

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA
Y DE MATERIALES**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**Variación de la velocidad de sedimentación de los
concentrados y relaves cuando se aplica bacterias
en el proceso de flotación.**

**Trabajo de memoria de titulación presentado en conformidad a los
requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de
Ingeniero Civil Metalúrgico.**

**Profesora Guía: Dra. Francisca San Martín Robbiano
Profesor Correferente: Dr. Sergio Palma Moya**

**Simón Gustavo Cubillos Ortiz
2022**

Dedicatoria

A mi familia.

Por ser mi pilar fundamental en mi vida

Y que sin ellos no estaría aquí.

Agradecimientos

Me faltará espacio para incluir a todas las personas en estas líneas

Quiero iniciar agradeciendo a mis padres y hermana, María Isabel, Gustavo y Brisa, por todo el apoyo brindado para llegar a donde estoy ahora.

A mis amigos Metalúrgicos: Antonia, Jennifer, Javier, Felipe, Francisca, Martín y Pablo, a los cuales conocí en primer año, con los cuales compartí largas noches de estudio y varios carretes, han sido un pilar fundamental en todo este proceso. A mis amigos de otras carreras: Amanda, Andrea, Karen, Javiera B. Javiera V., Matías, Paulina y Rocío, por estar siempre conmigo y apoyándome cuando más lo necesitaba. A mis amigos de Chiloé: Camila, Jorge, Niki, Manuel y Matías, que a pesar de la distancia siempre han estado ahí. A la Casa Beta, donde viví en Valparaíso y terminaron siendo mi segunda familia.

A mi Voluntariado Teletón Valparaíso, que hicieron mi estadía en Valparaíso más grata, además me regalaron una experiencia muy bonita y momentos que guardaré por siempre. A mis amigas que hice en el Voluntariado, Carla, Nicole, y Roesna. Gracias por todos estos años de amistad, por toda la preocupación que han tenido conmigo y el apoyo que me han brindado cuando más lo necesite.

A Leslie Pérez, por todas esas mañanas donde tomábamos desayuno y hablábamos de cualquier cosa, gracias por ser una gran amiga en mi estadía en Santiago.

A Claudia Muñoz, que conocí cuando llegué a CSJ, que sin saberlo fue un apoyo esencial y que en muy poco tiempo se volvió una persona muy importante. A Antonia Cabrera, Antonia Segovia, Diego Muñoz, Felipe Acuña y Fernanda Arriaza, que de alguna forma me ayudaron a llevar a cabo este trabajo y fueron un apoyo importante en todos estos meses en Santiago.

A CEEMIN 2022-2023, por integrarme y permitirme participar en todas sus actividades.

A los profesores de DIMMM, por todas las enseñanzas en estos años de U y en especial a Prof. Francisca San Martín y Prof. Sergio Palma, que a pesar de no conocerme me otorgaron este tema y permitieron trabajar con ellos.

Gracias a todas las personas que conocí en este proceso y que de alguna manera me brindaron su apoyo y compañía.

Este trabajo fue financiado en parte por el proyecto Fondecyt de iniciación N° 11200144:
EVALUATION CHEMOLITHOAUTOTROPHIC MICROORGANISMS AS PYRITE
DEPRESSANT IN FLOTATION OF COPPER SULFIDES WITH SEAWATER.

Este trabajo fue financiado en parte por el proyecto Fondecyt regular N° 1211469:
COMPLEX FLUIDS BEHAVIOUR AND HAZARDS PREDICTION IN UNDERGROUND
MINING: MUDRUSH AND AIRBLAST EVENTS

Resumen

Hoy en día, la minería utiliza diferentes reactivos químicos para llevar a cabo la obtención del mineral de interés, uno de los procesos a nivel industrial que utiliza una considerable cantidad de reactivos es flotación, donde se ocupa colectores, espumantes, depresante, modificador de pH, entre otros, por lo tanto, podría haber una alta contaminación ambiental, dado a esto se requiere buscar alternativas más amigables con el medio ambiente.

Existen varias investigaciones donde se utilizan microorganismos en la industria minera, como, por ejemplo, la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que ha sido utilizada en los procesos de lixiviación, oxidación y flotación. Existen varias investigaciones donde ponen a prueba la bacteria anteriormente mencionada como un depresante en el proceso de flotación, por lo que a continuación, se analizará el efecto que puede tener la adición de este microorganismos en los procesos posteriores a flotación, es decir, sedimentación, donde hay investigaciones que mencionan el uso de bacterias como floculantes en este proceso, por lo que en este estudio se analizará como afecta la bacteria *A. ferrooxidans* en la velocidad de sedimentación.

Los resultados obtenidos muestran que la bacteria *A. ferrooxidans* disminuyó la velocidad de sedimentación de las partículas en la gran mayoría de los casos en comparación con el experimento donde no se utilizó ningún tipo de reactivo, esto puede asociarse a que la bacteria funcionó como un dispersante, el cual es un reactivo que provoca una mayor repulsión entre las partículas del mineral.

Por otro lado, se analizó como afecta el uso de la bacteria en la viscosidad de los concentrados y relaves, por lo que se modeló cada experimento utilizando el modelo de Ostwald-de Waele o potencial, dado que las curvas tienen una forma similar a una potencial, además a partir de esto último se obtuvieron los parámetros “k” y “n” para cada caso y las variaciones de estos parámetros con respecto al experimento donde no se utilizó ningún reactivo o microorganismo.

Finalmente, se realizó una comparación a partir de Ley de Stokes, para observar cómo afectaba la viscosidad a la velocidad de sedimentación, donde se observó que cuando aumentaba la viscosidad, disminuía la velocidad de sedimentación.

Abstract

Today, the mining industry uses different chemical reagents to carry out the extraction of the mineral of interest, one of the process in the industry that uses a lot amount of reactive is flotation, it uses collectors, frothers, depressants, activator and pH modifier, therefore, there could be high environmental contamination, this is why it is necessary to look for more environmentally friendly alternatives.

There are investigations where microorganisms are used in the mining industry, such as, for example, the bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans*, which has been used in the leaching, oxidation and flotation processes. In the latter, there are several investigations where the previously mentioned bacterium is used as a depressant, then, the effect that the addition of this microorganism will have on the post-flotation, i.e. sedimentation, will be analyzed, where there is research that mentions the use of bacteria as flocculants in the process, so in this study we will analyze how the bacteria *A. ferrooxidans* affects the sedimentation rate.

The results obtained in sedimentation speed were not as expected, since it was initially expected that the speed would increase with the addition of the bacteria, but what actually happened was that it decreased in several cases compared to the experiment where no reagent was used, this may be associated with the fact that the bacteria functioned as a dispersant, which is a reagent that causes greater repulsion between the particles of the mineral.

On the other hand, it will be analyzed how the use of bacteria affects the viscosity of the concentrates and tailings, so the Ostwald-de Waele model will be obtained for each experiment and the variations of the parameters of interest, where no reagent or microorganism was used.

Finally, a comparison will be made based on Stokes' Law to see how viscosity will affect the sedimentation velocity, where it will be observed that as viscosity increases, the sedimentation velocity decreases.

