [16]).

1. Floculación de puente: Floculación mayormente utilizada en las operaciones mineras, consistente en moléculas de polímero que se adsorben simultáneamente en más de una partícula como resultado del enlace de hidrógeno entre los grupos activos en la cadena del polímero y los sitios hidroxilados en las superficies de las partículas (ver Figura 3.9). Las moléculas de polímero pueden estar sin carga (no iónicas) o como un polímero aniónico. Para el caso de polímeros aniónicos añadidos a partículas de suspensión cargadas negativamente, como es el caso del estudio a realizar, el mecanismo de formación de puentes puede tener lugar. Sin embargo, deben existir iones metálicos libres presentes en la suspensión líquida. Por ejemplo, iones como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  que actúen como puentes de electrolitos entre el flocculante aniónico y las partículas cargadas negativamente tal como se ve en la Figura 3.10 .

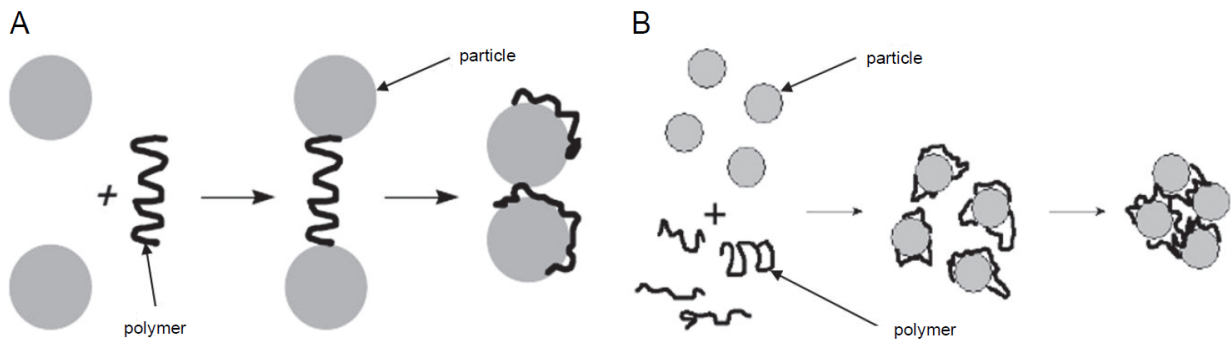


Figura 3.9: Mecanismo del proceso de floculación de puente: A) formación de un puente entre las partículas y el flocculante; B) agregación de partículas unidas por un polímero de cadena larga [11]).



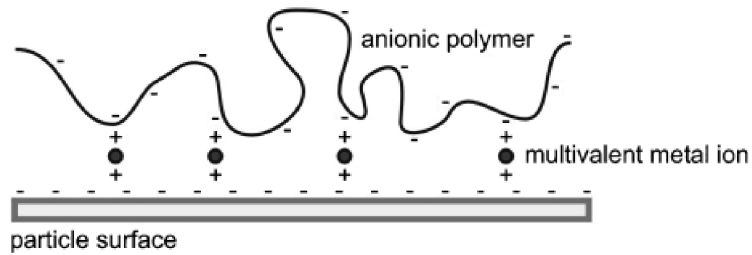


Figura 3.10: Puente de iones metálicos entre la superficie de las partículas cargadas negativamente y un floculante aniónico [11]).

Los floculantes son polímeros solubles en agua con un peso molecular que va de 1000 a 30 millones. Por lo general, se proporcionan como polvos blancos o amarillentos que tienen una vida útil inferior a 12 meses. Si bien, la información específica de la estructura química de los floculantes es información reservada de los proveedores, se sabe que la mayoría de los floculantes poliméricos se basan en la química de la acrilamida. Además, para aquellos floculantes cargados, los sitios son polielectrolitos y se clasifican en aniónicos (con carga negativa), catiónicos (con carga positiva) o anfóteros (con carga negativa y positiva). Aquellos que no llevan sitios de carga se clasifican como no iónicos. En la Figura 3.11 se puede ver la estructura química de los principales tipos de floculantes poliméricos utilizados en la industria minera.

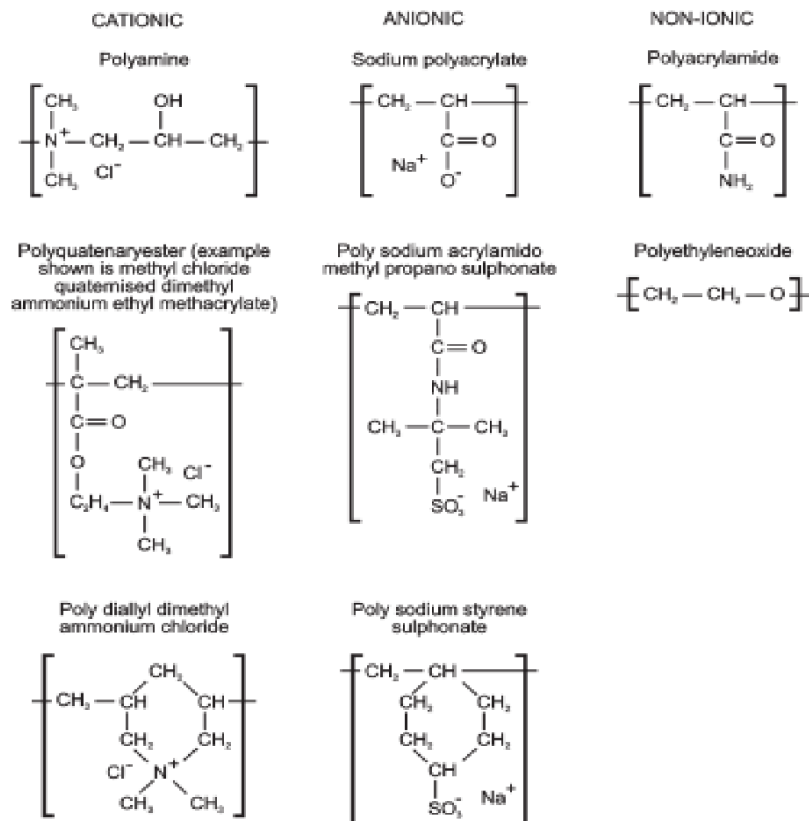


Figura 3.11: Estructura química de los principales floculantes utilizados en la Industria Minera [11]).

Por lo general, existen criterios de selección de floculantes que pueden ser listados como sigue [17]:

- Diseño del equipo espesador que se utilizará.
- Minerales presentes en la alimentación: química de la superficie, concentración, tamaño de partícula.
- Composición química de la suspensión líquida: fuerza iónica, pH.
- Tipo de estructura de flóculo requerida: débil, fuerte o pequeña.

Por otra parte, los floculantes de origen natural han sido utilizados desde hace muchos años, pero su uso se ha reducido debido al elevado costo de fabricación en comparación con los polímeros sintéticos. Los floculantes naturales están hechos de productos animales y vegetales, como polisacáridos (goma guar) [16].

### 3.2. Propiedades de las arcillas y sus efectos en el proceso de espesamiento

Los minerales de arcillas son generalmente filosilicatos de aluminio hidratados, hechos de láminas tetraédricas (T) y octaédricas (O).

Describiendo las láminas tetraédricas, cada tetraedro consta de un catión coordinado con cuatro átomos de oxígeno. Frecuentemente los cationes son  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{Si}^{+4}$ . Estas láminas se unen compartiendo tres esquinas con átomos de oxígeno basales, formando así un patrón de malla hexagonal bidimensional infinito tal cual como se aprecia en la Figura 3.12 .

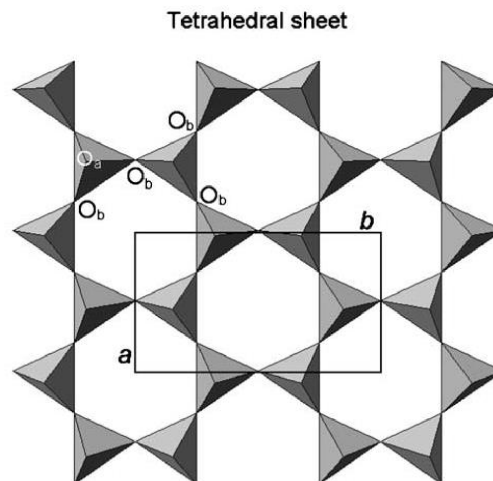


Figura 3.12: Estructura de láminas (T) de arcillas [18].

En el caso de las láminas octaédricas, comprenden seis iones oxígeno o hidroxilo, que comparten aristas octaédricas. Frecuentemente los cationes son  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Al}^{+3}$ . El borde octaédrico compartido forma láminas de simetría hexagonal tal como se ve en la Figura 3.13.

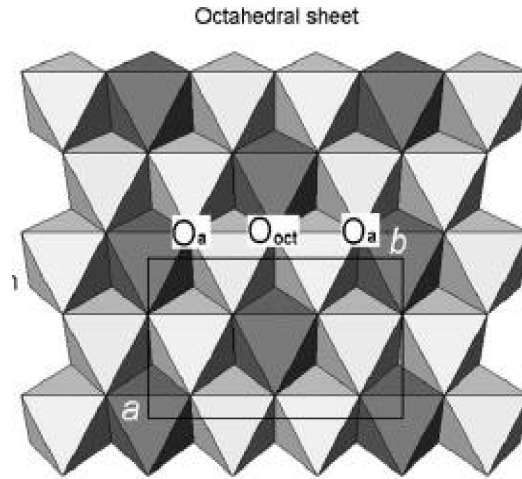


Figura 3.13: Estructura de las láminas (O) de arcillas [18].

Las láminas de T y O están unidas químicamente en ciertas proporciones a través de varios átomos y fuerzas interatómicas para formar una capa unitaria para diferentes macroestructuras de arcilla. Éstas se clasifican en 1: 1 y 1: 2 como sigue:

- El mineral de arcilla 1: 1 consiste en la repetición de una sola hoja tetraédrica (T) unida con una hoja octaédrica (O) como se ve en la Figura 3.14a . El número de capas en una partícula de arcilla dependerá de la naturaleza del mineral proveniente.
- El mineral de arcilla 2: 1 consiste en una sola hoja octaédrica intercalada por un tetraedro en cada lado (Figura 3.14b) . Por lo tanto, la disposición forma una capa que se puede unir a una capa similar a través de cationes de capa intermedia, que se pueden reemplazar por otros cationes []. Este reemplazo catiónico es muy importante ya que las arcillas de este tipo pueden alterarse químicamente y provocar la separación de las capas.

Basado en las estructuras de las capas y sus enlaces, las arcillas que se encuentran con mayor frecuencia en los depósitos de minerales se pueden clasificar en tres grupos: las caolinitas, las esmectitas y las ilitas [18]. No obstante, para la industria minera chilena se debe sumar el cuarzo debido a que es uno de los componentes principales en la alimentación de muchas plantas metalúrgicas chilenas.

El mineral de arcilla de cuarzo, si bien, no responde a ninguna de las dos distribuciones previamente mencionadas, consiste en arreglos de estructuras (T) con fuertes enlaces covalentes entre oxígeno y silicio, tal como se puede ver en la (Figura 3.14c).

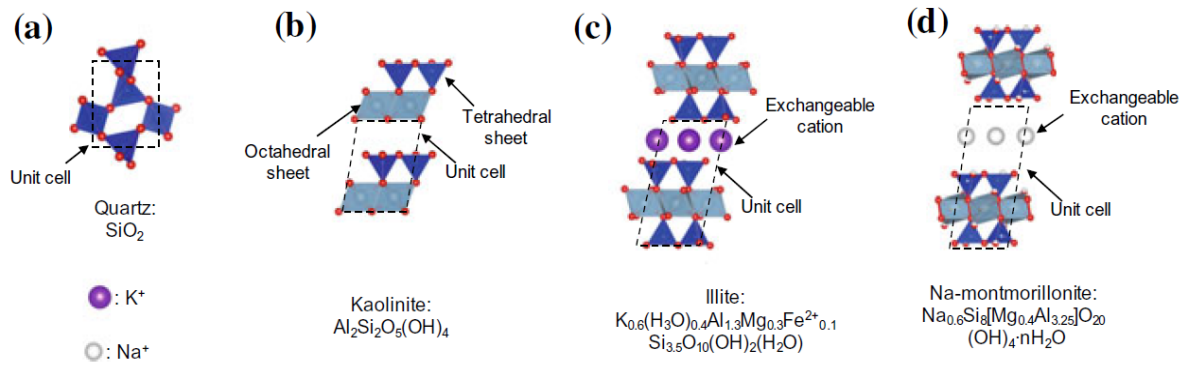


Figura 3.14: Estructura de los principales tipos de arcillas encontrados en la industria minera [18].

Las propiedades de las arcillas que hacen que su presencia dentro de los relaves sea un desafío para el proceso de espesamiento debido a [18] :

- La estructura en capas en escala nanométrica.
- Anisotropía de las capas o partículas.
- Existencia de superficies externas basales y de borde, así como superficies internas entre capas.
- Relativa facilidad con la que se pueden modificar las superficies mediante los procesos de adsorción e intercambio iónico.

En términos generales, los minerales arcillosos chilenos más comunes presentes en los depósitos de mineral se pueden clasificar en tres grupos [8]:

- a) Grupo caolinita: típicamente (1: 1) causa mucho arrastre de ganga y la viscosidad de la suspensión aumenta solo a altas concentraciones (por encima del 10 %).
- b) Grupo esmectita: este grupo (2: 1) es uno de los minerales arcillosos más problemáticos en el procesamiento de minerales ya que aumenta la viscosidad de la pulpa incluso a bajas concentraciones (4 %).
- c) Cuarzo: Este mineral arcilloso tiene el menor efecto negativo en el procesamiento de minerales, ya que la viscosidad no se ve afectada drásticamente.

### 3.3. Efecto de la arcilla en el procesamiento de minerales

Los minerales arcillosos están presentes en muchos minerales principalmente como ganga [19]. Se sabe que el aumento de este tipo de material en el depósito se debe al inevitable agotamiento de los minerales de alta ley, lo que da como resultado más procesamiento de minerales, trayendo consigo minerales complejos y de baja ley. El procesamiento de mineral con alto contenido de arcilla se ha convertido en un desafío para la industria minera debido al bajo rendimiento en varios de los pasos del procesamiento que se pasarán a detallar en esta sección de la investigación.

Investigaciones sobre minerales arcillosos han señalado que el efecto negativo mostrado en el procesamiento de minerales está relacionado con las estructuras de red formadas en suspensión, afectando principalmente la reología de la suspensión [20]. Además, el tipo de estructura que forma la arcilla determinará la complejidad de la viscosidad. Por último, la arcilla no coagulada o dispersa también aumenta la viscosidad de la pulpa debido a su alta superficie. A continuación, se detallará el nivel de afectación de los procesos ante la presencia de arcillas.

### **3.3.1. Molienda y trituración**

En la etapa de trituración, existe una reducción en el rendimiento de la etapa para minerales con alto contenido de arcillas debido a que los ultrafinos se adhieren a los revestimientos y placas de la trituradora mientras tapa la apertura del equipo. Bajo este contexto, se han ideado diversas formas de solucionar el problema. Primeramente, se pensó en una etapa de trituración secundaria, no obstante, presenta limitaciones en el caso de minerales húmedos y/o pegajosos. En este caso, se recomienda saltar la etapa de trituración y continuar el procesamiento con la molienda.

Las arcillas afectan la eficiencia de la molienda y requieren operar el molino con una densidad más baja para eliminar la arcilla de éste. Cuando se trata de la etapa de molienda, las estructuras minerales de arcilla afectan la reología de la suspensión y el límite elástico, lo que se traduce en el aumento del consumo de energía del molino y del sistema de bomba, dificultando la tasa de rotura y la salida de la suspensión en esta etapa. A medida que la presencia de minerales arcillosos aumenta la reología dentro del molino, las operaciones deben realizarse a bajas densidades, lo que lleva a que la etapa de molienda funcione con un rendimiento menor, reduciendo así la capacidad de la planta. Los problemas de transporte están relacionados con el mineral que se pega en la superficie de la cinta transportadora y los revestimientos de la bomba, ya que los minerales arcillosos son bastante pegajosos en presencia de agua. Para abordar este problema, se requiere incrementar la dilución de las pulpas para facilitar el transporte a través de las cintas transportadoras y los sistemas de bombeo. Además, el problema de reología en la etapa de molienda se puede abordar añadiendo aditivos de reología como auxiliares, tales como polímeros de bajo peso molecular solubles en agua o el uso de Soda Caustica. De esta manera, las operaciones de la planta se mantienen a baja viscosidad y densidad para facilitar el transporte de pulpa para la siguiente etapa de procesamiento de minerales.

### **3.3.2. Clasificación y concentración**

Para la etapa de clasificación del mineral, el dispositivo centrífugo utiliza el movimiento y las diferencias de gravedad de las partículas para lograr la separación del valioso mineral de la ganga. Sin embargo, esta separación puede verse afectada negativamente en presencia de arcilla, ya que alteran la reología de la suspensión dificultando así el movimiento de las partículas y presentando inconvenientes para mantener las diferencias de gravedad específica para lograr la separación de partículas [21].

No obstante, algunos estudios afirman que mediante el uso de equipos de concentración de gravedad centrífugas como el concentrador Knelson, los minerales de arcilla se pueden

eliminar de manera efectiva de la corriente de procesamiento [22]. Los minerales de arcilla no son un material denso, por lo tanto, se pueden separar de los materiales más densos a altas velocidades de agitación y cizallamiento. Desafortunadamente, los concentradores Knelson no se utilizan en la industria minera del cobre, y su uso se radica principalmente en la industria del oro por su buena capacidad para recuperar el metal a bajo costo e impacto ambiental.

### 3.3.3. Pilas de lixiviación

La lixiviación es una de las técnicas hidrometalúrgicas más económicas para concentrar diferentes metales como cobre, oro, níquel, uranio, entre otros [15]. El taponamiento del espacio poroso es el factor más importante para disminuir la recuperación de los minerales económicos a medida que se reduce la permeabilidad del mineral. El alto contenido de arcilla es uno de los mecanismos que impulsan el taponamiento en las operaciones de lixiviación y el alto consumo de reactivos. De esta manera, se han descrito tres mecanismos para los minerales arcillosos que obstruyen la lixiviación en pilas:

- a) Migración de partículas ultrafinas: Ocurre principalmente en arcillas que no se hinchan como la Caolinita (1:1). Estas partículas tienden a desprenderse de la superficie de la roca y migrar, así pueden quedar atrapadas en la garganta del poro (Pore Throat), causando una disminución en la permeabilidad de los poros de las partículas tal como se puede ver en la Figura 3.15.



Figura 3.15: Representación de la migración de partículas ultrafinas [15].

- b) Hinchamiento de arcillas: Ocurre en arcillas como las esmectitas (2:1), las cuales pueden hincharse con el agua, aumentando su volumen y reduciendo así el área efectiva del poro, provocando la reducción de la permeabilidad del mineral como se ve en la Figura 3.16.



Figura 3.16: Representación gráfica del Hinchamiento de arcilla [15].