Tabla de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Tabla de contenidos	vii
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	xi
1. Introducción.....	1
1.1 Introducción General	1
1.2 Objetivo General.....	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
2. Antecedentes Bibliográficos	5
2.1 <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	5
2.2 Flotación.....	5
2.3 Sedimentación.....	11
2.4 Reología.....	18
2.4.1 Fluido Newtoniano	18
2.4.2 Fluidos no Newtonianos	18
2.5 Modelo reológico para fluidos no newtonianos	20
2.5.1 Modelo de Ostwald-de Waele.....	20
3. Metodología Experimental.....	22
3.1 Mineral.....	22
3.2 Preparación de agua de mar artificial.....	24
3.3 Microorganismo	25
3.4 Flotación.....	28
3.5 Sedimentación.....	29
3.6 Viscosímetro.....	30
3.7 Análisis Granulométrico	31
3.8 Matriz de experimentos	32
4. Resultados y Discusiones.....	38

4.1	Concentración de Bacterias	38
4.2	Velocidad de Sedimentación en relaves con colector en flotación.	38
4.3	Velocidad de sedimentación en relaves sin colector en flotación.....	39
4.3	Velocidad de Sedimentación de concentrados con colector en flotación.	41
4.4	Velocidad de Sedimentación de concentrados sin colector en flotación.....	42
4.5	Velocidad de sedimentación en Mineral de cabeza	44
4.6	Reología de relaves con colector	46
4.7	Reología de Relaves sin colector.....	48
4.8	Reología de concentrados con colector	49
4.9	Reología de concentrados sin colector	52
4.10	Reología de Mineral de Cabeza.....	53
4.11	Efecto de la viscosidad en la velocidad de sedimentación.	54
	Conclusiones.....	57
	Referencias.....	59
	Anexo A: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Relaves.....	62
	Anexo B: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Concentrados	75
	Anexo C: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Mineral de cabeza	88
	Anexo D: Tablas y Gráficos Reología de Relaves	93
	Anexo E: Tablas y Gráficos Reología de Concentrados	97
	Anexo F: Tablas y Gráficos Reología de Mineral de Cabeza.....	101
	Anexo G	102
	Anexo H	103

Índice de Figuras

Figura 1: Producción Mundial de Cobre en TMF (Cochilco, 2022).	1
Figura 2: Uso de agua de mar en la minería del cobre 2010-2019 (m ³ /s) (Cochilco, 2020).2	
Figura 3: Proyección consumo de agua en el proceso de concentración del cobre, periodo 2020-2031 (Cochilco, 2020).	3
Figura 4: Colector xantato isopropil de sodio (Yianatos, 2008).	6
Figura 5: Adhesión del colector a la superficie del mineral (Yianatos, 2008).	6
Figura 6: Zonas de trabajo de colectores.	7
Figura 7: Espumante MIBC (Yianatos, 2008).	7
Figura 8: Adhesión espumante a la superficie de la burbuja de aire (Yianatos, 2008).....	8

Figura 9: Efecto de la bacteria en la recuperación de pirita, calcopirita y arsenopirita con una concentración 0,1 mM de colector PIPX	9
Figura 10: Comparación de los efectos de <i>A. ferrooxidans</i> y NaCN en Galena (J.V Mehrabani, 2011).....	10
Figura 11: Efecto de <i>A. ferrooxidans</i> en la recuperación de pirita en Esfalerita (J.V Mehrabani, 2011).....	11
Figura 12: Sedimentación de esferas en un líquido (Concha, 2014)	12
Figura 13: Variación de los diferentes modelos en función de la concentración volumétrica (Palma, 2016).	14
Figura 14: %Transmisión vs distancia Pirita y Calcopirita (A. Vilinska, 2008).....	16
Figura 15: Efecto de la dosificación de floculante en distintos porcentajes de sólidos (A. Videla, 2020).	17
Figura 16: Efecto ultrasonido a 10 y 20% de sólidos y con 18 g/ton de floculante (A. Videla, 2020)	17
Figura 17: Clasificación de fluidos newtonianos y no newtonianos (Vergara, 2021).....	20
Figura 18: Chancador de mandíbula Labtech Hebro.....	23
Figura 19: Molino de bolas Hebro	23
Figura 20. Tamizador.....	24
Figura 21: Solución de bacterias previo a incubación.	26
Figura 22: Solución de Bacterias posterior al tercer día de incubación.	26
Figura 23: <i>A. ferrooxidans</i> observadas en el microscopio.	27
Figura 24: Celda de Flotación Edemet.....	29
Figura 25: Probetas de 500 mL.....	30
Figura 26. Viscosímetro B-One Plus.	31
Figura 27: Curva granulométrica exp.1 Relave	32
Figura 28: Diagrama flotación-sedimentación 1 y 2	34
Figura 29: Diagrama flotación-sedimentación 3 y 4.....	34
Figura 30: Diagrama flotación-sedimentación 5 y 6.....	35
Figura 31: Diagrama flotación-sedimentación 7 y 8.....	35
Figura 32: Diagrama sedimentación exp. 9.....	36
Figura 33: Diagrama sedimentación Exp. 10	36
Figura 34: Diagrama sedimentación exp. 11.....	36
Figura 35. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).....	38

Figura 36. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).....	40
Figura 37. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).	41
Figura 38: Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de concentrados sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).	43
Figura 39. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de mineral de alimentación (exp. 9, 10 y 11).	44
Figura 40. Viscosidad vs tasa de deformación relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).	46
Figura 41. Viscosidad vs tasa de deformación relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).	48
Figura 42. Viscosidad vs tasa de deformación concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).....	50
Figura 43. Viscosidad vs tasa de deformación concentrados sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).....	52
Figura 44. Viscosidad vs tasa de deformación del mineral de alimentación (exp. 9, 10 y 11).	53
Figura 45: Curva granulométrica exp.1 Concentrado	103
Figura 46: Curva granulométrica exp.2 Relave	103
Figura 47: Curva granulométrica exp.2 Concentrado	104
Figura 48: Curva granulométrica exp.3 Relave	104
Figura 49: Curva granulométrica exp.3 Concentrado	105
Figura 50: Curva granulométrica exp.4 Relave	105
Figura 51: Curva granulométrica exp.4 Concentrado	106
Figura 52: Curva granulométrica exp.5 Relave	106
Figura 53: Curva granulométrica exp.5 Concentrado	107
Figura 54: Curva granulométrica exp.6 Relave	107
Figura 55: Curva granulométrica exp.6 Concentrado	108
Figura 56: Curva granulométrica exp.7 Relave	108
Figura 57: Curva granulométrica exp.7 Concentrado	109
Figura 58: Curva granulométrica exp.8 Relave	109
Figura 59: Curva granulométrica exp. 8 concentrado.....	110

Índice de Tablas

Tabla 1: Iones presentes en agua de mar.....	3
Tabla 2: Composición Mineralógica	22
Tabla 3: Balde 1, sales gravimétricas (Kester, 1967).	24
Tabla 4. Balde 2, sales volumétricas (Kester, 1967)	25
Tabla 5. Mallas utilizadas en tamizaje.....	31
Tabla 6. Tabla de experimentos 1.....	33
Tabla 7. Tabla de experimentos 2.....	33
Tabla 8: Comparación de la velocidad de sedimentación de relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).	39
Tabla 9. Comparación de la velocidad de sedimentación de relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).	40
Tabla 10: Comparación de la velocidad de sedimentación de concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).....	42
Tabla 11: Comparación de la velocidad de sedimentación de concentrados sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).....	43
Tabla 12: : Comparación de la velocidad de sedimentación de mineral de alimentación (exp. 9, 10 y 11).....	44
Tabla 13. Modelos reológicos (exp. 2, 4, 6 y 8).....	47
Tabla 14. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 2.....	47
Tabla 15. Modelos reológicos (exp. 1, 3, 5 y 7).....	48
Tabla 16. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 1.....	49
Tabla 17. Modelos reológicos (exp. 2, 4, 6 y 8).....	50
Tabla 18. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 2.....	50
Tabla 19. Modelos reológicos (exp. 1,3, 5 y 7).....	52
Tabla 20. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 1.....	52
Tabla 21. Modelos reológicos (exp. 9, 10 y 11).....	54
Tabla 22: Variación parámetros K y N con respecto a exp. 9.....	54
Tabla 23. Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de relaves con colector	55
Tabla 24: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de relaves sin colector	55
Tabla 25: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de concentrados con colector	55
Tabla 26: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de concentrados sin colector	56

Tabla 28: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 1 Relave.....	62
Tabla 29: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 2 Relave.....	63
Tabla 30: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 3 Relave.....	65
Tabla 31: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 4 Relave.....	67
Tabla 32: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 5 Relave.....	68
Tabla 33: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 6 Relave.....	70
Tabla 34: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 7 Relave.....	72
Tabla 35: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 8 Relave.....	73
Tabla 36: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 1 Concentrado	75
Tabla 37: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 2 Concentrado	77
Tabla 38: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 3 Concentrado	78
Tabla 39: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 4 Concentrado	80
Tabla 40: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 5 Concentrado	82
Tabla 41: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 6 Concentrado	83
Tabla 42: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 7 Concentrado	85
Tabla 43: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 8 Concentrado	87
Tabla 44: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 9.....	88
Tabla 45: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 10.....	90
Tabla 46: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 11.....	92
Tabla 47: Datos Reología Exp. 1 relave.....	94
Tabla 48: Datos Reología Exp. 2 relave.....	94
Tabla 49: Datos Reología Exp. 2 relave.....	94
Tabla 50: Datos Reología Exp. 4 relave.....	95
Tabla 51: Datos Reología Exp. 5 relave.....	95
Tabla 52: Datos Reología Exp. 6 relave.....	96
Tabla 53: Datos Reología Exp. 7 relave.....	96
Tabla 54: Datos Reología Exp. 8 relave.....	97
Tabla 55: Datos Reología Exp. 1 concentrado.....	97
Tabla 56: Datos Reología Exp. 2 concentrado.....	98
Tabla 57: Datos Reología Exp. 3 concentrado.....	98
Tabla 58: Datos Reología Exp. 4 concentrado.....	98
Tabla 59: Datos Reología Exp. 5 concentrado.....	99
Tabla 60: Datos Reología Exp. 6 concentrado.....	99
Tabla 61: Datos Reología Exp. 7 concentrado.....	100

Tabla 62: Datos Reología Exp. 8 concentrado	100
Tabla 63: Datos Reología Exp. 9 concentrado	101
Tabla 64: Datos Reología Exp. 10 concentrado	101
Tabla 65: Datos Reología Exp. 11 concentrado	102
Tabla 66: P80 de Concentrados y Relaves	102

1. Introducción

1.1 Introducción General

Por décadas, la minería del cobre se ha posicionado como una de las actividades económicas más productivas en nuestro país, donde el año 2020, aportó un 11,8% al producto interno bruto (PIB) y una producción total del año 2021 de 5,6 Millones de toneladas métricas de cobre fino (Figura 1), lo que equivale a un 26,3% de la participación total a nivel mundial, ubicando a Chile como el principal productor de cobre en el mundo, superando a países como Perú, China, Estados Unidos, Australia y Canadá (Cochilco, 2022).

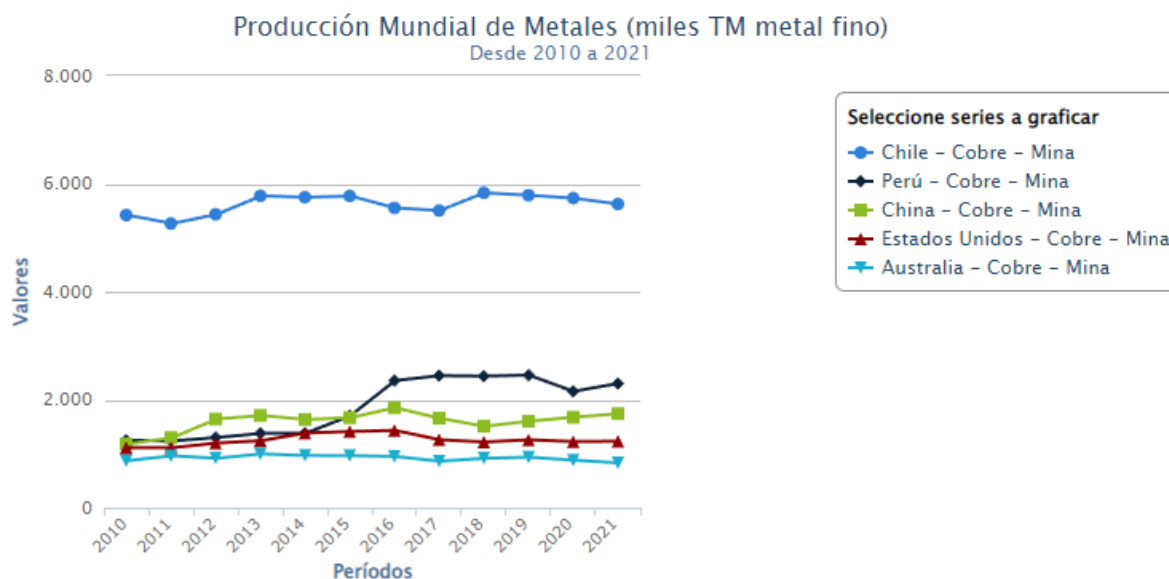


Figura 1: Producción Mundial de Cobre en TMF (Cochilco, 2022).

En la minería del cobre existen varios procesos para su obtención, entre ellos la etapa de flotación que tiene la mayor demanda de agua en la minería del cobre, con un valor de 64%. Con el correr de los años, los efluentes de agua dulce o agua continental se han vuelto cada vez más escasos, debido al desarrollo urbano en la zona, transformaciones naturales el entorno y cambios en la regulación para su uso a nivel industrial (Cochilco, 2020).

En Chile, la menor disponibilidad de agua en el país y la crisis hídrica en la zona norte ha motivado a las empresas mineras a buscar nuevas fuentes de abastecimiento para asegurar la producción. Lo anterior, ha llevado a las mineras a la utilización de agua de

mar en sus procesos mineros, donde hoy en día existen varias empresas utilizando este recurso y hay varios proyectos que buscan el uso de esta técnica. En la Figura 2, se muestra la evolución de agua de mar en la minería del cobre desde el año 2010 al 2019 (Cochilco, 2020).