- c) Migración de minerales de arcilla inducida por el hinchamiento: Mezcla de los dos efectos descritos anteriormente, ocurre cuando se presentan más de un tipo de arcillas en la solución. Aquí las partículas de arcilla se hinchan mientras que otras se

desprenden en el proceso, aumentando las posibilidades de que el poro se obstruya tal como se ve en la Figura 3.17.



Figura 3.17: Representación gráfica de la Migración de arcillas inducida por el Hinchamiento [15].

### 3.3.4. Flotación

Se ha demostrado que la eficiencia en el proceso de flotación se ve afectada negativamente ante la presencia de arcillas [23]. Existe una amplia documentación de los problemas de los minerales arcillosos en la flotación:

- a) Modificación de la reología: La presencia de los minerales arcillosos influyen directamente en la modificación de la viscosidad de la suspensión. La modificación de la reología en flotación tiene varias consecuencias directas en la hidrodinámica de la célula. Por ejemplo, el aumento de la viscosidad reduce la retención de gas, disminuye la movilidad de las partículas y las burbujas, de esta manera reducen la probabilidad de colisión entre partículas/burbujas y reduce el rendimiento de flotación [8]. La modificación hidrodinámica dependerá tanto del tipo como de la concentración de minerales arcillosos. Por ejemplo, se ha evidenciado que la esmectita se hincha a concentraciones sobre el 5 % mientras que la caolinita que no presenta hinchazón [23].
- b) Recubrimiento de limo: El término limo se refiere a un fenómeno coloidal causado por partículas muy finas de mineral que no constituyen en el tamaño de corte. Estas partículas permanecen suspendidas entre las burbujas y agua y son recuperadas por arrastre. Las partículas tienden a recubrirse cuando hay una atracción electrostática debido a las diferencias de cargas en la superficie de la partícula. En condiciones de flotación, los minerales arcillosos tienen una carga negativa en la mayoría de los valores de pH utilizados. Por lo tanto, cuando las superficies minerales valiosas están cargadas positivamente, hay muchas posibilidades de que la arcilla cubra la superficie mineral deseada, lo que restringe la adsorción del colector y dificulta la unión de las partículas de burbujas. Los minerales de sulfuro tienden a cargarse positivamente cuando se oxidan y así, el recubrimiento de arcilla puede ocurrir debido a las diferencias de carga. Por ejemplo, se observó que la flotación de la calcocita se dificultaba debido al revestimiento de bentonita (esmectita) ya que las superficies de las partículas de calcocita se cargan ligeramente positivamente en la etapa de molienda debido a la oxidación [24].
- c) Arrastre mecánico: el arrastre de partículas es el mecanismo por el cual las partículas de lodo se acumulan en el concentrado de flotación cuando quedan atrapadas en el agua entre el movimiento de las burbujas, y no implica selectividad. El arrastre

depende de parámetros como la recuperación de agua, el caudal de gas, la reología y el tamaño de las partículas [7]. Además, es más probable que el arrastre se produzca en partículas de tamaño inferior a  $30 \mu\text{m}$ , por lo que los minerales arcillosos son el candidato perfecto para el arrastre en el concentrado de flotación dado su tamaño por debajo de  $2 \mu\text{m}$ . La principal implicación del arrastre de arcilla es que reduce la ley del mineral que se desea extraer.

- d) Estabilidad de la espuma: la estabilidad de la espuma es muy importante en el rendimiento de la flotación. Si la espuma es inestable significa que no puede retener el material recuperado y colapsará antes de la acumulación de espuma, lo que provocará que el material recogido caiga nuevamente en la pulpa. Por otro lado, una capa de espuma demasiado estable dará lugar a problemas relacionados con la manipulación y el transporte, aumento del arrastre de ganga y, por lo tanto, reducirá la calidad mineral económica en el concentrado. En este escenario, los minerales arcillosos pueden aumentar o disminuir la estabilidad de la espuma. Por ejemplo, se ha estudiado que la estabilidad de la espuma mejora en presencia de caolinita [25]. Sin embargo, la estabilidad de la espuma disminuyó con la adición de bentonita debido a que la viscosidad aparente aumenta ya que la bentonita es una arcilla que se hincha, por lo tanto, da como resultado una dispersión de burbujas deficiente dada la posibilidad de que la bentonita absorba el espumador en su superficie [25]. Por otro lado, la mejora de la estabilidad de la espuma en presencia de minerales de caolinita. Dado que existen observaciones contradictorias sobre el efecto de la arcilla sobre la estabilidad de la espuma, no se puede concluir sobre si el efecto de la presencia de arcillas es beneficioso o contraproducente para la estabilidad de la espuma.

Hoy en día, la industria chilena del cobre ha estado proyectando abordar los problemas de la arcilla utilizando flotación selectiva de minerales arcillosos en puntos clave de la mina. Al agregar una flotación selectiva en este último punto, se puede mejorar la sedimentación de partículas, la calidad del agua recuperada y filtrada, y disminuir la cantidad de agua enviada al depósito de relaves. Junto con esto, se pueden recuperar metales adicionales que no se recuperarían en un proceso de flotación tradicional.

A pesar de las evidentes ventajas, la puesta en marcha de una flotación selectiva, ésta requiere una planificación que engloba investigaciones para desarrollar estrategias operativas de flotación de partículas finas y ultrafinas, análisis de costos y puesta en marcha de una nueva etapa de planta. Actualmente, no existen minas chilenas que hayan implementado alguna de las soluciones arcillosas mencionadas anteriormente, ya que el mineral arcilloso que dificulta el procesamiento de minerales sigue siendo una materia poco investigada en la industria.

### **3.3.5. Espesamiento, filtración y disposición de relaves**

La etapa de espesamiento es utilizada para separar los sólidos del agua. De esta manera, el agua se recupera y se puede reutilizar en la planta de procesamiento una vez más. Además, se dijo que los floculantes se utilizan para promover la sedimentación de las partículas, ya que favorece la generación de agregados de partículas, mejorando el rendimiento del proceso. Sin embargo, la presencia de minerales arcillosos en el proceso



es capaz de reducir la eficiencia del proceso atribuyendo menores tasas de asentamiento de sólidos. La menor tasa de asentamiento de los minerales arcillosos es el resultado de las partículas finas  $< 2 \mu\text{m}$ , la forma de las partículas anisotrópicas y la baja densidad que, en consecuencia, afectan la tasa de asentamiento [7]. Esta situación puede generar un desbordamiento (Overflow) sucio que puede causar problemas con los procesos posteriores. Cuando se recupera el desborde de agua sucia, el primer problema se refleja en el sistema de impulsión donde el agua recuperada se bombea nuevamente hacia la planta de concentración. Las principales consecuencias de este lodo sólido en el sistema de bombeo son:

- a) Los revestimientos de la bomba se dañan ya que los sólidos finos aumentan la abrasión. Además, el material de revestimiento solo se considera para operaciones con agua y no en forma de pulpa. Por lo tanto, la vida útil del revestimiento dura menos, lo que hace que la planta deje de reemplazar el revestimiento y, por lo tanto, se gaste más tiempo y dinero [26].
- b) Los sólidos presentes en el sistema de bombas se ensucian con el agua nueva que llega, de esta manera los sólidos finos son devueltos al proceso, generando problemas en el área concentradora [7].
- c) Consume tiempo del operador del espesador, ya que es el encargado de retirar manualmente los lodos sólidos de la casa de bombas [26].

Además, los minerales arcillosos aumentan el límite elástico de sedimentos en la descarga del espesador, lo que lleva a un aumento en el consumo de energía del sistema de agitación y los sistemas del circuito de bombeo. Esto se atribuye a que las arcillas hinchadas aumentan el límite elástico de los sedimentos en la descarga al absorber agua en su capa intermedia. Lo que a su vez aumenta el torque del sistema de agitación del espesador, causando eventualmente paradas no programadas [8].

En otras industrias mineras, como las del hierro, previo al proceso de espesamiento existe un proceso de filtración del agua. El filtrado opera a través de diferencias de presión que se aplica a la suspensión mientras pasa al medio filtrante. No obstante, cuando se trata de filtrar descargas con alto contenido en arcilla, el medio filtrante reduce su porosidad y permeabilidad, lo que resulta en una baja filtrabilidad, disminuyendo el rendimiento de la operación además del aumento de la humedad en la torta filtrada, lo que aumenta el costo de transporte y almacenamiento [27].

Inmediatamente después del proceso de espesamiento y filtración, se envía al tranque de relaves a través de una tubería. El material espesado y filtrado enviado a la presa está compuesto por 50–70 % de partículas en un rango de tamaño de 10–120 micrones y el resto es agua. El propósito de establecer el estanque de relaves es almacenar relaves de manera segura para proteger el medio ambiente, por lo que mantener el estanque de relaves seguro y estable es uno de los desafíos más importantes en todo el proceso minero. Cuando el material de lodo que se descargará en el dique de relaves contiene una gran cantidad de arcilla, pueden surgir dos consecuencias principales que pueden llevar a fallas:

- a) Se necesita un tranque de relaves de mayor tamaño: Producto de los problemas en las etapas anteriores, se pierde una gran cantidad de agua, por consiguiente, más agua va al tranque de relaves aumentando su altura. Además, si la permeabilidad

del tranque es baja, el agua se descarga a un ritmo lento, lo que podría resultar el desbordamiento del relave, que afectaría drásticamente la estabilidad de éste, aumentando así las probabilidades de colapso del relave [28].

- b) Inestabilidad geotécnica: Este punto está relacionado con los cimientos del suelo donde se asienta el dique de relaves. Cuando los cimientos del dique de relaves contienen una gran cantidad de arcilla mineral, la permeabilidad disminuye a medida que la arcilla absorbe el agua, por lo que la presión de los poros de la arcilla aumenta y la tensión efectiva disminuye. La tensión efectiva es la fuerza que mantiene rígida una colección de partículas, por lo que, si la tensión efectiva disminuye, puede generar que la superficie se deslice corriente abajo generando una falla en el dique de relaves. Un ejemplo de este tipo de falla ocurrió en la mina Los Frailes, España en 1998 [28]. El Tranque de relaves falló debido a que los cimientos del enrocado se deslizaron hacia adelante. Además, el tranque de relaves se construyó sobre una superficie de arcilla de alta plasticidad carbonatada, conocida como arcillas azules del Guadalquivir [28]. En el diseño del depósito no se consideró el espesor y la falta de permeabilidad de la arcilla, por lo que la tasa de agua que fluía fuera de la presa de relaves fue lenta, generando inestabilidad en el suelo y, finalmente, el suelo se deslizó río abajo.

# Capítulo 4

## Metodología

En el presente apartado se presenta la metodología utilizada para el desarrollo experimental del proceso de sedimentación de relaves artificiales con presencia de ultrafinos.

### 4.1. Materiales y métodos

Para cumplir con los objetivos de este estudio, fue necesario diseñar protocolos experimentales en los que fuera posible evaluar no solo el contenido de minerales arcillosos en una solución de relave artificial, sino también experimentar el comportamiento de la sedimentación y floculación de partículas, bajo diferentes condiciones y tipos de aditivos. Por lo tanto, este capítulo tiene por objeto proporcionar una caracterización completa de la muestra, así como una descripción de las mediciones de mineralogía realizadas. Además, en este capítulo se desarrolla una descripción detallada de la metodología utilizada en este estudio y un resumen de los experimentos realizados.

#### 4.1.1. Muestras de relave artificial

Para este trabajo se utilizó una mezcla de relave artificial consistente en material grueso y fino como se detalla a continuación:

- a) Material Grueso: El material grueso a utilizar fue cuarzo. Este fue obtenido de un proveedor local y está caracterizado como se puede ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características del material grueso utilizado en el estudio. Este material fue caracterizado por parte del proveedor. [29].

Propiedad	Descripción
Composición Química	$SiO_2$ : 97 %
	$Al_2O_3$ : 0.8 %
	Feldespatos: 0.9 %
	Mica: Trazas
Densidad Aparente	1.6 [ $t/m^3$ ]
Densidad Específica	2.5 [ $t/m^3$ ]

b) Material Fino: El material fino utilizado para este estudio está compuesto por Caolinita, Bentonita y Cuarzo. Los dos primeros fueron obtenidos directamente por proveedores locales, mientras que el cuarzo fue conseguido posterior a un proceso de conminución por molino de bolas. Las principales composiciones de estos materiales están descritos y caracterizados previamente por [29] y se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características del material fino utilizado en el estudio, previamente caracterizado por [29].

Propiedad	Descripción		
	Cuarzo	Montmorillonita sódica.	Caolinita
<b>Fórmula Química</b>	$SiO_2$	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
<b>Composición Química</b>	$SiO_2$ : 97 %	Montmorillonita: 92 %	Caolinita: 93.5 %
	$Al_2O_3$ : 0.8 %	Cuarzo: 3 %	Cuarzo: 6.5 %
	Feldespatos: 0.9 %	Feldespatos: 5 %	
	Magnetita: Trazas		
<b>Densidad Aparente</b>	1.6 [t/m <sup>3</sup> ]	2.6 [t/m <sup>3</sup> ]	2.6 [t/m <sup>3</sup> ]
<b>Densidad Específica</b>	2.5 [t/m <sup>3</sup> ]	0.8 [t/m <sup>3</sup> ]	0.47 [t/m <sup>3</sup> ]
<b>pH</b>	6.78	7.85	5.13

El relave sintético preparado para este estudio responde a la siguiente composición en masa:

- El 80 % en porcentaje peso-peso del relave está compuesto por el material grueso de  $SiO_2$ , tamizado bajo malla #140 (es decir, sobre los 0.105 [mm]) en tres oportunidades, con el fin de asegurar el mínimo de componentes finas en éste.
- El 20 % peso-peso restante lo compondrán fracciones de arcillas ultrafinas o grueso, correspondiente al mismo material del 80 % de la mezcla, según dependa el caso. Se denominaron las muestras con contenido de arcilla y gruesos como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Composición de relaves artificiales utilizados en este estudio, previamente definidos por [29].

<b>Denominación de fracción fina</b>	<b>Composición de fracción fina añadida (20 % del total)</b>	<b>Composición en p/p de todo el relave</b>
<b>SF</b>	Sin finos añadidos	100 % Grueso 80 % Grueso
<b>MM</b>	100 % Bentonita	20 % Bentonita 80 % Grueso
<b>KK</b>	100 % Caolinita	20 % Caolinita 80 % Grueso
<b>QQ</b>	100 % Cuarzo fino	20 % Cuarzo Fino 80 % Grueso
<b>MK</b>	50 % Bentonita 50 % Caolinita	10 % Bentonita 10 % Caolinita 80 % Grueso
<b>MQ</b>	50 % Bentonita 50 % Cuarzo Fino	10 % Bentonita 10 % Cuarzo Fino 80 % Grueso
<b>KQ</b>	50 % Cuarzo Fino 50 % Caolinita	10 % Cuarzo Fino 10 % Caolinita

#### 4.1.2. Composición del agua a utilizar en el estudio

Debido a que uno de los objetivos del trabajo es comparar el rendimiento de la sedimentación en agua, y dado el creciente interés de utilización de agua de mar para el proceso de extracción de cobre, se desarrollaron los experimentos tanto para agua destilada como para agua de mar sintética. Esta última fue producida según [30]. La composición del agua sintética utilizada en este trabajo está descrita en la Tabla 4.4 Todos los compuestos utilizados son de grado técnico:

Tabla 4.4: Composición de agua de mar sintética utilizada para este estudio [30].

Compuesto	Composición [% [p/p]]
NaCl	2.393
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.401
KCl	0.068
NaHCO <sub>3</sub>	0.02
KBr	0.01
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.003
NaF	$3 \cdot 10^{-4}$
MgCl <sub>2</sub>	1.083
CaCl <sub>2</sub>	0.152
SrCl <sub>2</sub>	0.002

Se realizaron mediciones de las propiedades generales del agua de mar sintética. Su promedio más la desviación estándar asociada se pueden ver en la Tabla 4.5. Es importante destacar que para mantener la uniformidad del estudio, se sintetizó agua de mar solo una vez para la realización de los distintos análisis posteriores.

Tabla 4.5: Propiedades medidas del agua de mar sintética utilizada en este estudio.

Propiedad	Descripción
pH	$7.16 \pm 0.11$
Conductividad	$5.04 \pm 3.47[mS/cm]$
Densidad	$1.025 \pm 0.38[t/m^3]$

Junto con esto, se utilizó Agua destilada para el análisis del rendimiento de la operación. Esta agua fue obtenida desde el Laboratorio de Polímeros de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y presentó las propiedades promedios descritas en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6: Propiedades promedio del Agua destilada utilizada en este estudio.

Propiedad	Descripción
pH	$5.76 \pm 1.45$
Conductividad	$0.67 \pm 1.02[mS/cm]$
Densidad	$1.001 \pm 0.07[t/m^3]$

### 4.1.3. Otros reactivos utilizados

Además de los ya descritos anteriormente, se utilizaron aditivos, ya sean floculantes y coagulantes para evaluar el rendimiento de la sedimentación. Estos se describen en la

presente sección.

- a) Floculante: El floculante utilizado durante el desarrollo de este trabajo de tesis fue el SNF704. Este es un floculante del tipo Poliacrilamida Aniónica (PAM). Presenta las características enunciadas en la Tabla 4.7 (entregadas por proveedor):

Tabla 4.7: Características del floculante SNF704 utilizadas en el estudio [31]

Característica	Descripción
Peso Molecular	Utra alto ( $> 1.8 \cdot 10^7$ ) [g/mol]
Concentración de trabajo recomendada para solución madre	5 [g/L]

- b) Coagulante: Se utilizaron como coagulantes  $MgCl_2$  y  $CaCl_2$  de grado técnico. Las características principales están presentadas en la Tabla 4.8. (entregadas por el proveedor [32], [33]).

Tabla 4.8: Características de los coagulantes utilizados en el estudio [32], [33]

Propiedad	Descripción	
	$MgCl_2$	$CaCl_2$
Composición Química	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$
Peso Molecular [g/mol]	203.3	147.01

## 4.2. Equipos y procedimientos usados

### 4.2.1. Caracterización de la velocidad de sedimentación y turbidez del sobrenadante

Para poder comparar los procesos de sedimentación de las distintas condiciones, ya sea en composición de relaves artificiales, tipo de agua que se utiliza y concentración de aditivos, sean estos floculantes o coagulantes, se estimó la velocidad de sedimentación y la concentración de sólidos del sobrenadante a través de pruebas de sedimentación batch en probeta.

El método, de amplia utilización a nivel experimental [34], busca la medición de la velocidad de reacción a partir de la altura de la interfase sólido-líquido en el tiempo. Para esto, se dispone una mezcla de sólidos, compuesta por gruesos y ultrafinos agitada previamente a 300 [rpm] por 5 minutos y agua (destilada o de mar) en una probeta de 250 ml.