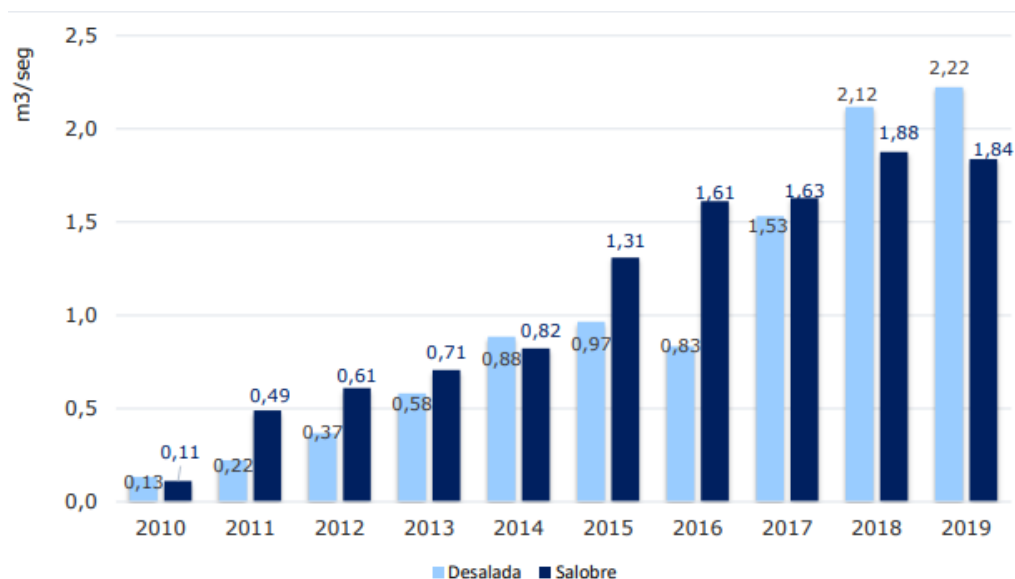


Figura 2: Uso de agua de mar en la minería del cobre 2010-2019 (m³/s) (Cochilco, 2020).

Por otro lado, en la Figura 3, se estima que, al igual que el consumo de agua fresca, el consumo de agua de mar será más significativo en la minería (valores presentados en m³/s), especialmente en el proceso de concentración, ya que se espera un aumento de la explotación de sulfuros, lo que conllevaría un mayor consumo de agua. Se espera que para el año 2031, el consumo de agua de mar alcance un 92% en el procesamiento de concentración (Cochilco, 2020).

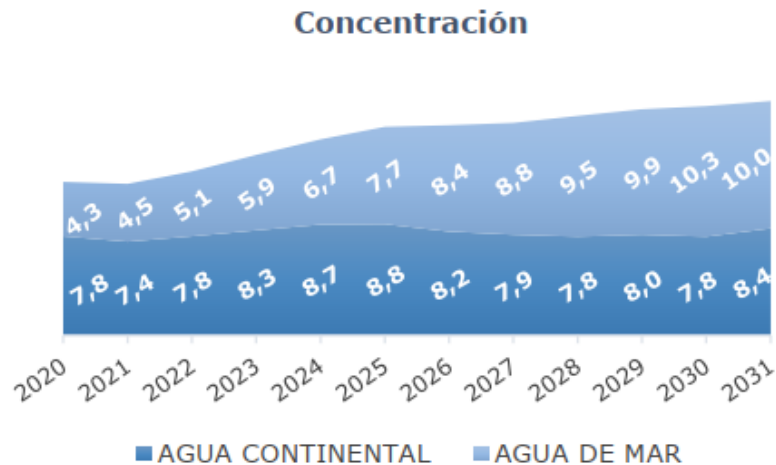


Figura 3: Proyección consumo de agua en el proceso de concentración del cobre, periodo 2020-2031 (Cochilco, 2020).

Una de las ventajas que se presenta al utilizar el agua de mar es la posibilidad de obtener permisos de explotación al no tener que disputar algún acuífero. Sin embargo, el agua de mar presenta una serie de iones que podrían afectar el procedimiento de flotación (Carrasco, 2019).

Tabla 1: Iones presentes en agua de mar (Carrasco, 2019).

Ion	%
Na ⁺	43,36
Cl ⁺	43,36
Sulfatos	7,68
Magnesio	3,68
Calcio	1,18
Potasio	1,11

En la Tabla 1 se presentan los iones que pueden afectar a las instalaciones debido al efecto corrosivo en los equipos y además el proceso se puede ver afectado, ya que puede perturbar las recuperaciones de minerales como la calcopirita. Debido a lo anterior, las mineras han instalado plantas desalinizadoras que permiten contar con agua dulce para todo el proceso de obtención de cobre. Pero existen otras mineras que no tienen plantas desalinizadoras y estas han tenido problemas con los iones mencionados en la Tabla 1, ya que provocan un efecto buffer, por lo tanto, requieren mayor consumo de cal para elevar el pH al valor requerido para deprimir la pirita en el proceso de flotación (Carrasco, 2019).

Hasta el año 2019, catorce plantas desaladoras se encuentran operativas en la minería del cobre, mientras trece plantas desaladoras están en proyecto o fase de construcción, para ponerse en marcha entre los años 2021 y 2024 (Cochilco, 2020).

Mucha agua que se ocupa en la minería es recirculada, la cual corresponde al 76% (Cochilco, 2020) del consumo total de agua, parte de esta se puede recuperar desde los espesadores, lugar donde se separan los líquidos y sólidos con la finalidad de aumentar la densidad de la pulpa y recuperar la mayor cantidad de agua posible. Este método de separación se llama sedimentación, que a partir del efecto gravitacional separa las partículas sólidas del líquido.

En el presente trabajo, se desarrollarán experimentos de laboratorio en los procesos de flotación y sedimentación, donde para el primer caso se utilizará un colector, espumante, modificador de pH y el uso de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* que es una alternativa a la cal, ya que cumple la misma función de depresante, luego en la etapa de sedimentación, se utilizará un floculante sintético o la bacteria mencionada anteriormente, todo lo anterior servirá para determinar cómo afecta el uso de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* en la velocidad de sedimentación y en la reología del material.

1.2 Objetivo General

Evaluar cómo afecta la aplicación de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* en flotación en la posterior sedimentación del concentrado y el relave.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar cómo cambia la velocidad de sedimentación de concentrados y relaves al aplicar bacterias *A. ferrooxidans* en el proceso de flotación
- Determinar cómo varía la velocidad de sedimentación al usar un floculante químico y uno biológico (bacteria *A. ferrooxidans*)
- Analizar cómo cambia la reología de relaves y concentrados en presencia de bacterias *A. ferrooxidans*.

1.4 Hipótesis

La aplicación de la bacteria *A. ferrooxidans* como depresante de pirita en el proceso de flotación provocaría un cambio en la velocidad de sedimentación en el proceso de espesamiento de concentrados y relaves.