Luego, se dispone la muestra a contraluz de una luz led y se coloca a 30 [cm] de la pantalla una cámara digital de alta resolución en escala de grises con el objetivo de registrar grabaciones de la sedimentación posterior adición de aditivos tal como se puede ver en

la Figura 4.1. Inmediatamente posterior a la incorporación de los aditivos químicos se utilizó un émbolo diseñado para la probeta, que mezclaba de forma vertical la mezcla, facilitando el contacto entre aditivo y relave mezclado. Este proceso se repitió en 3 ocasiones.

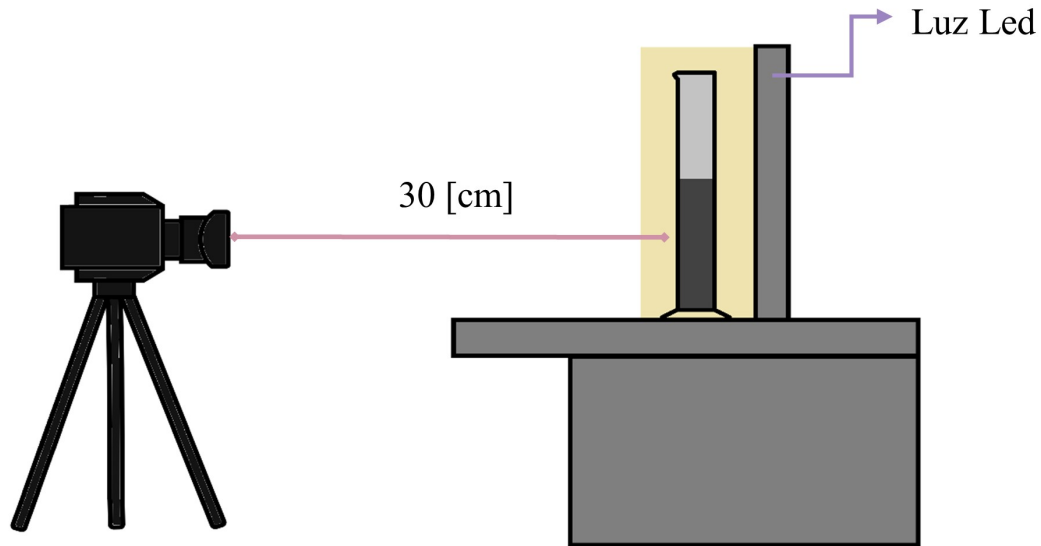


Figura 4.1: Montaje experimental para el registro de la velocidad de sedimentación. Elaboración propia, basado en [35].

El cálculo de la velocidad de sedimentación se realiza a partir de la comprensión del proceso de sedimentación por acción de la gravedad. Al disponer la pulpa en una probeta de forma momentánea se forma una disolución homogénea como se ve en la Figura 4.2. Tras la adición de un floculante/coagulante existe una separación de fases en las que se pueden distinguir: Sobrenadante "limpio" (A), correspondiente a una zona líquida de baja concentración de sólidos, Sólido asentado (C), definida como cuerpos de sólidos que yacen en la zona inferior de la probeta producto de la reacción de adición y/o acción de la gravedad y una zona intermedia de suspensión (B). En las partes finales del proceso se puede apreciar una zona de mayor compactación en el fondo de la probeta que se denomina zona (D).



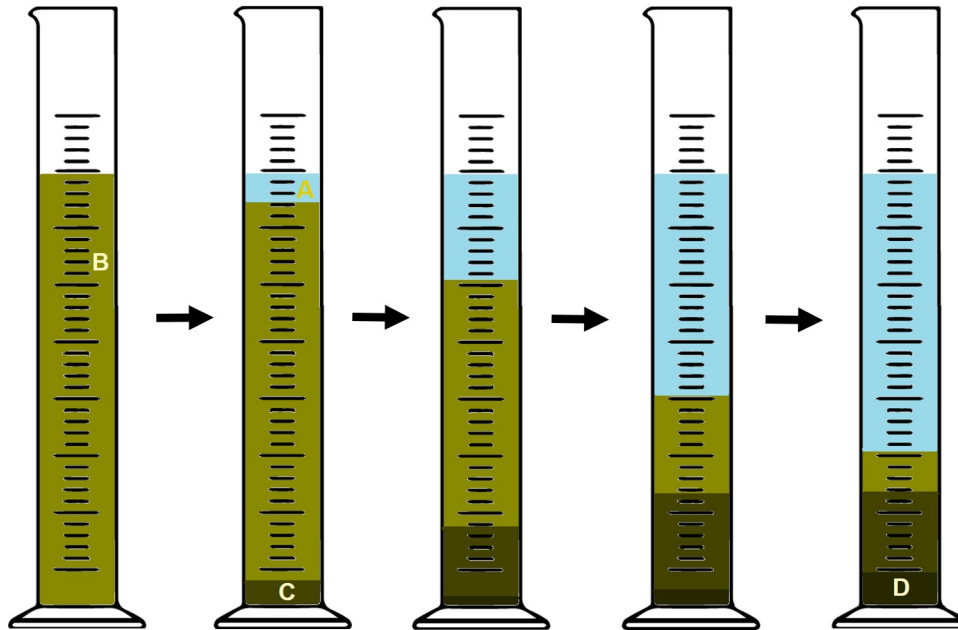


Figura 4.2: Ilustración de proceso de sedimentación por gravedad en probeta. Elaboración Propia basada en [36].

En el caso de la sedimentación de sólidos gruesos y finos, dependiendo del tipo de arcilla, la zona A en las primeras etapas puede ser turbia debido a la materia finamente dividida que queda en suspensión. Posteriormente, este material muy fino sedimenta y el líquido se vuelve transparente, aunque hay casos en los que permanece turbio durante mucho tiempo. Este comportamiento se atribuye a la fracción ultrafina o coloidal presente en la mezcla, tal cual lo indicó [37] para suspensiones de caolinita.

Con el funcionamiento intermitente propuesto en este trabajo, cualquiera de las etapas descritas en los párrafos anteriores puede representar la condición en el espesador dependiendo del tiempo que se ha dejado sedimentar la solución [11].

Con el fin de describir este proceso de la forma más estandarizada posible, se determinó la velocidad de sedimentación a partir de los primeros 6 segundos tras la adición de floculantes y desde los 6 minutos para el caso de los coagulantes. Para esto, se midió la diferencia de altura de la interfase A-B con respecto al tiempo y se graficó. La recta que define la velocidad de sedimentación constante será la considerada para el cálculo de esta velocidad como se puede ver en la Figura 4.3. Es importante destacar que se aprecia un aumento en la altura de la suspensión inmediatamente agregado el floculante/coagulante. Esto se puede explicar dada la turbulencia remanente del proceso de agitación para promover el proceso de floculación/coagulación.

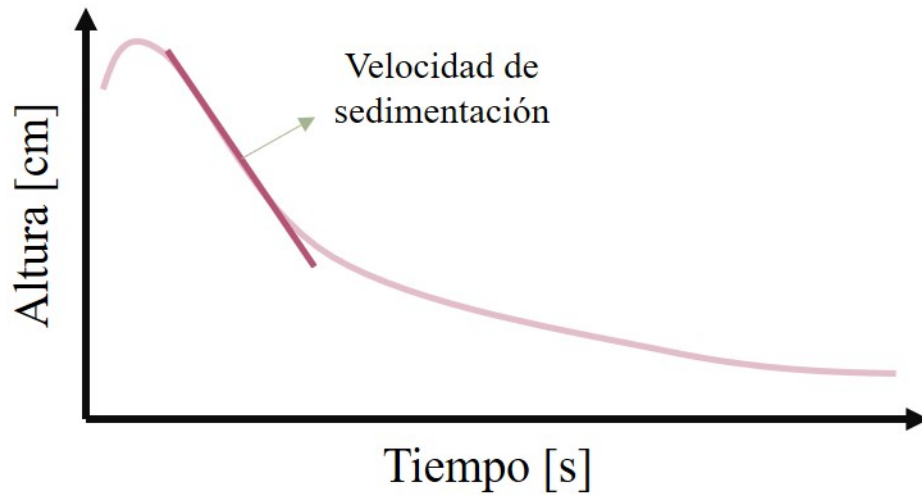


Figura 4.3: Representación gráfica de la velocidad de sedimentación por gravedad en probetas.

En la operación de espesadores continuos, la alimentación de la pulpa fina en el centro del tanque, el desbordamiento de líquido claro en la periferia del tanque y la descarga de la pulpa espesada en el fondo son generalmente continuos.

#### 4.2.2. Concentración de sólidos en el sobrenadante

Se estimó la concentración de sólidos en el sobrenadante siguiendo el siguiente procedimiento:

- Tras 5 minutos iniciada la sedimentación, se extraen 10 ml de sobrenadante de la zona más superior posible. La idea es no tocar la zona en donde existen flóculos, por lo que se deberá ajustar la extracción en el caso de que sean menos de 10 ml el sobrenadante.
- Se mide la turbidez con un turbidímetro. Para este estudio se utilizó el Turbidímetro HI-93703 de Hanna Instruments.
- Con el objetivo de asociar la turbidez del sobrenadante con la concentración de sólidos en éste, se realizó para cada tipo de relave sintético una curva de calibración: Para cada tipo de configuración de relave y tipo de agua se midió la turbidez de la concentración de 0.1, 0.3, 0.5 y 1 [g/L]. Con estos datos se genera una regresión lineal y se obtienen parámetros para relacionar la turbidez con concentración de sobrenadante, tal como se muestra en la Figura 4.4.

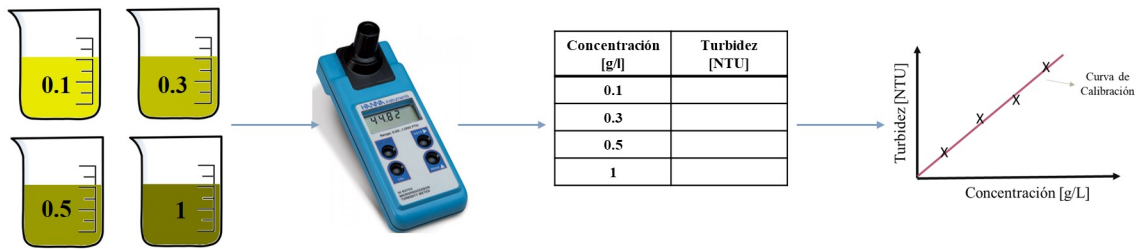


Figura 4.4: Esquema de obtención de curvas de calibración.

### 4.2.3. Potencial zeta

Para el cálculo del potencial zeta se utilizó el equipo Stabino® Particle Metrix (Figura 4.5). Aquí, el sobrenadante del proceso de sedimentación tras 5 minutos de reacción se vierte en la celda de medición y se calcula, mediante un amplificador de señal y un convertidor análogo-digital el potencial zeta durante 3 minutos con intervalos de 5 segundos. Se consideró el valor de este potencial como el promedio pasados los 2 minutos (es decir, 12 datos). Esto es debido a que una de las recomendaciones del uso de este equipo es esperar 120 segundos para regularizar la medición. Es importante destacar que se utilizó un pistón de  $100[\mu m]$  dadas las especificaciones del fabricante para la medición de potencial zeta de arcillas o ultrafinos.



Figura 4.5: Equipo Stabino® Particle Metrix, utilizado para medición de potencial zeta y pistón de 100 nm usado en los experimentos.

## 4.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental aplicado a lo largo de este trabajo fue:

- a) Diseño de protocolos de laboratorio: Medición de velocidad de sedimentación, turbidez del sobrenadante, potencial zeta y distribución del largo de partículas.

- b) Preparación de Relaves Sintéticos.
- c) Caracterización física de los reactivos a utilizar:
  - 1) Medición de pH.
  - 2) Caracterización granulométrica por FBRM de los relaves sintéticos previo proceso de adición de floculantes/coagulantes.
- d) Preparación de agua de mar. Para asegurar la uniformidad en los resultados se preparó suficiente agua de mar para la realización de todos los experimentos en triplicado.
- e) Desarrollo de las curvas de calibración de todas las configuraciones de relaves sintéticos en agua destilada y agua de mar.
- f) Medición de velocidad de sedimentación:
  - 1) Grabación de sedimentación discontinua.
  - 2) Procesamiento de imágenes en base a herramientas computacionales.
- g) Medición de Concentración de sólidos en el sobrenadante:
  - 1) Tras 3 minutos iniciada la sedimentación extraer 50 ml de sobrenadante.
  - 2) Usar 10 ml de éste y medir su turbidez.
  - 3) Utilizar la calibración para relacionar turbidez y concentración de sólidos en el sobrenadante.
- h) Medición de potencial zeta de sobrenadante:
  - 1) Utilizar 20 ml de sobrenadante para la medición de potencial zeta, corroborando medir al menos 3 minutos.
  - 2) Debido a que el pHímetro del equipo presentaba fallas, se mide el pH con un equipo externo a éste.

#### 4.4. Parámetros de eficiencia de sedimentación

Con el objetivo de cuantificar la variación en la eficiencia de sedimentación, se considerará como caso base el óptimo operacional de concentración de relave sintético y dosis de floculante para el caso sin fino (SF) y se comparará la eficiencia de la sedimentación con la adición de floculante/coagulante mediante la definición de los siguientes parámetros:

- a) Eficiencia de sedimentación en función de la velocidad de sedimentación:

$$\eta_{S/L} = \frac{V_{s_{arcilla}}}{V_{s_{sinfinos}}} \quad (4.1)$$

Donde  $V_s$  representa la velocidad de sedimentación en el tramo lineal.

- b) Eficiencia de sedimentación en función de la concentración de finos en el sobrenadante comparando con el caso sin finos (Blanco).

$$\eta_{S/L} = \frac{C_{arcilla}}{C_{sinfinos}} \quad (4.2)$$

Donde  $C$  representa la concentración de sólidos en el sobrenadante.

## 4.5. Hipótesis

La hipótesis de este estudio propone el efecto de 4 variables independientes: El tipo de arcilla presente en el relave artificial, el tipo de operación (floculación, coagulación y floculación-coagulación) la dosis de floculante y el tipo de agua con la que se esté trabajando sobre dos variables dependientes, denominados desempeño de sedimentación: La velocidad de sedimentación o tasa de asentamiento y la remoción de sólidos del sobrenadante.

- a) Hipótesis 1: El tipo de arcilla afecta el desempeño de la tasa de sedimentación y remoción de sólidos del sobrenadante.
- b) Hipótesis 2: La operación de floculación o coagulación tendrá diferentes índices de desempeño dependiendo del tipo de arcilla presente en el relave artificial.
- c) Hipótesis 3: A mayor dosis de floculante, mejor será el desempeño de sedimentación.
- d) Hipótesis 4: Dependiendo del tipo de agua y de arcilla presente en el relave, el desempeño de sedimentación será mayor o menor. Por evidencia, para relaves con presencia de caolinita, se debería ver un aumento en el desempeño de sedimentación en agua de mar, y para los con bentonita sódica, el mayor desempeño se debería dar en agua destilada.
- e) Hipótesis 5: Existirá para un tipo de arcillas un óptimo operacional combinando las operaciones de coagulación y floculación.

# Capítulo 5

## Resultados y discusión

En el siguiente apartado se presentan los principales resultados y discusiones del estudio. Para esto, se presentan los resultados de la siguiente forma:

- Curva de calibración para relacionar turbidez y concentración de Ultrafino.
- Estudio de proceso de sedimentación sin finos (SF).
- Caracterización de  $C_p$ /dosis de floculante óptima para el estudio.
- Sedimentación de relaves sintéticos con presencia de arcillas, sin aditivos.
- Proceso de Floculación de relaves sintéticos con presencia de arcillas.
- Coagulación de Relaves Sintéticos con presencia de arcillas.
- Floculación-Coagulación de relaves con presencia de arcillas.
- Resumen de los principales resultados

### 5.1. Curva de calibración para relacionar turbidez y concentración de ultrafino

Para las composiciones de arcillas seleccionadas para este estudio, se presentan las curvas de calibración para relacionar turbidez y concentración de ultrafino en solución.

#### 5.1.1. Sin finos (SF)

Para este caso, se debió calcular la turbidez en función de las concentraciones 0,1,2 y 3 [g/L] debido a que no se apreciaban diferencias en la turbidez en los rangos seleccionados para el estudio, tal como se ve en la Figura 5.1 y en la Tabla 5.1.

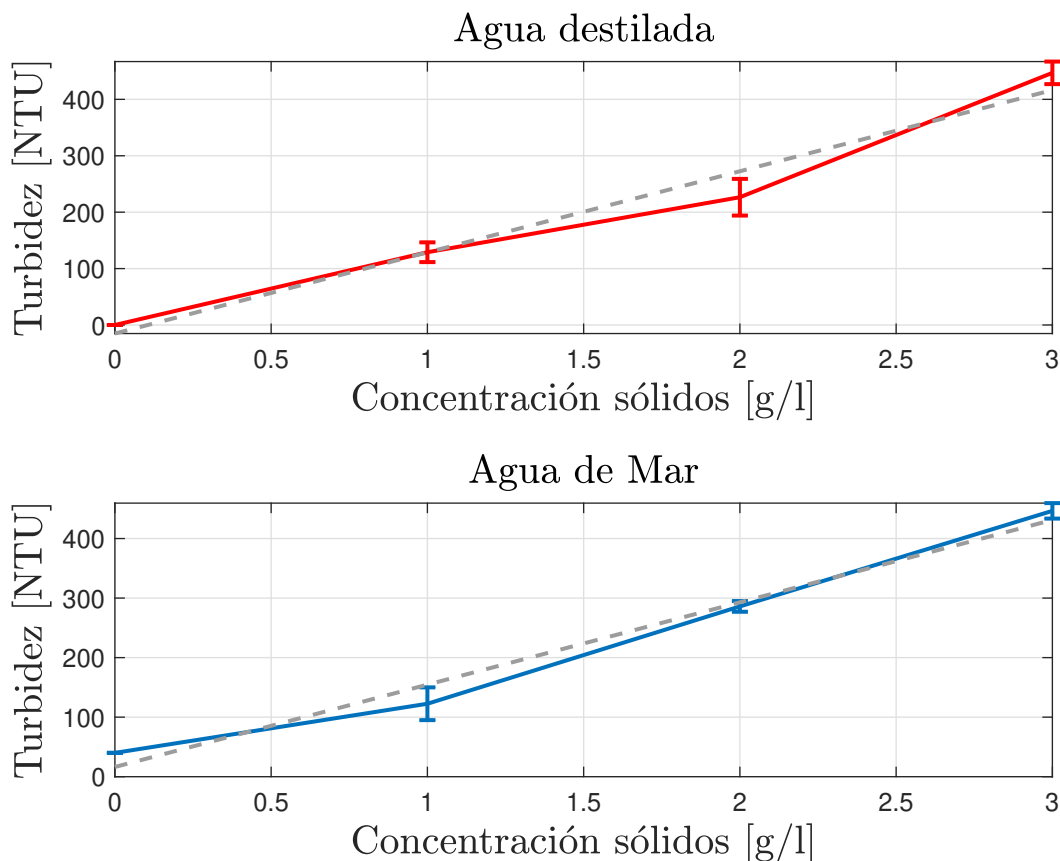


Figura 5.1: Resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso sin finos.