2. Antecedentes Bibliográficos

2.1 *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Esta bacteria tiene un organismo quimiolitotrófico, es decir, es capaz de obtener energía a partir de reacciones químicas, específicamente de la oxidación de compuestos inorgánicos, como, por ejemplo, de hierro, azufre y compuestos reducidos de azufre (sulfuros metálicos, tetratitano, tiocianato, entre otros). Es considerada una bacteria acidófila y mesófila, desarrollándose óptimamente a pH inferiores a 2 y a temperaturas que se encuentran cercanos a los 30 grados. Un aspecto importante, es que la *A. ferrooxidans* puede resistir altas concentraciones de cobre, lo que es fundamental para que pueda participar del proceso de biominería, además se han realizado estudios donde la bacteria puede tolerar concentraciones de cobre hasta los 800 nM, lo cual está muy por sobre otras bacterias neutrófilas y acidófilas. Lo anterior, se debe a que la bacteria tiene un mecanismo donde una serie de proteínas cambian sus niveles de síntesis, que permite que el cobre no logre ingresar a la bacteria o que esta última no se adhiera a la superficie del cobre, además ciertas proteínas y polisacáridos desempeñan un papel muy importante en la adhesión a las superficies minerales (M. Kumar, 2020) (N. Ohmura, 1992).

2.2 Flotación

Flotación es un proceso fisicoquímico utilizado para concentrar los minerales de las menas, donde los minerales valiosos se separan de la ganga aprovechando sus diferencias de hidrofobicidad, esta característica puede ser natural o inducida a través de reactivos químicos (F. San Martín, 2018). Por otro lado, bioflotación es una variante de flotación donde se utilizan microorganismos para reemplazar los reactivos de flotación

Los reactivos químicos que son necesarios añadir para que el proceso sea selectivo son los siguientes:

- **Colector:** Reactivo que se utiliza para impartir hidrofobicidad a minerales seleccionados para hacerlo flotar. Donde su estructura está integrada por una parte polar y por una parte apolar (Figura 4).



Diagrama de un surfactante adsorbido en una superficie mineral. Se muestra una esfera grande etiquetada como "Mineral". Una cadena de átomos, representados por círculos, se extiende desde la superficie. El primer átomo está etiquetado como "ión polar" y el resto de la cadena como "cola de hidrocarburos apolar".

Existen dos tipos de colectores, dependiendo de la carga de éste: Catiónicos y aniónicos, su uso depende del pH de trabajo en los equipos y del potencial zeta (Figura 6).

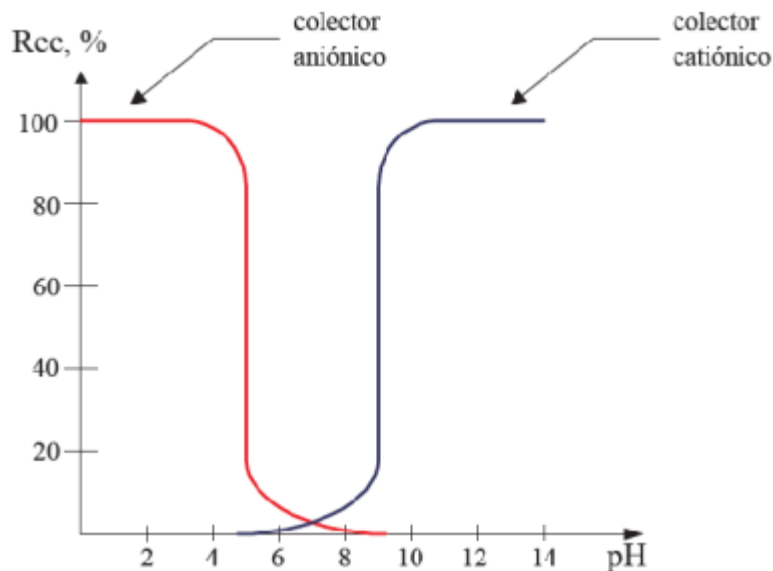


Figura 6: Zonas de trabajo de colectores.

- **Espumante:** Reactivo utilizado para ayudar a la formación de espuma. Impiden la coalescencia entre las burbujas y evitan que se rompan, donde la pequeña adición de pequeñas cantidades de sustancias activas, por ejemplo, alcoholes superiores, permiten la formación de espuma estable al agregar aire disperso, donde la estabilidad de esto dependerá de la interacción del espumante con el agua en la zona interfacial líquido-gas. Uno de los espumantes más conocidos y utilizados es MIBC (Figura 7), donde al igual que los colectores, contienen una parte polar que se orienta hacia el líquido y la parte de hidrocarburos que se orienta a la fase gaseosa (Figura 8).

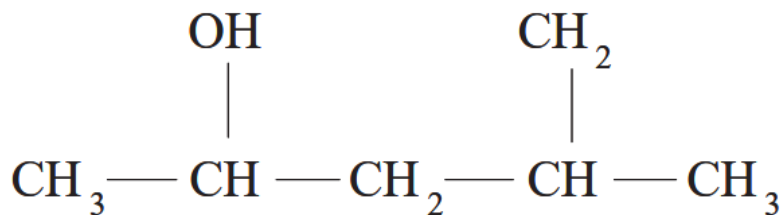


Figura 7: Espumante MIBC (Yianatos, 2008).

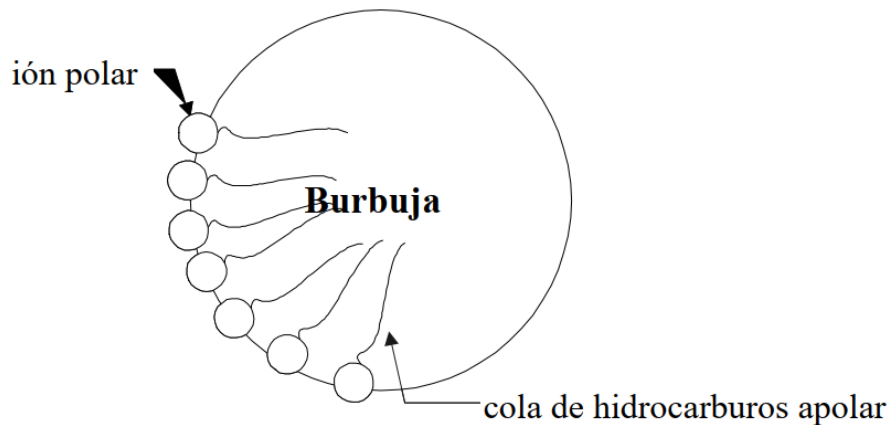


Figura 8: Adhesión espumante a la superficie de la burbuja de aire (Yianatos, 2008).

- **Activador:** Se utilizan para modificar las superficies de los minerales con el fin de hacerlos reaccionar con el colector. Un ejemplo de activador es el sulfato de cobre que se utiliza en la flotación de la esfalerita o arsenopirita, ya que para ambos casos no pueden ser flotadas solo con colector. El sulfato de cobre intercambia sus iones de cobre por los de zinc o arsénico, así el colector es capaz de reaccionar con el mineral formando xantatos de cobre.
- **Depresante:** Tiene como función inhibir o evitar la adsorción del colector en la superficie de aquellos minerales que no son valiosos en el proceso, donde vuelve a esos minerales hidrofílicos. Los depresores llevan a cabo su función de tres maneras: Impidiendo la acción del colector, eliminando la especie activadora o eliminando los colectores adsorbidos en la superficie del mineral.

Un ejemplo, es la separación Cu-Zn y Cu-Fe, donde se utiliza el cianuro para deprimir la esfalerita y la pirita de los concentrados de cobre (Yianatos, 2008).