Tabla 5.1: Ajuste lineal de curva de calibración concentración de sólidos (eye x) y turbidez (eje y) para relaves sin presencia de finos en agua destilada y agua de mar sintética.

Tipo de Agua	Ajuste l	$R^2$
destilada	$y=143.85x-15.15$	0.97
Mar Sintética	$y=138.3x+16.3$	0.98

Debido a que el  $R^2$  de ambas regresiones lineales es mayor al 0.95, se aceptará el ajuste lineal para ambos casos.

### 5.1.2. Presencia de finos

Para los cálculos correspondientes a la curva de calibración en presencia de finos se calculó el valor de la turbidez para 0, 0.2, 0.5 y 1 [g/L]. En la Figura 5.2 se pueden ver las curvas de calibración Turbidez-Concentración de sólidos para el caso de las arcillas puras, es decir, cuyo contenido de ultrafino corresponde a solo un tipo de arcilla. En la Figura 5.3 se aprecian estas mismas curvas para el caso de mezcla de arcillas.

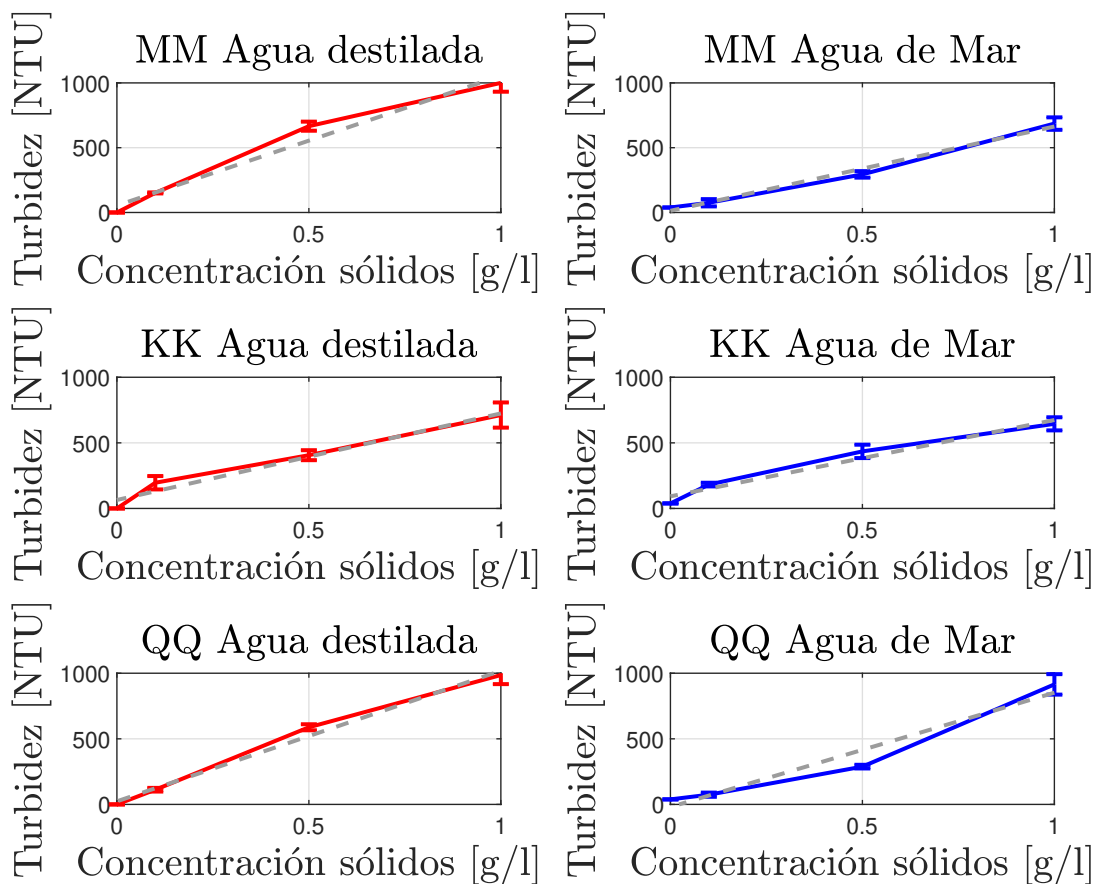


Figura 5.2: Resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso de arcillas puras. A la derecha las curvas de calibración del agua destilada y a la izquierda el caso de agua de mar.

Tabla 5.2: Ajuste lineal de curva de calibración concentración de sólidos (eye x) y Turbidez (eye y) para relaves artificiales con presencia de arcillas en agua destilada

Tipo de Mezcla de arcillas	Ajuste lineal	$R^2$
MM	$y=0.0001x-0.04$	0.99
KK	$y=0.00097x-0.039$	0.96
QQ	$y=0.00097x-0.053$	0.99
MK	$y=0.0011x-0.05$	0.86
MQ	$y=0.0015x-0.082$	0.97
KQ	$y=0.001x-0.019$	0.99



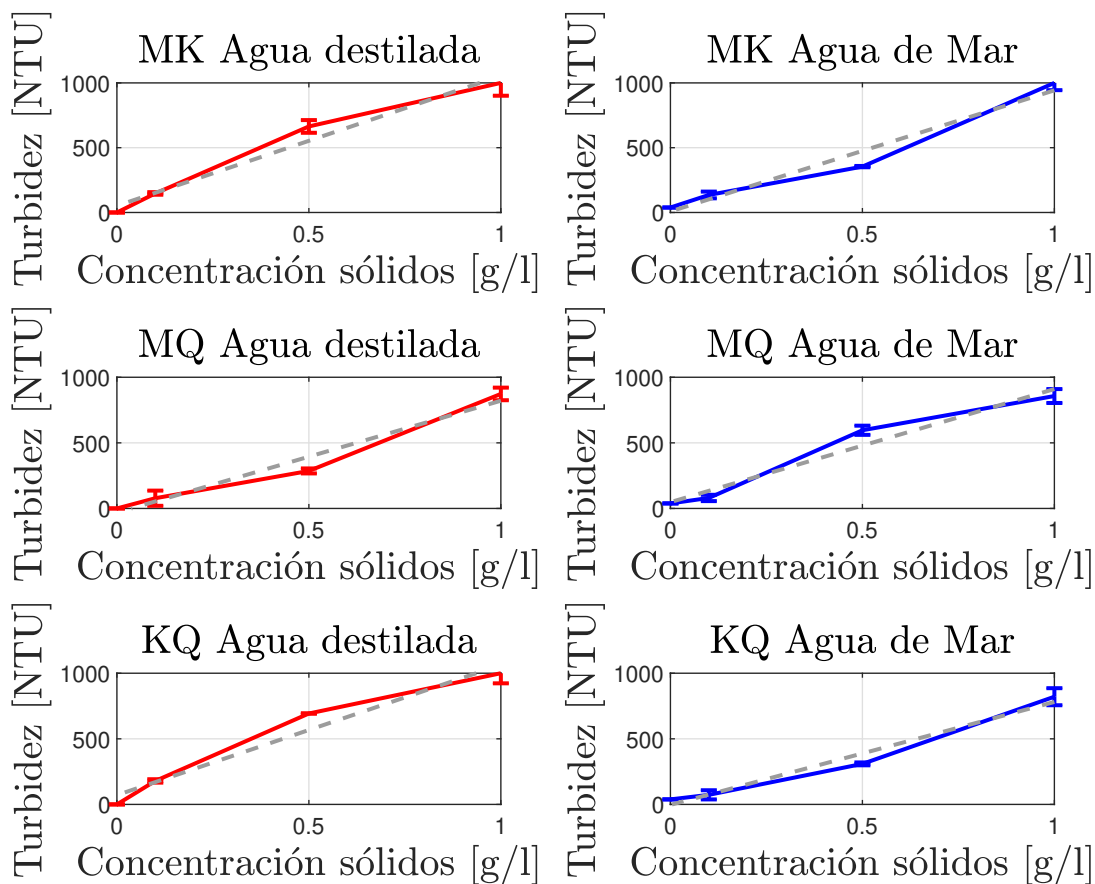


Figura 5.3: resultados de curvas de calibración turbidez-concentración de sólidos en el sobrenadante para caso de mezclas de arcillas. A la derecha las curvas de calibración del agua destilada y a la izquierda el caso de agua de mar.

Tabla 5.3: Ajuste lineal de curva de calibración Concentración de sólidos (eje x) y turbidez (eje y) para relaves artificiales con presencia de arcillas en agua de mar sintética.

Tipo de Mezcla de arcillas	Ajuste lineal	$R^2$
MM	$y=0.0015x-0.015$	0.99
KK	$y=0.001x-0.006$	0.88
QQ	$y=0.00124x-0.0141$	0.99
MK	$y=0.0011x-0.037$	0.88
MQ	$y=0.0017x-0.14$	0.92
KQ	$y=0.0011x-0.041$	0.95

## 5.2. Estudio de proceso de sedimentación sin finos (SF)

Con el objetivo de establecer una referencia a la hora de comparar la eficiencia de la sedimentación se debe hacer el estudio de las características a evaluar (velocidad de sedimentación y concentración de sólidos en el sobrenadante) además de medir el potencial zeta del sobrenadante y el pH de éste.

### 5.2.1. Estudio de la velocidad de sedimentación

En la Figura 5.4 se puede ver la variación de altura de las partículas en suspensión en agua destilada en función del tiempo para la dosis de floculante de 25 [g/ton seca]. Esta fue medida en los primeros 5 segundos tras agregar el floculante y posteriormente pasados 10 y 30 segundos.

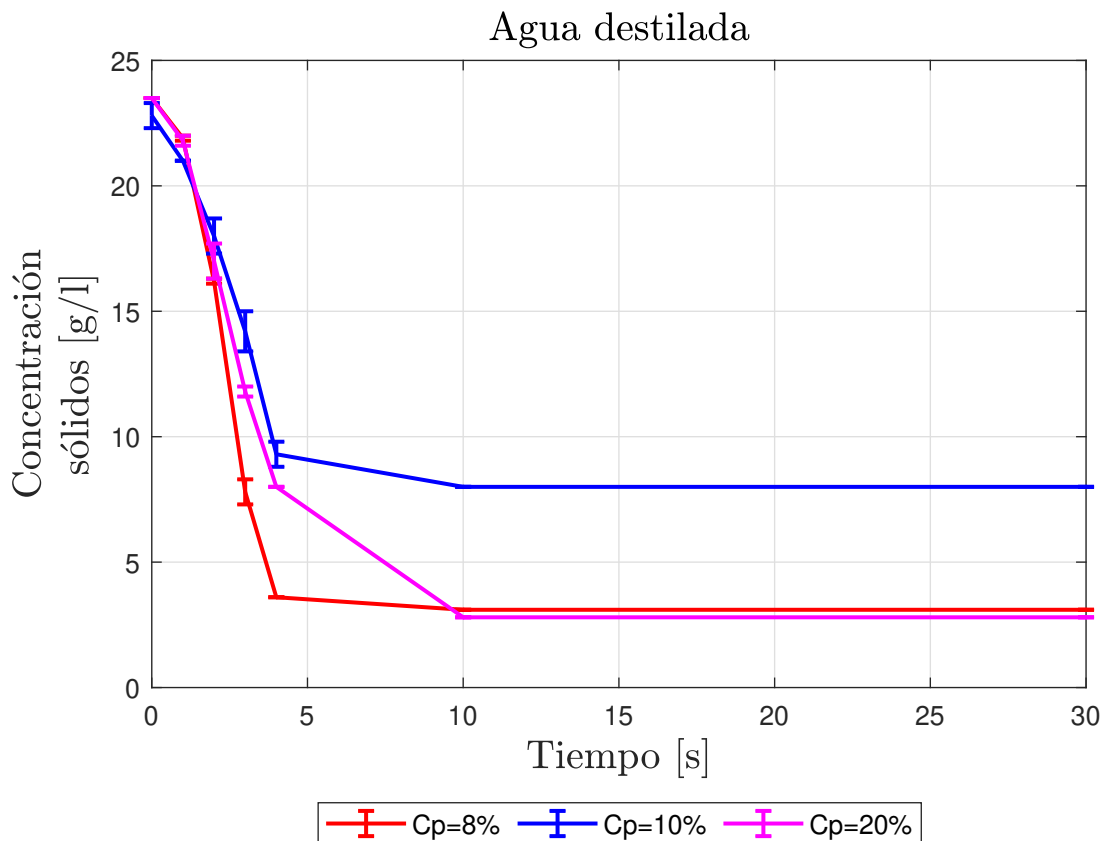


Figura 5.4: Variación de altura con respecto al tiempo en proceso de sedimentación con dosis de floculante de 25 [g/ton seca] para caso sin finos.

Se puede ver que la variación de la altura del sólido en la suspensión a partir de los 5 segundos es menor, por lo que, para mejorar la representatividad de los cálculos, se eliminará del cálculo los valores de 10 y 30 segundos, quedando el gráfico como se ve en la Figura 5.5.

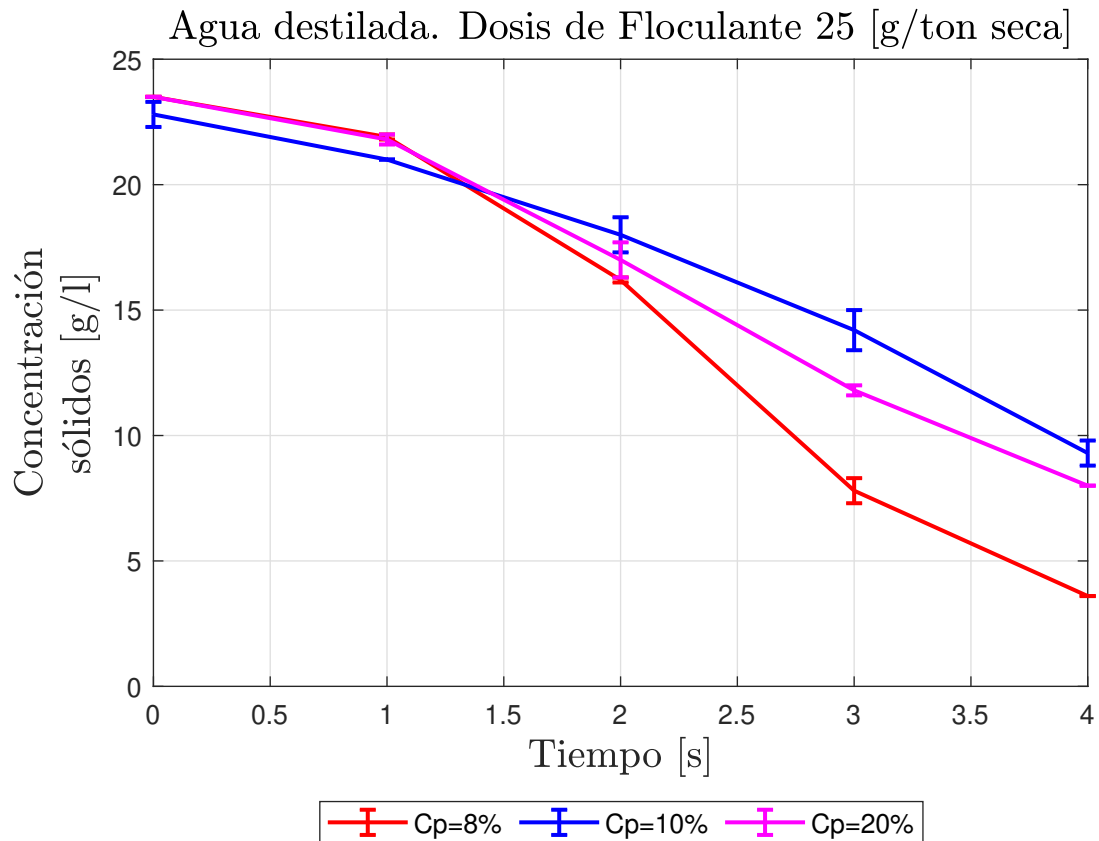


Figura 5.5: Variación de altura de la suspensión utilizando una dosis de flocculante de 25 [g/ton seca] para caso sin finos en agua destilada.

De la misma forma, para una dosis de 12.5 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] de flocculante se grafica la variación de altura de la suspensión con respecto al tiempo para los primeros 4 segundos, como se ve en la Figura 5.6.

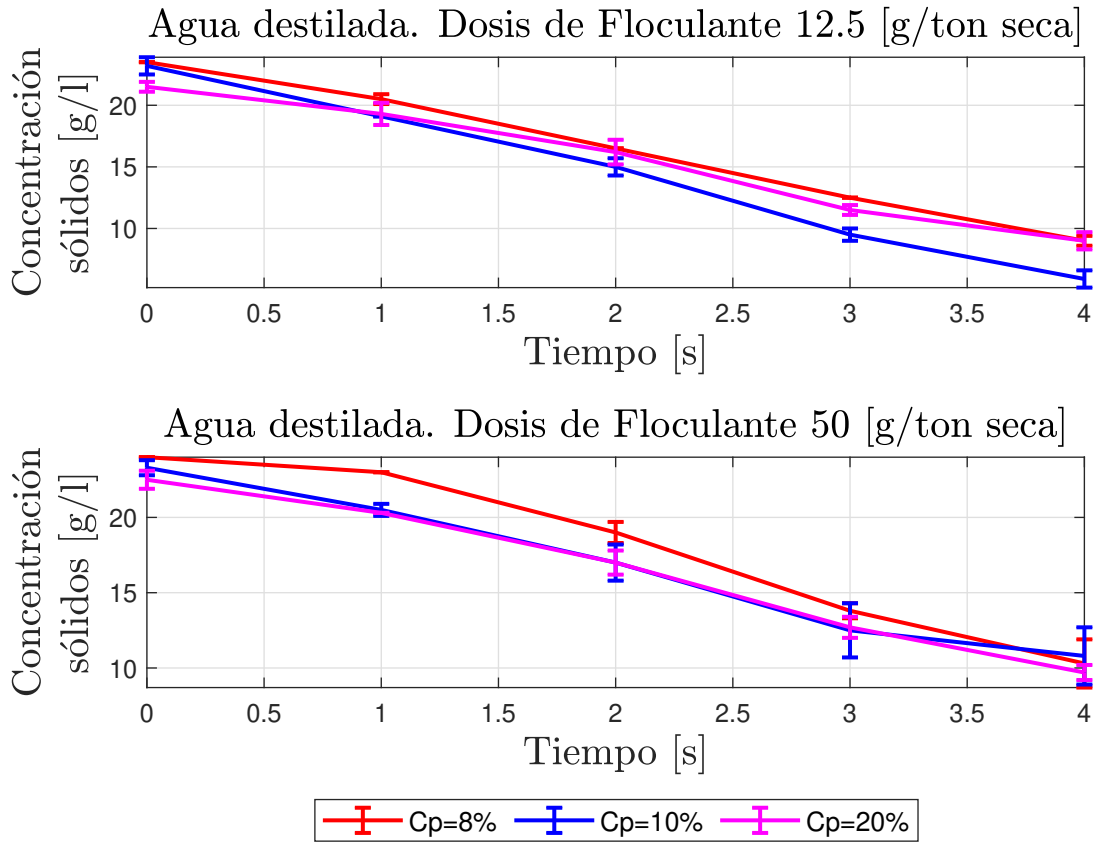


Figura 5.6: Variación de altura de la suspensión utilizando dosis de floculante de 12.5 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] para caso sin finos en agua destilada.