Para el caso de la bioflotación se añade los microorganismos, que son utilizados como depresante y permiten separar los minerales de interés de la ganga (Bernardelli et al, 2017). Los microorganismos se adhieren selectivamente a los minerales, modificando sus propiedades superficiales, ya que las bacterias vuelven hidrofílicas a la superficie de la pirita. De este modo los microorganismos pueden reemplazar a los reactivos químicos que usualmente tienen un fuerte impacto ambiental.

Se han realizado varias investigaciones de cómo afecta la aplicación de la bacteria *A. ferrooxidans* en este proceso, por ejemplo, Chandraprabha, et al. (2005), analizó la depresión selectiva de la pirita a partir de la calcopirita y arsenopirita mediante el uso de la

bacteria *A. ferrooxidans* a una concentración de 3.75×10^8 bacterias/mL y además se utilizó el colector PIPX a una concentración de 0,1 mM. En la Figura 9, se puede observar que la recuperación de la calcopirita sin el uso de bacterias fue de alrededor de un 90% en todo el rango de pH, pero al utilizar la bacteria esta descendió a un valor cercano a 65% en todo el rango de pH, por otro lado, la recuperación de la pirita al no utilizar bacterias fue cercana al 100% a pH entre 5 y 7, pero esta disminuyó a valores cercanos a 20% a pH básicos, en cambio, al usar bacterias la recuperación disminuyó considerablemente a pH ácidos, ya que se alcanzó valores de alrededor de un 30%, mientras que a pH básicos no hubo una variación significativa, ya que se mantuvo a un 20% de recuperación. Finalmente, para el caso de la arsenopirita, la recuperación sin el uso de bacterias fue cercanos a un 60% en rango de pH ácidos, mientras que a pH básicos este fue disminuyendo a valores de 20%, mientras que, al usar bacterias, la recuperación disminuyó a un 50% en pH ácidos, pero no hubo variación a pH básicos. Por lo que, se puede concluir de esta investigación que la bacteria tuvo un efecto significativo en la pirita dada la disminución significativa de su recuperación a pH ácidos, pero a pH básicos no hubo un efecto, en cambio, para la calcopirita igual hubo una fuerte disminución de su recuperación, bajando desde un 90% a 65%, y, por último, la arsenopirita, se vio levemente afecta a pH ácidos, ya que disminuyó desde un 60% a 50% de recuperación.

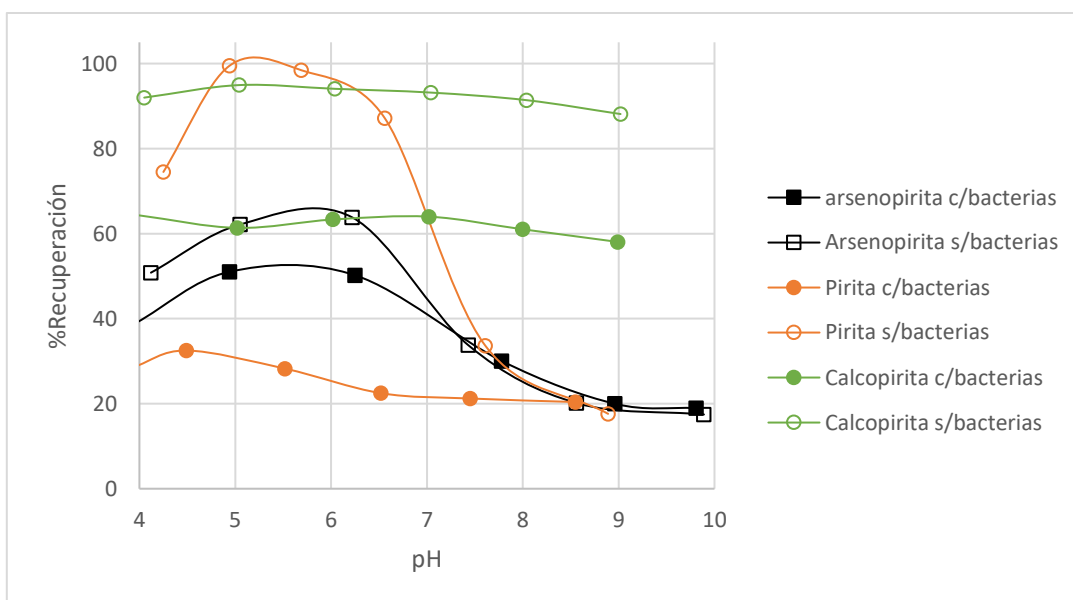


Figura 9: Efecto de la bacteria en la recuperación de pirita, calcopirita y arsenopirita con una concentración 0,1 mM de colector PIPX

Otra investigación donde se ha aplicado el uso de microorganismos fue realizada por Mehrabani et al. (2011), donde buscó reemplazar el depresante NaCN por la bacteria *A. ferrooxidans* en una mezcla de mineral que contenía pirita, galena y esfalerita, donde el colector que se utilizó fue xantato y como activador el sulfato de cobre que se utiliza solo para la esfalerita. En la Figura 10 se observa la recuperación de pirita en el concentrado de galena, utilizando solo NaCN (100 g/t) o bacteria (3×10^6 bacterias/mL) o una mezcla de ambos (50 g/t de NaCN y $1,5 \times 10^6$ bacterias/mL), y se llegó a la conclusión que utilizando la mezcla la recuperación de pirita en el concentrado es menor con un valor cercano a 6%, en comparación a usar los reactivos por separado, donde al utilizar solo NaCN se tuvo una recuperación aproximada de 10%, mientras que solo bacteria se tuvo de 9,5% de recuperación. Luego, observando el efecto de la recuperación de pirita en el concentrado de esfalerita (Figura 11), se observa que a mayor concentración de células la recuperación disminuye considerablemente en el concentrado alcanzando valores inferiores a 25%, en comparación al caso cuando no se utilizó bacterias que donde se obtuvo una recuperación de 37%.

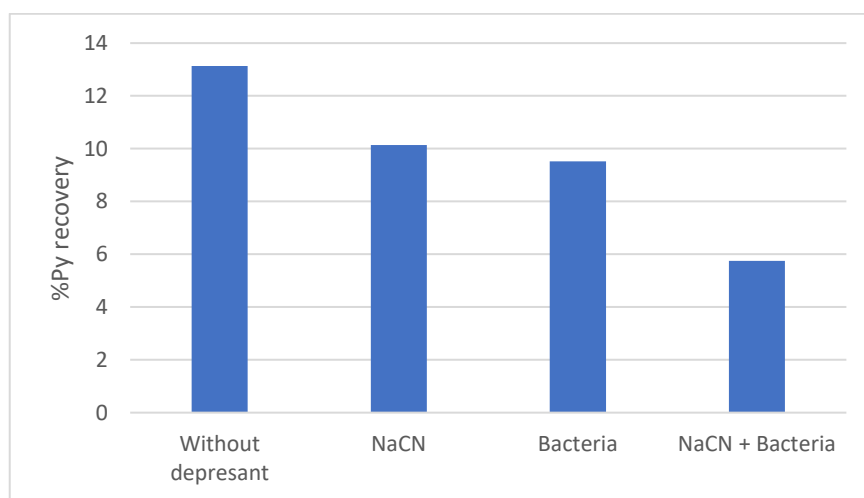


Figura 10: Comparación de los efectos de *A. ferrooxidans* y NaCN en Galena (J.V Mehrabani, 2011).