Análogamente, se realizó el estudio de la velocidad de sedimentación para las muestras con agua de mar sintética, tal como se ve en la Figura 5.7.

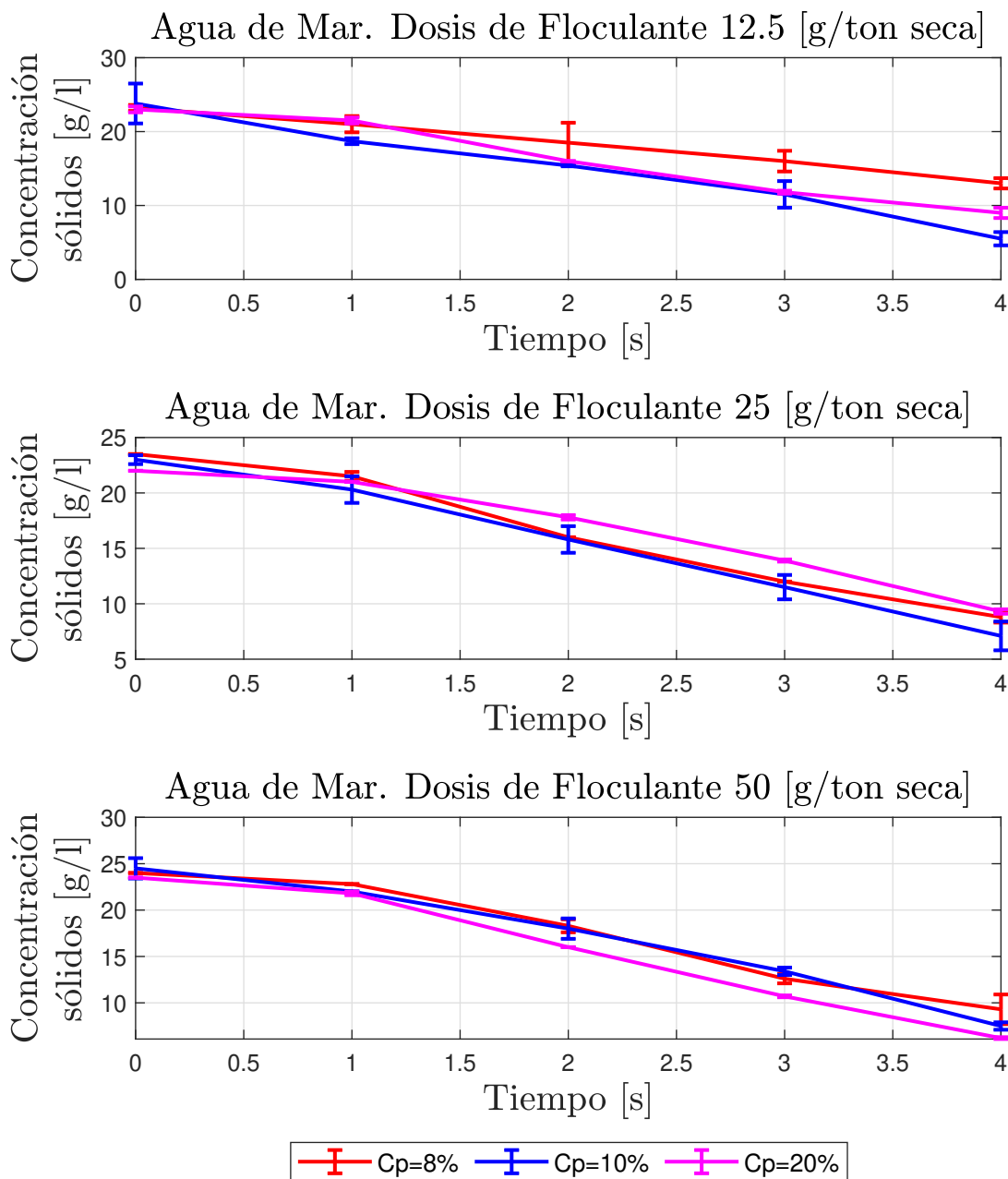


Figura 5.7: Variación de altura de la suspensión utilizando dosis de floculante de 12.5 [g/ton seca], 25 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] para caso sin finos en agua de mar.

Junto con esto, se calculó la pendiente de estas curvas, con sus respectivas desviaciones estándar para así encontrar la velocidad de sedimentación promedio para cada caso, como se ve en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Velocidad de sedimentación promedio en función del  $C_p$  de la solución a tratar modificando la dosis de floculante para caso Sin fino y en agua destilada y agua de mar sintética

Velocidad de sedimentación Promedio [cm/s]						
$C_p$ [%]	Agua destilada	Agua de mar sintética	Agua destilada	Agua de mar sintética	Agua destilada	Agua de mar sintética
	12.5 [g/ton seca]		25 [g/ton seca]		50 [g/ton seca]	
<b>8</b>	$3.63 \pm 0.3$	$2.55 \pm 0.26$	$3.88 \pm 0.1$	$3.69 \pm 0.2$	$3.44 \pm 0.6$	$3.68 \pm 0.5$
<b>10</b>	$4.33 \pm 0.52$	$4.25 \pm 0.18$	$4.51 \pm 0.1$	$4.98 \pm 0.2$	$4.13 \pm 0.2$	$4.23 \pm 0.6$
<b>20</b>	$3.13 \pm 0.65$	$3.5 \pm 0.32$	$3.38 \pm 0.5$	$4.33 \pm 0.1$	$3.21 \pm 0.5$	$3.19 \pm 0.1$

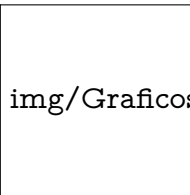
De acuerdo con la información de la tabla 5.4 se puede ver en todos los casos evaluados que a medida que aumenta la dosis de floculante, la velocidad de sedimentación alcanza un máximo cuando la dosis es de 25 [g/ton seca]; Al aumentar la dosis de floculante, la velocidad de sedimentación disminuye. De la misma forma, para una dosis de floculante fijo, la velocidad de sedimentación alcanza un máximo cuando se tiene un  $C_p=10\%$  y luego disminuye conforme aumenta la concentración de sólidos. Por lo tanto, el óptimo encontrado corresponde a la combinación de  $C_p=10\%$  y dosis de floculante de 25 [g/ton seca].

Comparando con la información entregada en [38], el consumo unitario de floculante por tonelada de mineral tratado es de 15 [g/ton seca], por lo tanto se encontró un óptimo operacional que requiere una mayor masa de floculante para el tratamiento.

Es importante destacar que estos efectos se pueden ver tanto en agua destilada como en agua de mar sintética, y que la velocidad de sedimentación de esta última es mayor en todos los casos comparándolo con el agua destilada, por lo que se puede deducir que pueden existir relaciones entre la salinidad, la suspensión y el tipo de floculante que se utiliza. En efecto, existen diversos estudios numéricos [39] y experimentales que comprueban lo hallado en este apartado. Un medio muy salino, como es el caso del agua de mar sintética, favorece las interacciones entre el floculante y el cuarzo, las cuales tienen menores probabilidades de producirse en el caso con agua destilada. En efecto, los cationes en solución protegen las funcionalidades de los enlaces covalentes del SNF704 (HPAM) y a su vez se adsorben en la superficie del mineral, lo que permite que una mayor proporción de los grupos funcionales del floculante favorezcan el proceso de sedimentación [40]. De la misma forma, este blindaje de las funcionalidades HPAM en agua de mar sintética hace que el tamaño de flóculos sea mucho menor en solución.

### 5.2.2. Análisis de la concentración de sólidos en el sobrenadante

Se midió la concentración de sólidos en el sobrenadante transcurridos 5 minutos iniciada la floculación. Se separaron los análisis para agua de mar, sintética y luego se compararon los resultados obtenidos con el mismo arreglo de concentración de sólidos inicial/dosis de floculante en agua de mar. Esto se presenta en la Figura 5.8 .



img/GraficosResultados/destilada-eps-converted-to.pdf

Figura 5.8: Concentración de sólidos en el sobrenadante en función de la dosis de floculante para un  $C_p$  fijo en agua destilada.

Analizando cada una de las líneas de la Figura 5.8 A) se puede apreciar que entre las dosis de 25 [g/ton seca] y 50 [g/ton seca] no existe una mayor diferencia en la concentración de sólidos del sobrenadante, por lo que, independientemente de la concentración inicial de sólidos, un aumento en la dosis de floculante no afecta mayormente la eficiencia de remoción de sólidos del sobrenadante. Conjuntamente, de la Figura 5.8 B) se puede deducir que, para todas las dosis de floculante, a menor, concentración inicial de sólidos, menor será la concentración de sólido en el sobrenadante.

De la misma forma, en la Figura 5.9 se ve el impacto de la dosis de floculante y  $C_p$  en la concentración de sólidos en el sobrenadante para el caso de las muestras en agua de mar.

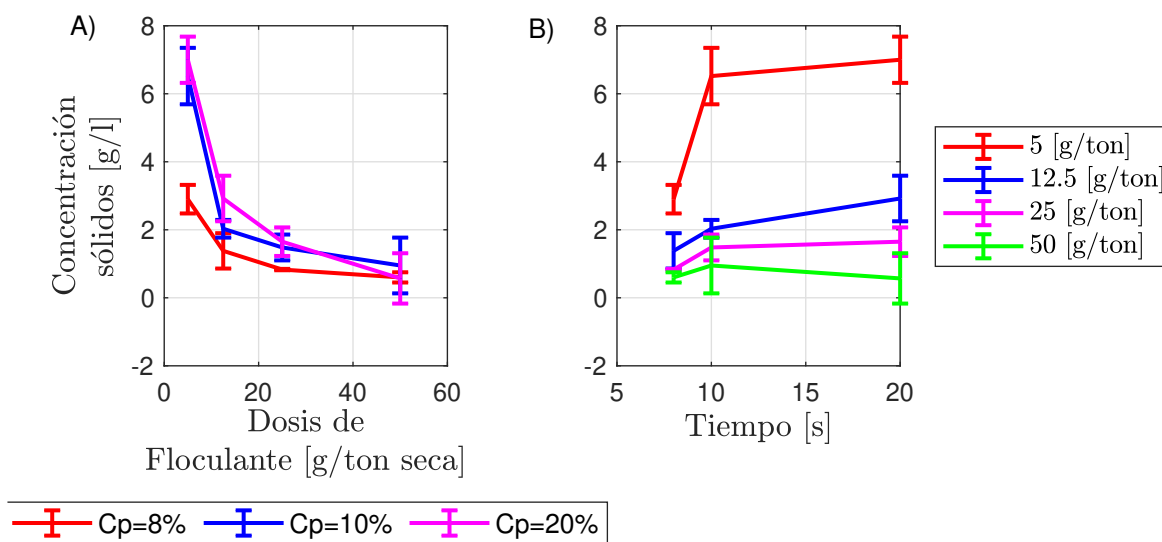


Figura 5.9: Concentración de sólidos en el sobrenadante en función de la dosis de floculante para un  $C_p$  fijo en agua de mar.

La concentración de sólidos en el sobrenadante, independiente del tipo de agua responden a una forma similar; así como en el caso de las muestras en agua destilada, se puede que a mayor porcentaje de sólidos iniciales ( $C_p$ ), mayor es la concentración de sólidos en el sobrenadante tras el proceso de sedimentación (Figura 5.9 B)). Junto con esto, sobre una dosis de floculante de 25 [g/ton seca] no disminuyen notoriamente la concentración de sólidos en el sobrenadante, por lo que no tiene mayor sentido adicionar más que esta dosis (ver Figura 5.9 B)).

Si se compara la concentración de sobrenadante con agua destilada y agua de mar se puede ver que es en el último caso donde se obtiene menor concentración de sólidos en el sobrenadante, lo que se puede atribuir a que las sales presentes en la mezcla sintética de sal de mar favorecen la sedimentación.

### 5.2.2.1. Potencial zeta

En la Tabla 5.5 se pueden resumir los valores del potencial Zeta del sobrenadante para cada configuración de Cp/Dosis de floculante evaluado en agua destilada.

Tabla 5.5: Potencial zeta de sobrenadante tras floculación para el caso sin finos en agua destilada.

Cp [%]	Potencial Zeta [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]	pH
	12.5 [g/ton seca]		25 [g/ton seca]		50 [g/ton seca]	
8	-6.5±0.5	5.81	5.0±0.8	6.01	3.7±0.9	5.97
10	-6.7±0.5	5.67	5.5±0.9	5.73	5.2±0.8	6.04
20	-10.9±1.0	5.78	8.2±0.7	5.88	6.7±0.5	6.07

De esta información se puede encontrar que, conforme aumenta la dosis de floculante, para un mismo Cp, el valor del potencial Zeta disminuye, aumentando en valor absoluto. De la misma forma, para una misma dosis de floculante, a mayor Cp, mayor será el valor del potencial Zeta. Es importante notar que las diferencias entre los distintos valores de potencial Zeta no son mayores, por lo que se puede colegir que no es un factor determinante a la hora de elegir una configuración de Cp/dosis de floculante para el caso sin finos. Junto con esto, la mayoría de los valores son números menores a 10 [mV], por lo tanto, existe tendencia a la precipitación de los sólidos inmersos en el sobrenadante.

Análogamente se repitió el estudio para el caso de floculación en agua de mar sintética, resumiendo los resultados en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Potencial Zeta de sobrenadante tras floculación para el caso Sin finos en agua destilada.

Cp [%]	Potencial Zeta [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]	pH
	12.5 [g/ton seca]		25 [g/ton seca]		50 [g/ton seca]	
8	-2.4±0.4	7.78	-2.5±0.1	7.85	-3.6±1.0	7.92
10	-2.6±0.1	7.81	-2.7±0.5	7.92	-2.9±0.2	7.8
20	-2.8±0.6	7.79	-3.1±0.8	7.86	-3.7±0.4	7.78

Aquí, se puede observar el mismo efecto mencionado en la parte de agua destilada en la mayoría de los casos: A mayor Cp, para una dosis de floculante fijo, el valor del potencial zeta aumenta (en este caso, se vuelve más negativo). Al mismo tiempo, para un Cp fijo, a mayor dosis de floculante, existe un aumento en el potencial zeta. Asimismo, no existe una mayor diferencia en cuanto a los valores de los distintos casos, por lo que, al igual que el estudio en agua destilada, no es un factor decisivo a la hora de escoger la configuración óptima de Cp/dosis de floculante. Es importante entender la diferencia en los valores del potencial zeta en agua destilada y el de agua de mar sintética. La



presencia de iones (monovalentes y bivalentes) en el agua de mar sintética aumentan la negatividad de la solución, pero al analizar la estabilidad de la solución de sobrenadante los sólidos presentes en la solución tenderán a precipitar.

### 5.3. Caracterización de $C_p$ /Dosis de floculante óptima para el estudio

Debido a lo observado anteriormente, las principales diferencias en las distintas configuraciones de  $C_p$ /Dosis de floculante se da en la Turbidez del Sobrenadante y la Velocidad de sedimentación. Dicho esto, y con el objetivo de establecer los parámetros con los que se comparará la eficiencia de la floculación ante la presencia de Ultrafinos, se ha decidido utilizar la configuración, tanto para agua destilada y Agua de Mar correspondiente a un  **$C_p$  de 10 % y una dosis de floculante de 25 [g/ton seca]**.

Esto se justifica debido a que, tal como se describió en el punto anterior, al utilizar una dosis de floculante sobre los 25 [g/ton seca] no hay una mayor diferencia en la concentración de sólidos del sobrenadante, por lo que, independiente del  $C_p$ , un aumento en la dosis de floculante a partir de este punto no afecta mayormente la eficiencia de remoción de sólidos del sobrenadante. Además, para una dosis fija de 25 [g/ton seca] la mayor velocidad de sedimentación se da cuando  $C_p=10\%$ .

Comparando con [39] el consumo unitario de floculante por tonelada de mineral tratado es de 15 [g / tonelada seca], para lo cual se encontró un óptimo operacional que requiere una mayor masa de floculante para el tratamiento. Asimismo, se conoce que operacionalmente trabaja con una concentración de sólidos en la alimentación de entre 30 a 35 %, superior al  $C_p$  de 10 % encontrado como óptimo para este estudio.

Dicho esto, se caracterizó la configuración inicial de la muestra sin fino como sigue:

Se preparó la suspensión de grueso al 10 % tanto en agua destilada como en agua de mar sintética . Posteriormente, se hizo un barrido de pH entre 2 y 12 para ambas muestras y se midió el potencial zeta. El resultado se puede apreciar en la Figura 5.10.

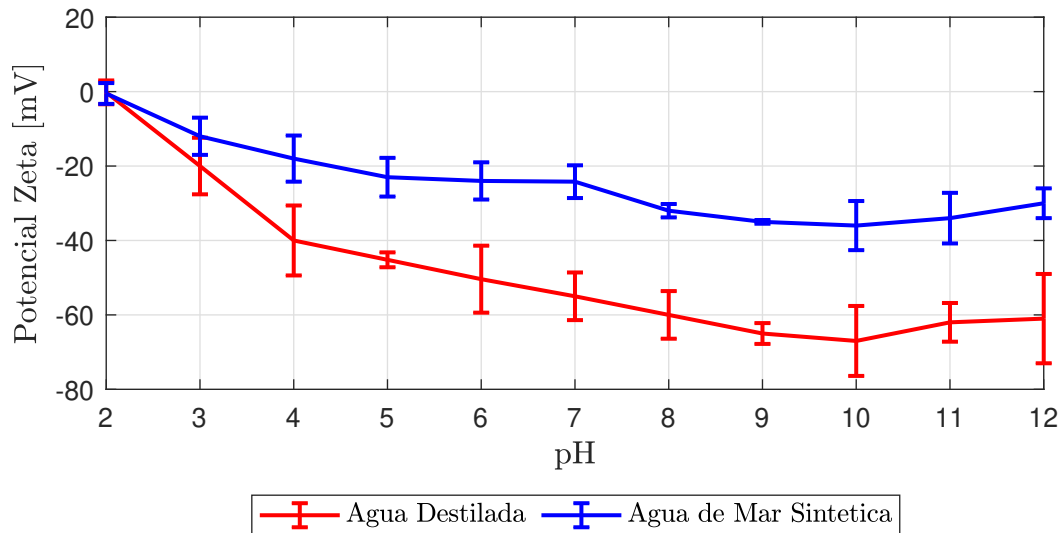


Figura 5.10: Potencial zeta a distintos pH de solución de relave sintético sin finos, con  $C_p=10\%$  y una dosis de floculante de 25 g/ton.