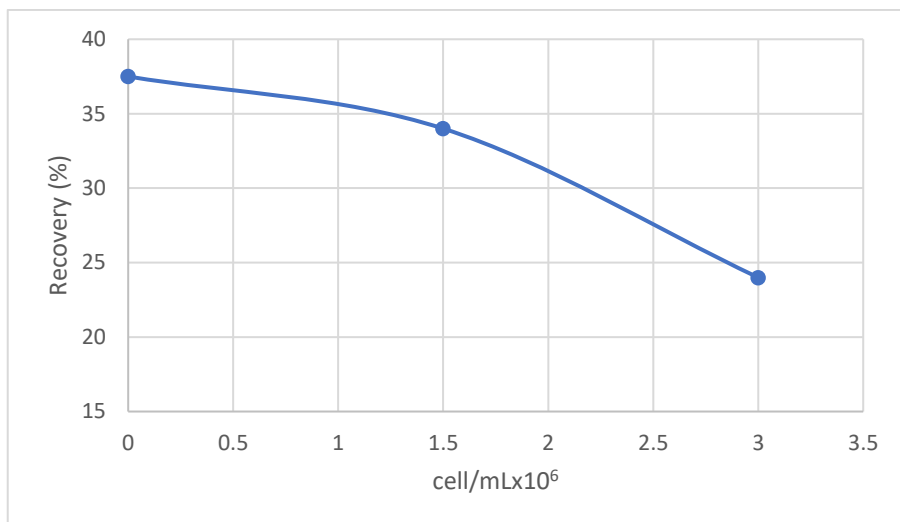


Figura 11: Efecto de *A. ferrooxidans* en la recuperación de pirita en Esfalerita (J.V Mehrabani, 2011).

2.3 Sedimentación

Se denomina sedimentación el asentamiento de una partícula, o una suspensión de partículas en un fluido por efecto de una fuerza externa, que puede ser la gravedad, una fuerza centrífuga o cualquier otra fuerza de cuerpo. Este proceso se puede observar en la naturaleza en los procesos geológicos de formación de los depósitos de rocas y minerales y, más visiblemente, en la sedimentación de gotas de agua o hielo, o en la deposición de polvo (Maldonado, 2016) (Concha, 2014).

En la Figura 12 se muestra en forma esquemática la sedimentación de esferas sólidas en un líquido. La eficiencia de la separación depende principalmente de la magnitud del campo de fuerza de cuerpo aplicada, gravitacional o centrífuga, de la diferencia de densidades entre las partículas sólida y líquida, del tamaño de las partículas y de la viscosidad del líquido.

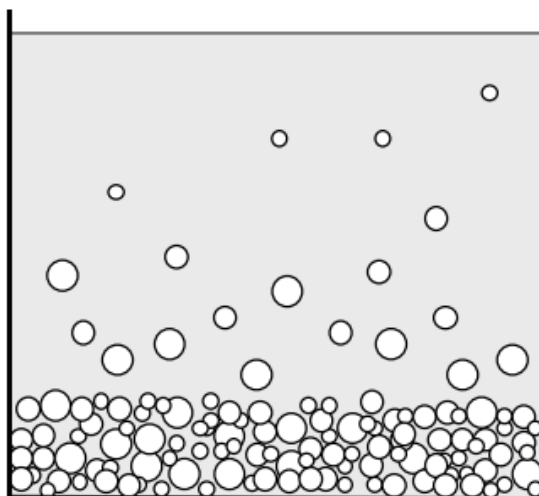


Figura 12: Sedimentación de esferas en un líquido (Concha, 2014)

Este fenómeno de sedimentación es netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento de agua para conseguir su clarificación, que está relacionado con las propiedades de caída de las partículas del agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será un fluido clarificado y una suspensión más concentrada (Maldonado, 2016).

Las partículas sólidas en suspensión sedimentan en diferentes formas, lo cual depende de las características de las partículas, así como su concentración. Estas formas son:

- Sedimentación de partículas discretas: aquellas partículas que no cambian su forma, tamaño o densidad durante la caída
- Sedimentación de partículas floculentas: aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloidales, es decir, de bajo diámetro, a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. Otra diferencia con el caso anterior es que las partículas de este tipo sí pueden cambiar su forma, tamaño o densidad durante la caída.
- Sedimentación por caída libre e interferida: ocurre cuando hay una baja concentración de partículas en el líquido donde no ocurren colisiones entre las partículas, en cambio, si hay una alta concentración de partículas, se producirá colisiones entre todas las partículas (Maldonado, 2016).

Para este estudio se considerará la sedimentación de partículas floculentas, la cual utiliza un químico llamado floculante para el proceso, este reactivo tiene como función neutralizar las cargas electrostáticas de los contaminantes en disolución en el agua, de modo que se

reducen las fuerzas de repulsión entre ellos para que las partículas se unan entre sí, formando flóculo cada vez más grandes que se pueden sedimentar más rápido, de esta forma aumentaría la velocidad de sedimentación, el cual mide la velocidad en el cual descienden las partículas en el tiempo y se calcula de la siguiente manera:

$$v = \frac{\Delta h}{t}$$

Ecuación 1: Velocidad de sedimentación

Donde:

- v = Velocidad de sedimentación
- Δh = Diferencia de altura probeta e interfase sólido líquido
- t = Tiempo

Los factores que pueden influir en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma, densidad, características hidráulicas y de suspensiones, turbiedad, entre otras cosas.

Por otro lado, otra forma de calcular la velocidad de sedimentación es a partir de la Ley de Stokes que considera el radio y la densidad de la partícula, y la viscosidad que tendrá la pulpa estudiada (Morris, 2021), además hay que tener en consideración que esta ley solo funciona para fluidos newtonianos, ya que solo considera una viscosidad.

$$v = \frac{2a^2}{9\mu}(\rho_s - \rho)gf(\phi)$$

Ecuación 2: Ley de Stokes

Donde:

- v = velocidad de sedimentación (m/s)
- a = radio de la partícula (m)
- μ = viscosidad (Pa*s)
- ρ_s = densidad del sólido (Kg/m³)
- ρ =densidad del agua (Kg/m³)
- g = gravedad (m/s²)
- $f(\phi)$ =función de escondimiento

En la Ecuación 2, se observa $f(\phi)$ el cuál es la función de escondimiento, que modela la interacción de las partículas en un medio fluido y depende de la concentración e

interacciones entre partículas. Existen varios modelos que se utilizan para describir la interacción:

$$f(\phi) = (1 - \phi) \exp(-4,19\phi)$$

Ecuación 3: Modelo de Steinour

$$f(\phi) = (1 - \phi) \exp\left(-\frac{2,5\phi}{1 - 0,609\phi}\right)$$

Ecuación 4: Modelo de Hawksley

$$f(\phi) = (1 - \phi)^{4,65}$$

Ecuación 5: Modelo de Richardson y Zaki

$$f(\phi) = \frac{1}{1 - \phi} \left[(1 - 2,15\phi) \left(1 - 0,75\phi^{\frac{1}{3}} \right) \right]$$

Ecuación 6: Modelo de Oliver

$$f(\phi) = \frac{1 - \phi}{\left(1 + \phi^{\frac{1}{3}} \right) \exp\left(\frac{5\phi}{3(1 - \phi)}\right)}$$

Ecuación 7: Modelo de Barnea & Mizrahi

Donde el comportamiento de cada modelo depende de la concentración volumétrica de las partículas y se puede observar en la Figura 13 (Palma, 2016).