Se puede observar que el potencial zeta es negativo en todo punto y que disminuye progresivamente hasta un pH de 9. Conforme aumenta el pH desde este punto, hay un aumento en este potencial, debido principalmente a la interacción entre los iones  $OH^-$  y la estructura del  $SiO_2$ . En agua destilada, se puede ver como el potencial zeta es menor en comparación con su similar en agua de mar sintética. Esto se debe a que la interacción de los iones catiónicos del agua de mar alteran las características de la solución, aplacando el efecto.

De forma análoga, se hizo una caracterización del tamaño de partículas previo a cualquier tratamiento de floculación utilizando un equipo de FBRM (Figura 5.11).

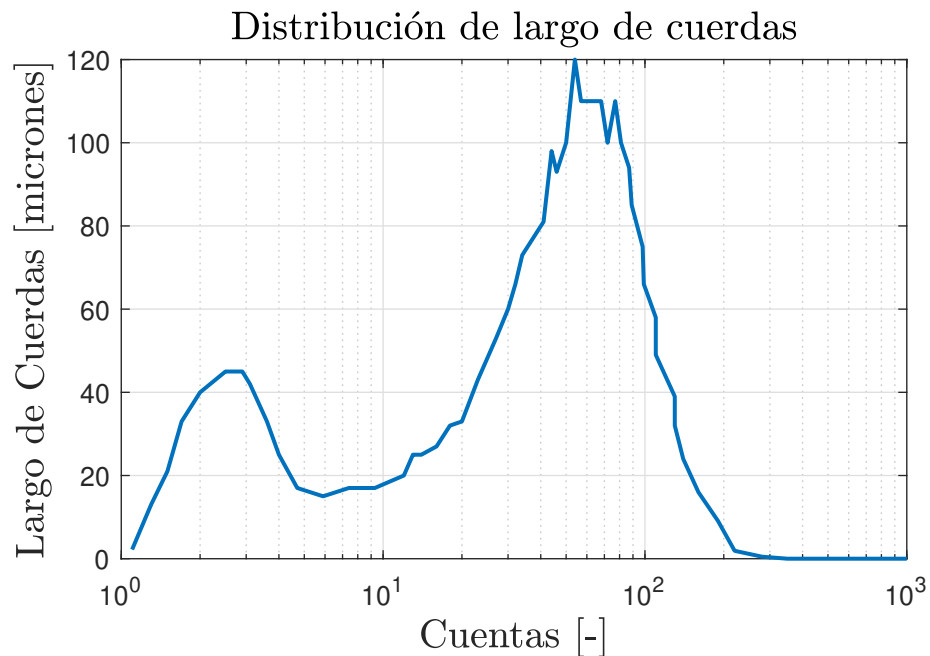


Figura 5.11: Distribución de largo de cuerdas de muestra sólida sin finos utilizando un equipo FBRM (Resultados extraídos del software específico de Metler Toledo).

Finalmente, los parámetros con los que se comparará la eficiencia de sedimentación serán:

- Velocidad de sedimentación: Basado en el método descrito en la sección 4.4, la velocidad para comparar será 4.51 [cm/s] para agua destilada y 4.98 [cm/s] para agua de mar sintética.
- Eficiencia de remoción de sólidos: Para poder comparar esta eficiencia de remoción, se definirá la eficiencia de remoción de sólidos descrita en la sección 4.4. Se debe considerar que la concentración inicial de sólidos fue de 10 [g/L], por lo tanto, el porcentaje de remoción de sólidos en agua destilada y agua de mar es 71.5% y 85.2% respectivamente.

## 5.4. Sedimentación de relaves sintéticos con presencia de arcillas, sin aditivos

Para poder caracterizar la eficiencia de sedimentación en función de los parámetros definidos en la sección 5.3, se debe medir el valor de la sedimentación de relaves sintéticos con presencia de arcillas sin la participación de agentes externos (floculantes o coagulantes) para así establecer un caso base.

### 5.4.1. Velocidad de sedimentación

En la Figura 5.12 se puede ver la variación de altura del sólido a través del tiempo para los relaves sintéticos sin adición de agentes químicos para el caso de agua destilada y

Agua de Mar.

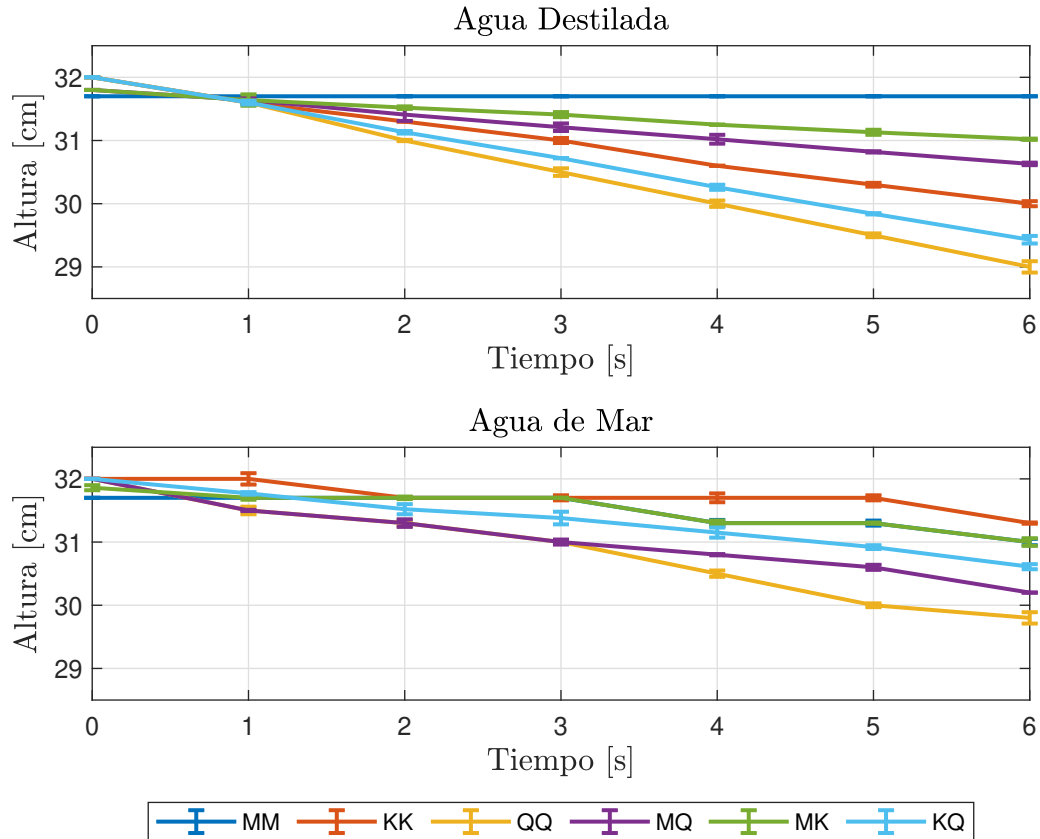


Figura 5.12: Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de floculante para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas en agua destilada y agua de mar.

La Tabla 5.7 resume las velocidades de sedimentación y el valor de la eficiencia de la sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos.

Tabla 5.7: Velocidad de sedimentación y valor de la eficiencia de sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos.

	agua destilada		Agua de Mar	
	Velocidad de Sedimentación promedio [cm/s]	Eficiencia de Sedimentación [%]	Velocidad de Sedimentación promedio [cm/s]	Eficiencia de Sedimentación [%]
MM	<0.1	0.00 %	0.11±0.02	2.20 %
MK	0.13±0.03	2.90 %	0.14±0.03	2.90 %
KQ	0.43±0.03	9.50 %	0.23±0.05	4.70 %
MQ	0.20±0.04	4.30 %	0.3±0.02	6.00 %
KK	0.33±0.02	7.40 %	0.12±0.04	2.30 %
QQ	0.50±0.04	11.10 %	0.37±0.04	7.40 %
SF	1.95±0.04	43.20 %	2.03±0.05	45.10 %

### 5.4.2. Concentración de sólidos en el sobrenadante

Se midió la turbidez del sobrenadante pasados 5 minutos del inicio de la medición en estudio y posteriormente, a partir de las curvas de calibración, se calculó la concentración de sólidos en el sobrenadante. Los resultados se pueden ver en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Concentración de sólidos de sobrenadante pasados 5 minutos iniciados el proceso de sedimentación sin adición de químicos para relaves sintéticos con la presencia de arcillas en agua destilada y agua de mar sintética.

	Agua destilada [%]	Eficiencia de Sedimentación	Agua de Mar Sintética [%]	Eficiencia de Sedimentación
<b>MM</b>	4.89±0.5	5.50 %	1.03±0.7	48.50 %
<b>MK</b>	3.68±0.2	16.00 %	2.76±0.8	12.00 %
<b>KQ</b>	0.82±0.1	59.00 %	1.55±0.13	22.50 %
<b>MQ</b>	2.02±0.4	49.00 %	2.37±0.2	31.50 %
<b>KK</b>	0.78±0.3	61.00 %	2.01±0.6	49.50 %
<b>QQ</b>	0.89±0.1	55.50 %	1.23±0.2	38.50 %
<b>SF</b>	0.61±0.12	69.50 %	0.52±0.10	74.00 %

De los datos presentados en la Tablas 5.7 y 5.8 se pueden distinguir algunos puntos relevantes para discutir.

Debido a los efectos gravitatorios, era esperable que en el caso de la sedimentación sin finos sería aquel que poseyera mayores eficiencias de sedimentación, tanto en agua de mar como en destilada.

Para las muestras presencia de Bentonita (MM, MK y MQ), a mayor proporción de Bentonita, se tendrán mayor concentración de sólidos en el sobrenadante. Si se compararan estas mismas mezclas en Agua de mar, se puede ver que aumenta la eficiencia de sedimentación, ligada principalmente a la existencia de sales cationicas en el agua de mar, quienes generan enlaces covalentes que facilitan la sedimentación de este tipo de arcillas. Dicho comportamiento también es reportado por [41]. Aquí se señala que la presencia de bentonita en el proceso de flotación puede mitigarse al trabajar con agua de mar, puesto que los iones de  $Mg^{+2}$  y  $Ca^{+2}$  favorecen el enlace covalente y posterior sedimentación de la arcilla.

En el caso de relaves artificiales cuyas composiciones tienen Caolinita y Cuarzo, principales componentes de los relaves chilenos [23], se puede apreciar que la eficiencia de sedimentación se reduce ante la presencia de agua de mar. Una de las posibles causas es que la presencia de complejos de Mg y Ca reducen la magnitud del potencial zeta de las partículas, disminuyendo la tendencia a la precipitación. Este efecto será estudiado posteriormente en el efecto de la floculación con un polímero aniónico.

## 5.5. Proceso de floculación de relaves sintéticos con presencia de arcillas

### 5.5.1. Velocidad de sedimentación

Para poder comparar la eficiencia de sedimentación con respecto al caso base de relaves sin presencia de arcilla, se cuantificaron los valores de la velocidad de sedimentación promedio tras 6 segundos añadido el floculante, la concentración de sólidos en el sobrenadante y el potencial zeta para cada uno de los tipos de combinaciones de arcilla previamente descritos en 4.4. Es importante destacar que se separaron los estudios de acuerdo con el tipo de agua en el que está disuelto el relave (agua destilada y agua de mar sintética).

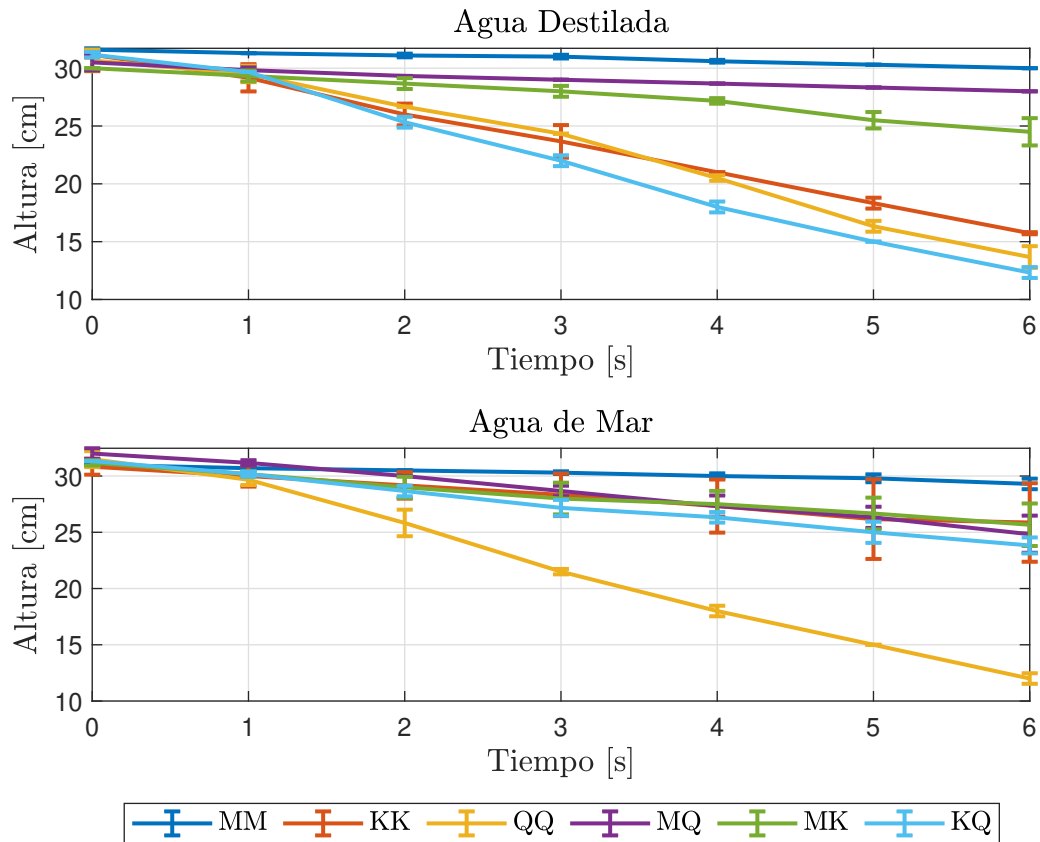


Figura 5.13: Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de floculante para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas en agua destilada y agua de mar.

La Tabla 5.9 resume las velocidades de sedimentación y el valor de la eficiencia de la sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos.

Tabla 5.9: Velocidad de sedimentación y valor de la eficiencia de sedimentación con respecto al valor de la velocidad de sedimentación sin presencia de finos. Se omite el caso SF, a 100 % en eficiencia de sedimentación.

	<b>Agua destilada [cm/s]</b>	<b>Eficiencia de Sedimentación</b>	<b>Agua de Mar Sintética [cm/s]</b>	<b>Eficiencia de Sedimentación</b>
<b>MM</b>	0.26±0.08	5.3 %	0.28±0.17	6.2 %
<b>MK</b>	0.92±0.51	18.4 %	0.92±1.04	20.3 %
<b>KQ</b>	3.14±0.30	63.0 %	1.25±0.67	27.7 %
<b>MQ</b>	0.42±0.13	8.4 %	1.19±0.51	26.5 %
<b>KK</b>	2.57±0.62	51.7 %	0.83±2.01	18.4 %
<b>QQ</b>	2.83±0.47	56.9 %	3.25±0.51	72.1 %
<b>SF</b>	0.61±0.12	69.50 %	0.52±0.10	74.00 %

Tal como se puede ver en la Tabla 5.9 para el caso de agua destilada las mayores eficiencias de sedimentación se ven en los casos donde hay presencia de arcillas de caolinita, de cuarzo y combinación de éstas. En contraste, la menor eficiencia, de forma considerable, se da bajo la presencia de la bentonita. Esto se debe a que la bentonita tiene un alto porcentaje en peso de montmorillonita de sodio, que puede hincharse en contacto con el agua y producir una estructura viscosa similar a un gel, lo que dificulta su tasa de sedimentación [42].

Por otro lado, para el caso de Agua de Mar, la velocidad de sedimentación para los relaves con presencia de caolinita disminuye considerablemente. Esta observación también se encontró en bibliografía, en donde se explica que, la caolinita puede generar flóculos menos densos en agua de alta salinidad debido a la presencia de iones de calcio y la estructura compleja de la caolinita, lo que conduciría a una tasa de sedimentación reducida con una mayor salinidad del agua [23].

En cuanto al cuarzo ultrafino, se puede ver que en las mezclas de cuarzo con caolinita o bentonita se mejora la eficiencia de sedimentación que considerando el caso “puro”. Esto puede deberse a dos comportamientos posibles, actuar como un inerte y que el aumento de la velocidad de sedimentación sea porque hay más enlaces del floculante disponible, o porque potencia el efecto de la floculación. Para poder comprobar alguno de estos supuestos, en la Figura 5.14 se presenta la variación en la velocidad de sedimentación de los casos MQ y KQ para distintas dosis de floculante.

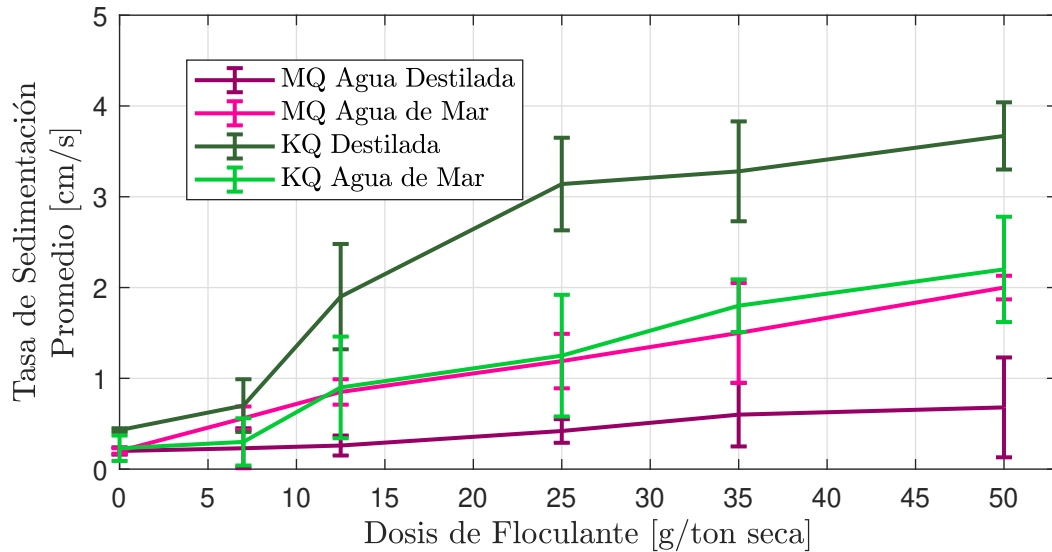


Figura 5.14: Variación en la velocidad de sedimentación de los casos MQ y KQ para distintas dosis de floculante.

De acuerdo con la información proporcionada en la Figura 5.14, aumenta la velocidad de sedimentación media en función de la dosis de floculante hasta cierto punto, razón por la cual la existencia de cuarzo ultrafino podría responder más al comportamiento de un inerte dentro de la mezcla de relave sintético.

### 5.5.2. Concentración de sólidos en el sobrenadante

Para poder comparar la eficiencia de la concentración de sólidos en el sobrenadante se midió la turbidez de éste pasados 5 minutos desde que se añadió el floculante. Posterior a esto, y mediante el uso de las curvas de calibración para cada tipo de relave con arcillas en agua, se determinó la concentración final de sólidos en el sobrenadante. Los resultados se presentan en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Concentración de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos añadido el floculante para relaves sintéticos con contenido de arcilla.

	Agua destilada [mg/l]	Eficiencia de Sedimentación	Agua de Mar Sintética [mg/l]	Eficiencia de Sedimentación
MM	1.50±0.01	25.0 %	0.53±0.012	73.5 %
MK	0.95±0.01	52.5 %	0.71±0.06	64.5 %
KQ	0.15±0.06	92.5 %	1.19±0.13	40.5 %
MQ	1.21±0.01	39.5 %	0.61±0.04	69.5 %
KK	0.18±0.03	91.0 %	1.56±0.001	22.0 %
QQ	0.26±0.03	87.0 %	0.74±0.04	63.0 %

Se puede ver en todos los casos una buena eficiencia de sedimentación pasados los 5 minutos iniciados el proceso de floculación. De la misma forma que se vio en el punto 5.4, la eficiencia de sedimentación de concentración de sólidos en el sobrenadante también



es menor si comparamos el caso de agua destilada y agua de mar para las muestras con contenido de caolinita (KQ y KK). Análogamente, la eficiencia de sedimentación en los casos con presencia de Bentonita (MM, MQ y MK), la eficiencia de sedimentación es mayor para el caso de agua de mar versus agua destilada.

Llama la atención en este estudio que el cuarzo ultrafino, QQ, tenga menores concentraciones de sólidos en el sobrenadante en el caso de agua destilada que en el de agua de mar. Esto podría deberse a que el agua de mar tiene una mayor turbidez (y, por ende, mayor concentración de sólidos) que el agua destilada, por lo que el efecto que se podría apreciar en este caso responde al aumento de turbidez producto de la presencia de sales más que de sólidos en sí.

### 5.5.3. Potencial zeta

Se compara el potencial zeta del sobrenadante tras 5 minutos iniciado el proceso de floculación. Se mide el pH asociado a cada valor de potencial zeta y se compara con su similar en pH del caso sin finos descrito en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Potencial zeta y pH de sobrenadante tras 5 minutos iniciado el proceso de floculación para relaves artificiales con presencia de arcillas comparado con valor de potencial zeta de muestra sin finos.

	agua destilada			Agua de Mar		
	Promedio	pH	Potencial Zeta [mV]	Promedio	pH	Potencial Zeta [mV]
<b>MM</b>	-57.83±0.81	8.29	-61.45	15.25±0.36	7.07	-25.3
<b>MK</b>	-62.29±0.81	8.73	-63.65	13.06±0.35	7.00	-24.2
<b>KQ</b>	-59.43±0.81	7.22	-56.1	12.47±0.31	7.00	-24.2
<b>MQ</b>	-69.21±0.81	9.27	-66.73	14.03±0.35	7.00	-24.2
<b>KK</b>	-57.38±0.80	6.63	-53.30	17.67±0.38	7.00	-24.2
<b>QQ</b>	-51.61±1.39	6.74	-53.80	-0.06±0.06	7.04	-24.8

Cabe destacar la similitud entre los resultados con agua destilada, no obstante, en el caso de los sobrenadantes en agua de mar se puede ver disimilitudes en cuanto a lo medido en el potencial zeta. Esto puede deberse al efecto explicado en 5.4, en donde se señaló que la presencia de arcillas en entornos de alta salinidad reduce la magnitud del potencial zeta aniónico de las partículas, mientras que los precipitados sólidos pueden incluso asignarles valores catiónicos [23].

## 5.6. Coagulación de relaves sintéticos con presencia de arcillas

Debido a que se utilizaron sales para evaluar la coagulación, no se pudo ver mayor diferencia en la velocidad de sedimentación, concentración de sólidos en el sobrenadante y potencial zeta en los casos de soluciones en agua de mar sintética. En consecuencia, esta parte del estudio aplica solamente a sistemas que operan con agua destilada.

### 5.6.1. Velocidad de sedimentación

Se comparó la velocidad de sedimentación de los dos coagulantes usados:  $MgCl_2$  y  $CaCl_2$  a 500 [mg/L] siguiendo la sugerencia de [43]. Es importante destacar que se midió la altura del sólido en intervalos de 1 minuto. Esto debido a que no se aprecian diferencias notorias en el rango de segundos producto de que la coagulación es un proceso más lento en comparación a la floculación [44]. En la figura 5.15 se puede ver la altura de relave a través del tiempo tras la adición de los coagulantes en estudio, y en la tabla 5.12, el resumen de las velocidades de sedimentación promedio para ambos casos.

Tabla 5.12: Velocidad de sedimentación de proceso de coagulación para relaves sintéticos con contenido de arcillas en agua destilada.

	$MgCl_2$		$CaCl_2$	
	Velocidad de Sedimentación promedio [cm/s]	Eficiencia de Sedimentación [%]	Velocidad de Sedimentación promedio [cm/s]	Eficiencia de Sedimentación [%]
<b>MM</b>	0.023±0.014	0.59 %	0.016±0.009	0.44 %
<b>MK</b>	0.015±0.004	0.39 %	0.011±0.007	0.31 %
<b>KQ</b>	0.016±0.008	0.42 %	0.017±0.010	0.46 %
<b>MQ</b>	0.024±0.006	0.62 %	0.018±0.006	0.02 %
<b>KK</b>	0.008±0.002	0.20 %	0.007±0.006	0.18 %
<b>QQ</b>	0.025±0.004	0.64 %	0.024±0.010	0.74 %

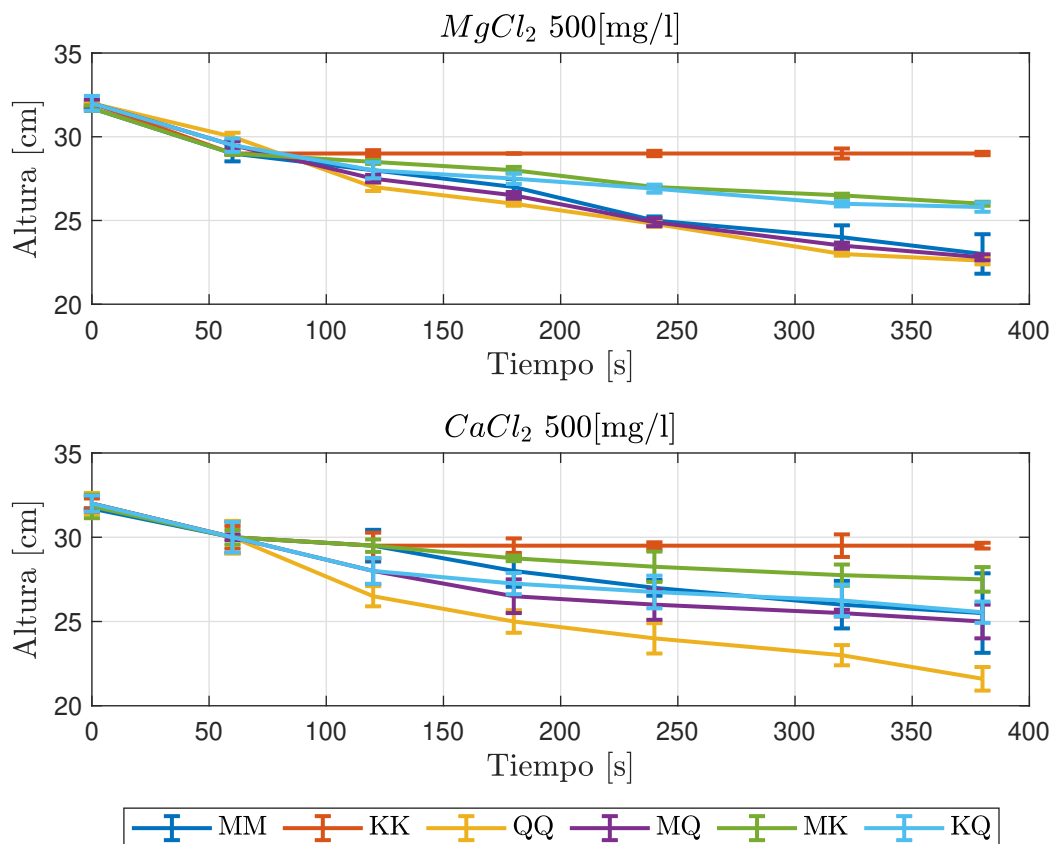


Figura 5.15: Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$  arriba y  $CaCl_2$  abajo, ambos a 500 [mg/l]) para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas.

Analizando los valores de la Tabla 5.12 se puede ver que el desempeño en cuanto a la velocidad de sedimentación utilizando exclusivamente coagulantes del tipo sal inorgánica son bajos. En particular, los mejores resultados se dieron en las mezclas de cuarzo y bentonita para el cloruro de magnesio, y para el caso del cloruro de calcio, los resultados de cuarzo ultrafinos son los mejores.

### 5.6.2. Turbidez y concentración de sólidos en el sobrenadante

La turbidez del sobrenadante se midió tras 30 minutos de añadido el coagulante. Para poder relacionar este resultado con la concentración de sólidos del sobrenadante se utilizaron las calibraciones para agua destilada. Es importante mencionar que previo al estudio, se midió la turbidez de los coagulantes utilizados:

- $MgCl_2$  (500[mg/L]): 72.8 [NTU]
- $CaCl_2$  (500 [mg/L]): 81.4 [NTU]

Tabla 5.13: Turbidez del sobrenadante y concentración de sólidos en el sobrenadante tras 30 minutos transcurridos desde la adición de coagulante.

	<b>MgCl<sub>2</sub></b>		<b>CaCl<sub>2</sub></b>	
	Turbidez [NTU]	Concentración de sólidos en el sobrenadante [mg/l]	Turbidez [NTU]	Concentración de sólidos en el sobrenadante [mg/l]
<b>MM</b>	30.4±5	0.0108	89.5±4.1	0.0355
<b>MK</b>	43.50±8.2	0.00367	115.70±3.9	0.0305
<b>KQ</b>	70.10±3.8	0.015	139.83±2.2	0.0527
<b>MQ</b>	24.79±4.9	0.0781	25.78±0.5	0.0556
<b>KK</b>	85±1.5	0.0425	174±2.7	0.0801
<b>QQ</b>	20.2±0.9	0.000665	18.7±1.2	0.0185

De la misma forma que en la floculación, se comparó la eficiencia de remoción de sobrenadante considerando la concentración inicial de sólidos. Los resultados se pueden ver en la Tabla 5.14

Tabla 5.14: Eficiencia de remoción de sólidos en el sobrenadante tras 30 minutos iniciada la adición de coagulantes para relaves sintéticos con presencia de arcillas.

	<b>MgCl<sub>2</sub></b>	<b>CaCl<sub>2</sub></b>
	Remoción de sólidos en el sobrenadante [%]	Remoción de sólidos en el sobrenadante [%]
<b>MM</b>	99.46 %	98.23 %
<b>MK</b>	99.82 %	98.48 %
<b>KQ</b>	99.25 %	97.37 %
<b>MQ</b>	96.10 %	97.22 %
<b>KK</b>	97.88 %	96.00 %
<b>QQ</b>	99.97 %	99.08 %

La eficiencia de sedimentación en función de la remoción de sólidos en el sobrenadante resulta ser alta si se compara con el mismo valor en función de la velocidad de sedimentación. En términos generales, se puede ver la eficiencia de remoción es ligeramente mayor para el caso de MgCl<sub>2</sub> en comparación con CaCl<sub>2</sub>.

### 5.6.3. Potencial zeta

Así como en el punto 5.5.3, se midió el potencial zeta y el pH del sobrenadante tras 30 minutos pasada la coagulación. Esto se muestra en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15: Potencial Zeta [mV] y pH de sobrenadante tras 30 minutos iniciada la coagulación de relaves sintéticos con contenido de arcillas.

	<b>MgCl<sub>2</sub></b>		<b>CaCl<sub>2</sub></b>	
	Promedio [mV]	pH	Promedio [mV]	pH
<b>MM</b>	-22.30±0.81	8.30	-26.24±0.34	8.48
<b>MK</b>	-21.27±1.27	8.40	-19.34±0.45	7.89
<b>KQ</b>	-16.19±0.45	7.65	-11.53±1.12	6.42
<b>MQ</b>	-26.00±0.09	8.21	-28.58±0.86	8.05
<b>KK</b>	-16.86±1.4	7.2	-12.42±1.27	6.76
<b>QQ</b>	-27.9±0.45	6.9	-32.75±1.16	6.53

## 5.7. Floculación-Coagulación de relaves con presencia de arcillas

El estudio del efecto de la floculación-coagulación de relaves con presencia de arcillas se limitó al caso del agua destilada, debido a la presencia de las sales utilizadas para la coagulación ya está implícitamente considerada para el caso de agua de mar sintética. Además, este análisis se realizó para aquellas combinaciones en donde hay presencia de Bentonita, es decir, MM, MQ y MK. La razón por la cual se escogió estas configuraciones es debido a que, en el caso del agua destilada, la eficiencia de sedimentación es baja para aquellas muestras, tanto en función de la velocidad de sedimentación como en la concentración de sólidos en el sobrenadante. Al mismo tiempo, se puede ver que en el caso de los relaves con presencia de Caolinita (KK y KQ) la presencia de sales inorgánicas va en desmedro de la calidad de la sedimentación.

Para esto, se consideraron las dosis de floculante y coagulantes previamente descritas en los puntos 5.5 y 5.6. La metodología de adición fue:

- a) A la muestra ya preparada se le adiciona la dosis de coagulante y se deja actuar durante 30 segundos.
- b) Posteriormente, se adiciona la dosis de floculante y se mezcla.
- c) Se mide la velocidad de sedimentación posterior a la adición del floculante y se calcula la concentración de sólidos del sobrenadante y el potencial zeta tras 5 minutos transcurridos el proceso.

### 5.7.1. Velocidad de sedimentación

En la figura 5.16 se pueden ver la variación de altura con respecto al tiempo para los casos analizados.

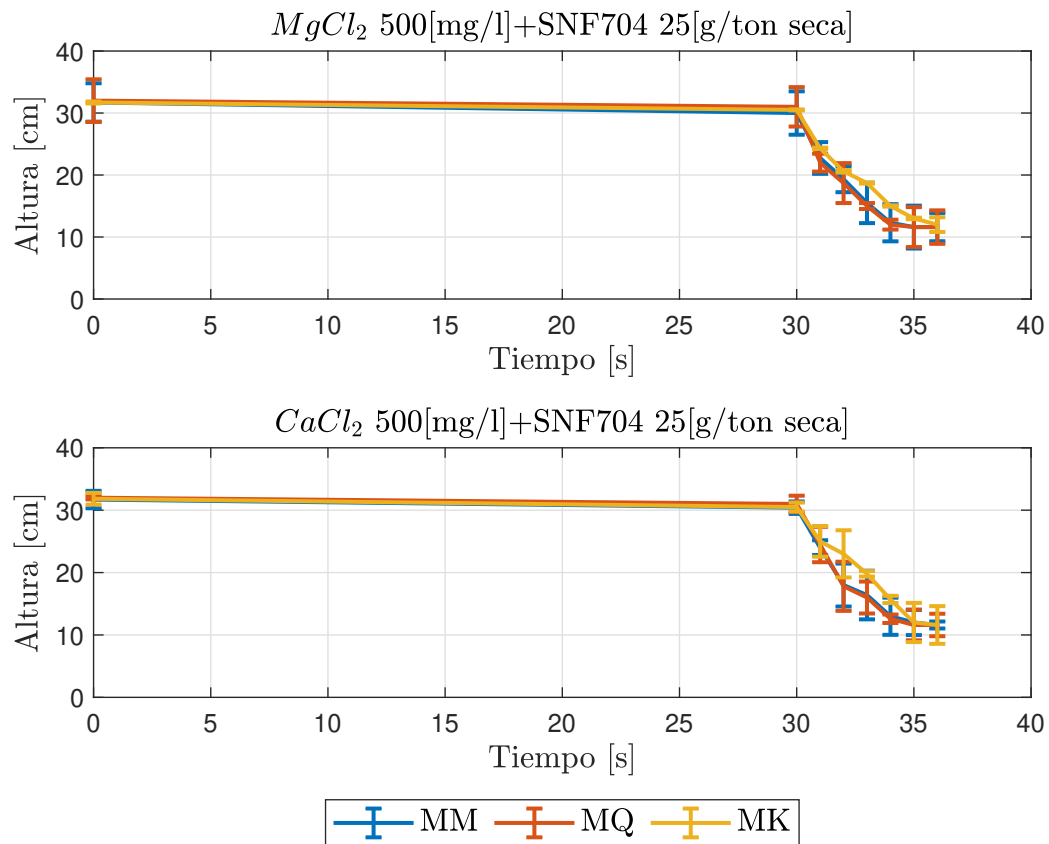


Figura 5.16: Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$  arriba y  $CaCl_2$  abajo, ambos a 500 [mg/l]) y floculante SNF704 para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas.

Asimismo, en la figura 5.17 se puede ver la variación de altura de sólido en función del tiempo desde el momento que se añadió el floculante para la zona en donde el descenso no es constante (es decir, desde los 30 segundos). En la Tabla 5.16 se resumen los valores de velocidad de sedimentación media para los casos estudiados.

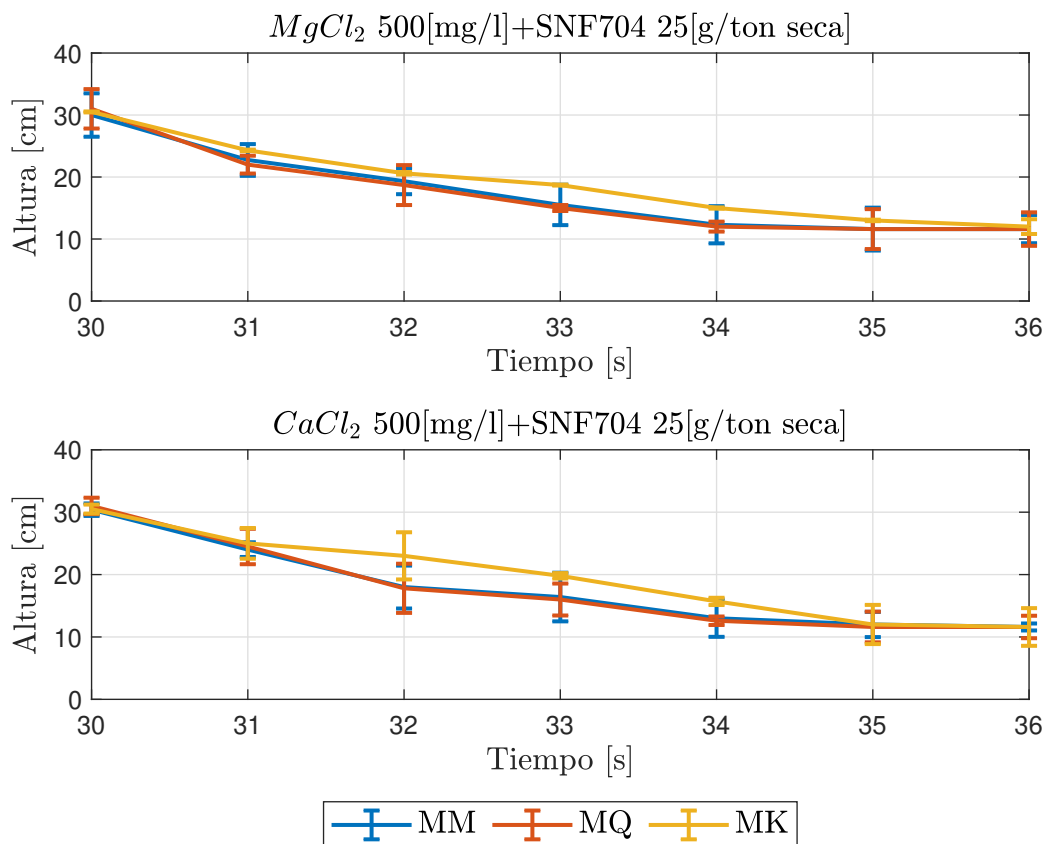


Figura 5.17: Altura de relave con respecto al tiempo tras la adición de coagulantes ( $MgCl_2$  arriba y  $CaCl_2$  abajo, ambos a 500 [mg/l]) y floculante SNF704 para relaves artificiales con distintas configuraciones de arcillas.

Tabla 5.16: Velocidad de sedimentación y eficiencia de sedimentación de proceso Coagulación-Floculación para relaves con presencia de arcillas de Bentonita.

	$MgCl_2$ +SNF704 25[g/ton seca]		$CaCl_2$ +SNF704 25[g/ton seca]	
	Velocidad de Sedimentación Promedio [cm/s]	Eficiencia de sedimentación [%]	Velocidad de Sedimentación Promedio [cm/s]	Eficiencia de sedimentación [%]
<b>MM</b>	$3.68 \pm 0.52$	94.85 %	$3.13 \pm 0.45$	80.76 %
<b>MK</b>	$3.08 \pm 0.75$	79.47 %	$3.15 \pm 0.12$	81.19 %
<b>MQ</b>	$3.88 \pm 0.23$	100.00 %	$3.88 \pm 0.27$	100.00 %

### 5.7.2. Concentración de sólidos en el sobrenadante

Al igual que en el punto 5.6, en la Tabla 5.17 se presenta la turbidez del sobrenadante pasados los 5 minutos iniciado el proceso de floculación.

Tabla 5.17: Turbidez del sobrenadante y concentración de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos transcurridos desde la adición del floculante.

	<b>MgCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>		<b>CaCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>	
	Promedio [NTU]	Promedio [mg/l]	Promedio [NTU]	Promedio [mg/l]
<b>MM</b>	38.2±4	0.003	59.5±9.5	0.017
<b>MK</b>	55.6±6.2	0.015	65.45±7.3	0.025
<b>MQ</b>	26.97±2.5	0.081	30.24±8.4	0.084

Luego, en la Tabla 5.18 se puede ver el resultado de la eficiencia de remoción de sólidos en el sobrenadante pasados 5 minutos iniciada la adición de floculantes para este tipo de relaves sintéticos.

Tabla 5.18: Porcentaje de remoción de sólidos en el sobrenadante tras 5 minutos iniciada la adición de floculante para relaves sintéticos con presencia de arcillas.

	<b>MgCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>		<b>CaCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>	
	Remoción de sólidos en el sobrenadante [%]		Remoción de sólidos en el sobrenadante [%]	
<b>MM</b>	99.84 %		99.13 %	
<b>MK</b>	99.23 %		98.75 %	
<b>MQ</b>	95.97 %		95.79 %	

Se puede ver como aumentó la eficiencia de remoción de sólidos en el sobrenadante para los casos evaluados en comparación con el caso de Coagulación o Floculación por separados.

### 5.7.3. Potencial zeta

Así como en el punto 5.6 se midió el potencial zeta y el pH del sobrenadante tras 30 minutos pasadas la coagulación y se comparó con su símil en agua destilada como se ve en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Potencial zeta y pH de sobrenadante tras 30 minutos iniciada la coagulación de relaves sintéticos con contenido de arcillas y Potencial zeta equivalente al caso sin fino.

	<b>MgCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>			<b>CaCl<sub>2</sub> +SNF704 25[g/ton seca]</b>		
	Promedio [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]	Promedio [mV]	pH	Potencial Zeta [mV]
<b>MM</b>	-20.87±1.07	8.15	-60.75	-26.24±0.34	8.26	-61.3
<b>MK</b>	-19.77±0.08	7.96	-59.9	-19.34±0.45	8.02	-60.02
<b>MQ</b>	-23.74±0.57	8.24	-61.2	-28.58±0.86	8.34	-61.7



## 5.8. Resumen de los principales resultados

A continuación, se presentan una serie de tablas resumen para poder comparar los efectos de la adición de floculante/coagulantes en función de la eficiencia de sedimentación.

### 5.8.1. Agua destilada

Tabla 5.20: Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la velocidad de sedimentación para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua destilada.

	Caso Base (sin aditivos)	Floculación	Coagulación		Coagulación + Floculación	
			$MgCl_2$	$CaCl_2$	$MgCl_2+SNF704$	$CaCl_2+SNF704$
MM	0.0 %	6.8 %	0.59 %	0.42 %	95 %	81 %
MK	2.9 %	23.6 %	0.39 %	0.29 %	79 %	81 %
MQ	9.5 %	80.9 %	0.42 %	0.44 %	100 %	100 %
KQ	4.3 %	10.7 %	0.62 %	0.02 %	-	-
KK	7.4 %	66.3 %	0.20 %	0.17 %	-	-
QQ	11.1 %	73.0 %	0.64 %	0.71 %	-	-
SF	43.2 %	100.0 %	-	-	-	-

Tabla 5.21: Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la concentración de sólidos en el sobrenadante para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua destilada.

	Caso base (sin aditivos)	Floculación	Coagulación		Coagulación + Floculación	
			$MgCl_2$	$CaCl_2$	$MgCl_2+SNF704$	$CaCl_2+SNF704$
MM	5.5 %	25.0 %	99 %	98 %	100 %	99 %
MK	16.0 %	52.5 %	100 %	98 %	99 %	99 %
MQ	49.0 %	39.5 %	96 %	97 %	96 %	96 %
KQ	59.0 %	92.5 %	99 %	97 %	-	-
KK	61.0 %	91.0 %	98 %	96 %	-	-
QQ	55.5 %	87.0 %	100 %	99 %	-	-
SF	69.5 %	71.5 %	-	-	-	-

### 5.8.2. Agua de mar

Tabla 5.22: Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la velocidad de sedimentación para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua de mar sintética

	Caso Base	Floculación
MM	2.2	7.5
MK	2.9	24.8
MQ	4.7	33.9
KQ	6.0	32.4
KK	2.3	22.4
QQ	7.4	88.1
SF	45.1	100.0

Tabla 5.23: Resumen de eficiencia de sedimentación en función de la concentración de sólidos en el sobrenadante para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua de mar sintética.

	Caso Base	Floculación
MM	5.5	73.5
MK	16.0	64.5
MQ	49.0	40.5
KQ	59.0	69.5
KK	61.0	22.0
QQ	55.5	63.0
SF	69.5	86.0

# Capítulo 6

## Conclusiones

- Se logró generar un estudio experimental para comparar el desempeño de la sedimentación a partir de la adición de químicos (floculación- coagulación) para relaves sintéticos con presencia de arcillas en agua destilada y agua de mar sintética (es decir, agua con alta salinidad).
- Se pueden distinguir efectos dispares en la eficiencia de sedimentación dependiendo del tipo de arcilla y el agua en el que está inmersa.
- Para el caso de relaves con presencia de arcillas de caolinita, se ve que la mayor eficiencia se da en el caso de la floculación en agua destilada, y al mismo tiempo, la salinidad o presencia de coagulantes catiónicos va en desmedro de ésta. Se sugiere, en el caso de contar con esta arcilla, disminuir la salinidad de la solución.
- Para el caso de relaves con presencia de arcillas de bentonita, la eficiencia de sedimentación aumenta conforme hay una mayor concentración de sales catiónicas (coagulación-agua de mar sintética). En contraste, para el caso del agua destilada la eficiencia de floculación es bajísima, por lo que se recomienda añadir un aditivo catiónico, considerando además el bajo costo económico que estos implican.
- En términos generales, la adición de coagulantes favorece la remoción de sólidos en el sobrenadante y el agregar floculante potencia un aumento en la velocidad de sedimentación. Por lo que se recomienda utilizar para el caso de las arcillas con presencia de bentonita una mezcla de coagulante y floculante, para así alcanzar un máximo de eficiencia de sedimentación.
- En el caso de los relaves con presencia de arcillas de cuarzo, no se puede distinguir un efecto claro en el aumento o disminución de la eficiencia de sedimentación con la adición de floculantes, coagulantes o al trabajar en agua de mar. Se esboza en algunos de los estudios ya presentados que la existencia de esta arcilla vendría a ser un inerte, por lo que el efecto de las estructuras que la acompañan (ya sea bentonita o caolinita) será la que prime a la hora de escoger un óptimo operacional.
- Para relaves que presentan arcillas de bentonita y caolinita, se pueden apreciar dos efectos: para el caso de agua destilada, la eficiencia de sedimentación está entre el valor de las eficiencias de sedimentación de bentonita y caolinita pura, por lo que se puede suponer que el efecto de la bentonita dificulta la capacidad del proceso. En el caso del agua con alta salinidad, se puede apreciar un aumento en la velocidad

de sedimentación con la mezcla de arcillas, por lo que se intuye un efecto de apantallamiento de la bentonita hacia la salinidad, favoreciendo la sedimentación de la caolinita.

# Capítulo 7

## Sugerencias

Para complementar el estudio, se sugieren:

- Implementar el estudio de floculación de relaves sintéticos con contenido de arcillas para otro tipo de floclulantes. En particular, se recomienda probar con floclulantes del tipo no reológico.
- Analizar el uso de otro tipo de coagulantes. El estudio se vio mermado debido a que el agua de mar sintética tiene altas concentraciones de  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{MgCl}_2$ , por lo que no fue posible llegar a una conclusión del efecto de la coagulación en el caso de agua con contenido de sal.
- Evaluar otras combinaciones de arcillas. Por ejemplo, probar un barrido de distintos  $C_p$  de bentonita en una base de caolinita y analizar los efectos en la floculación y/o coagulación de éstas.
- Comprobar y diseñar nuevos métodos físicos o químicos para la sedimentación de relaves con contenidos de arcillas.
- Evaluar el efecto del estudio en relaves reales.

# Bibliografía

- [1] COCHILCO, “Proyeccion agua mineria del cobre 2019-2030,” tech. rep., 2020.
- [2] A. Foro Consultivo Cientifico y Tecnològico, *Diagnòstico del agua en las amèricas*. 2012.
- [3] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, and A. Valero, “Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?,” *Resources*, vol. 5, no. 4, p. 36, 2016.
- [4] ISO 14688, “Geotechnical investigation and testing, Identification and classification of soil, Part 1: Identification and description,” *British Standards Institution*, vol. 2nd, no. (ISO 14688-1:2017, 2016.
- [5] H. K. Hansen, J. B. Yianatos, and L. M. Ottosen, “Speciation and leachability of copper in mine tailings from porphyry copper mining: Influence of particle size,” *Chemosphere*, vol. 60, no. 10, pp. 1497–1503, 2005.
- [6] J. Smuda, B. Dold, J. E. Spangenberg, and H. R. Pfeifer, “Geochemistry and stable isotope composition of fresh alkaline porphyry copper tailings: Implications on sources and mobility of elements during transport and early stages of deposition,” *Chemical Geology*, vol. 256, no. 1-2, pp. 62–76, 2008.
- [7] C. Wang, D. Harbottle, Q. Liu, and Z. Xu, “Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice,” *Minerals Engineering*, vol. 58, pp. 113–131, apr 2014.
- [8] S. Farrokhpay and D. Bradshaw, “Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation: a review,” *26th International Mineral . . .*, vol. 2, no. 313, pp. 4601–4611, 2012.
- [9] W. Zhang, Z. Zou, and J. Sui, “Numerical simulation of a horizontal sedimentation tank considering sludge recirculation,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 22, no. 10, pp. 1534–1538, 2010.
- [10] R. Wakeman and S. Tarleton, *Solid/liquid separation: principles of industrial filtration*. Elsevier, 2005.
- [11] F. Concha, *Manual de filtración & separación*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2001.
- [12] W. Liu, C. J. Moran, and S. Vink, “A review of the effect of water quality on flotation,” 2013.
- [13] E. Rojas, J. Munoz-Gama, M. Sepúlveda, and D. Capurro, “Process mining in

- healthcare: A literature review,” *Journal of biomedical informatics*, vol. 61, pp. 224–236, 2016.
- [14] S.-J. Park and M.-K. Seo, *Interface science and composites*, vol. 18. Academic Press, 2011.
- [15] S. Kim and S.-J. Park, “Effects of chemical treatment of carbon supports on electrochemical behaviors for platinum catalysts of fuel cells,” *Journal of power sources*, vol. 159, no. 1, pp. 42–45, 2006.
- [16] M. Czemińska, A. Szczes, and A. Jarosz-Wilkolazka, “Purification of wastewater by natural flocculants,” *BioTechnologia. Journal of Biotechnology Computational Biology and Bionanotechnology*, vol. 96, no. 4, 2015.
- [17] D. Bedell, S. Slottee, K. Parker, and L. Henderson, “Thickening process,” *Paste and thickened tailings—A guide. Nedlands, WA: The Australian Centre of Geotechnics*, pp. 49–79, 2002.
- [18] M. Brigatti, E. Galán, and B. Theng, “Chapter 2 - structure and mineralogy of clay minerals,” in *Handbook of Clay Science* (F. Bergaya and G. Lagaly, eds.), vol. 5 of *Developments in Clay Science*, pp. 21–81, Elsevier, 2013.
- [19] P. RAMSAYWOK, J. BEUKES, and M. FOWLER, “Port durnford: clay mineralogy effects in a thickener,”
- [20] B. Ndlovu, E. Forbes, S. Farrokhpay, M. Becker, D. Bradshaw, and D. Deglon, “A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals,” *Minerals Engineering*, vol. 55, pp. 383–389, 2014.
- [21] B. Wills and T. Napier-Munn, “Mineral processing technology (2006),” *T. Lokiec, H. Lokiec, Wzбудnik mlyna elektromagnetycznego, UP*, vol. 412389, p. 6, 2016.
- [22] L. Basnayaka, B. Albijanic, and N. Subasinghe, “Performance evaluation of processing clay-containing ore in knelson concentrator,” *Minerals Engineering*, vol. 152, p. 106372, 2020.
- [23] M. Jeldres, E. Piceros, P. A. Robles, N. Toro, and R. I. Jeldres, “Viscoelasticity of quartz and kaolin slurries in seawater: Importance of magnesium precipitates,” *Metals*, vol. 9, no. 10, 2019.
- [24] Y. Peng and S. Zhao, “The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation,” *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 15, pp. 1687–1693, 2011.
- [25] Y. Wang, Y. Peng, T. Nicholson, and R. A. Lauten, “The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation,” *Applied Clay Science*, vol. 114, pp. 48–52, 2015.
- [26] A. Sellgren, G. Addie, and S. Scott, “The effect of sand-clay slurries on the performance of centrifugal pumps,” *The Canadian journal of chemical engineering*, vol. 78, no. 4, pp. 764–769, 2000.
- [27] C.-L. Hung, C.-Y. Lin, and P.-C. Wu, “An efficient gpu-based multiple pattern matching algorithm for packet filtering,” *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 86, no. 2-3, pp. 347–358, 2017.

- [28] Z. Lyu, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin, and J. Cao, “A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [29] S. Contreras, “Caracterización Del Efecto De La Mineralogía, Abundancia De La Propiedades Reológicas De Relaves De Sulfuros De Cobre,” pp. 1–158, 2019.
- [30] J. P. Bidwell and S. Spotte, *Artificial seawaters: formulas and methods*. Jones and Bartlett publishers Boston, 1985.
- [31] SNF Chile, “Hojas de Datos SNF704,” tech. rep., 2018.
- [32] S. Louis, W. I. Matter, O. Substances, and A. Salts, “Product Specification (CaCl<sub>2</sub>),” *Industrial Competitiveness Cost Reduction*, pp. 75–92, 2006.
- [33] S. Louis, W. I. Matter, O. Substances, and A. Salts, “Product Specification (MgCl<sub>2</sub>),” *Industrial Competitiveness Cost Reduction*, pp. 75–92, 2006.
- [34] W. H. Leiva, P. D. Fawell, C. Goñi, N. Toro, and R. I. Jeldres, “Temporal evolution of the structure of tailings aggregates flocculated in seawater,” *Minerals Engineering*, vol. 160, p. 106708, 2021.
- [35] C. N. Castillo Ocaranza, “Estudio del efecto de las condiciones hidrodinámicas, la presencia de iones y de arcilla, en el proceso de floculación de un relave de sulfuro de cobre,” 2018.
- [36] H. Coe and G. Clevenger, “Determining thickener unit areas,” *Transactions of the AIME*, vol. 55, no. 3, 1916.
- [37] A. S. Michaels and J. C. Bolger, “Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions,” *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 1, no. 1, pp. 24–33, 1962.
- [38] R. Monsalve and J. Cantallopts, “Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre,” *Cochilco*, no. 2019, pp. 1–43, 2019.
- [39] G. R. Quezada, R. I. Jeldres, P. D. Fawell, and P. G. Toledo, “Use of molecular dynamics to study the conformation of an anionic polyelectrolyte in saline medium and its adsorption on a quartz surface,” *Minerals Engineering*, vol. 129, pp. 102–105, dec 2018.
- [40] J. J. Ramos, W. H. Leiva, C. N. Castillo, C. F. Ihle, P. D. Fawell, and R. I. Jeldres, “Seawater flocculation of clay-based mining tailings: Impact of calcium and magnesium precipitation,” *Minerals Engineering*, vol. 154, p. 106417, aug 2020.
- [41] Y. Wang, Y. Peng, T. Nicholson, and R. A. Lauten, “The role of cations in copper flotation in the presence of bentonite,” *Minerals Engineering*, vol. 96-97, pp. 108–112, 2016.
- [42] A. Owen, P. Fawell, J. Swift, and J. Farrow, “The impact of polyacrylamide flocculant solution age on flocculation performance,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 67, pp. 123–144, nov 2002.
- [43] K. Dontsova and L. D. Norton, “Effects of exchangeable Ca: Mg ratio on soil clay flocculation, infiltration and erosion,” *Sustaining the global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting (May 1999)*,



pp. 580–585, 2001.

- [44] P. Fawell, “Solid–liquid separation of clay tailings,” in *Clays in the Minerals Processing Value Chain*, pp. 327–380, Cambridge University Press, jan 2017.