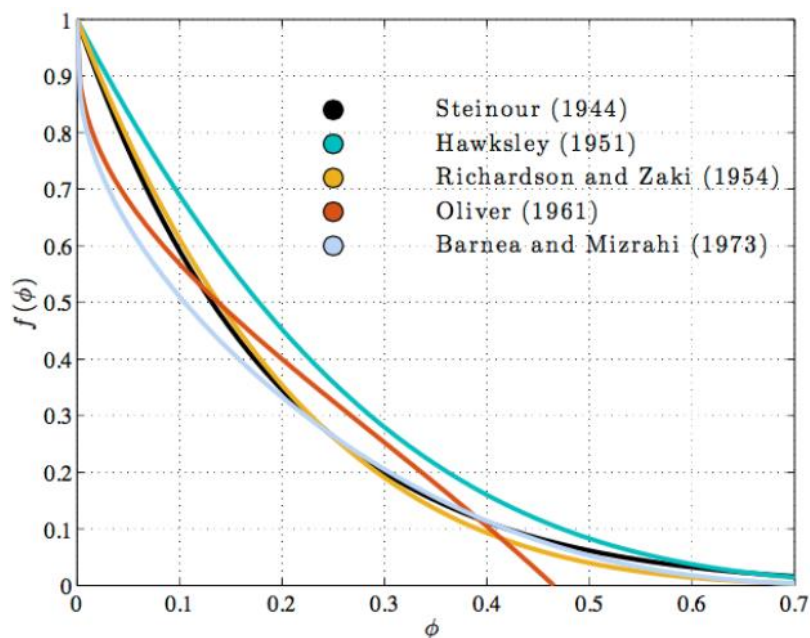


Figura 13: Variación de los diferentes modelos en función de la concentración volumétrica (Palma, 2016).

Por lo tanto, conociendo la concentración volumétrica de la pulpa se ingresa con este valor a la Figura 13 y sabiendo que función utilizar se intercepta con la curva del modelo y se tendrá el valor de la función de escondimiento. Otra forma es calcular la función a partir de las funciones anteriormente mostradas.

Algunos factores que pueden afectar en gran medida el proceso de sedimentación son factores externos, por ejemplo, el acondicionamiento previo, prácticas operacionales o factores ambientales. Si el viento que se encuentra en el lugar es muy fuerte puede provocar la suficiente intensidad como para producir cambios en la dirección del flujo. Por otro lado, una buena o inadecuada coagulación y floculación pueden ocasionar altas o bajas eficiencias en los decantadores, respectivamente. Dado a esto último, es que uno de los factores que pueden afectar la sedimentación y, por consiguiente, la velocidad de sedimentación es la aplicación de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Vilinska et al (2008) utilizaron la bacteria *Leptospirillum ferrooxidans*, a una concentración de $2,5 \times 10^8$ bacterias/mL para estudiar su efecto en la biofloculación en sedimentación en una mezcla de mineral de pirita y calcopirita. El efecto de la bacteria como floculante se midió a través de la transmisión de luz de las suspensiones de pirita y calcopirita. Si el material está muy disperso no habría transmisión de luz, pero si el material está más compacto sí habría transmisión de luz. En la Figura 14(a), se puede observar que, sin la presencia de la bacteria, el porcentaje de transmisión solo se concentra en un pequeño sector al final de la probeta, lo que indica que las partículas sólidas están muy dispersas, mientras que, con la presencia de la bacteria, tanto en la pirita como en la calcopirita si hay una mayor transmisión de luz a lo largo de la probeta, lo que indica que la bacteria está cumpliendo con su función de formar flóculos.

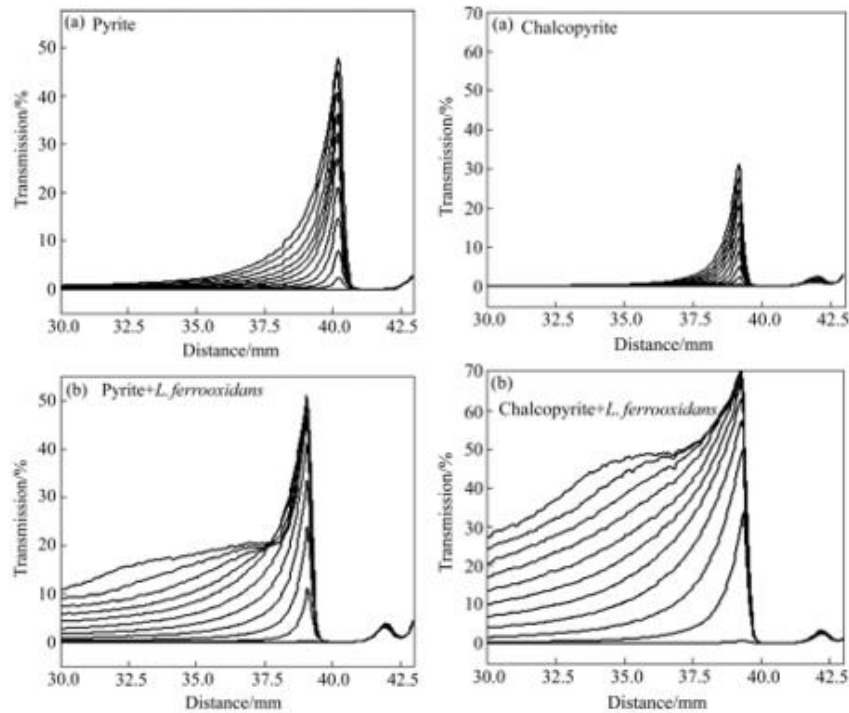


Figura 14: %Transmisión vs distancia Pirita y Calcopirita (A. Vilinska, 2008).

Videla et al. (2020) estudiaron la aplicación de ondas ultrasónicas transversales y longitudinales para evaluar su efecto y observar cual era más eficiente en la sedimentación de partículas ultrafinas ya que se ha visto que estas pueden dificultar la sedimentación. Utilizaron floculante aniónico (Rheomax DR 1050), con el fin de establecer si se puede acelerar el proceso. En la Figura 15, se puede observar los efectos del floculante sin la aplicación de ultrasonidos a diferentes porcentajes de sólido: 10%, 15%, 20%, donde el eje de ordenadas corresponde a la altura y el eje de abscisas corresponde al tiempo, además se realizaron estudios con distintas dosificaciones de floculante: 10, 18, 25 g/ton. La mayor velocidad de floculación se alcanzó cuando se tuvo una dosificación de 25 g/ton, en todos los distintos porcentajes de sólidos, esto se observa ya que, a un mayor tiempo de sedimentación, la distancia recorrida por el lecho fue mucho mayor comparado a los otros resultados. Luego, se aplicaron ultrasonidos transversales y longitudinales, con el fin de observar cual mejora el proceso de sedimentación cuando se aplica floculante a diferentes concentraciones y distintos porcentajes de sólido, donde los resultados se aprecian en la Figura 16; con un 10% y 20% de sólidos y con una dosificación de 18 g/ton, se observa que el ultrasonido longitudinal tiene un efecto mayor que el transversal, aumentando la velocidad de sedimentación.

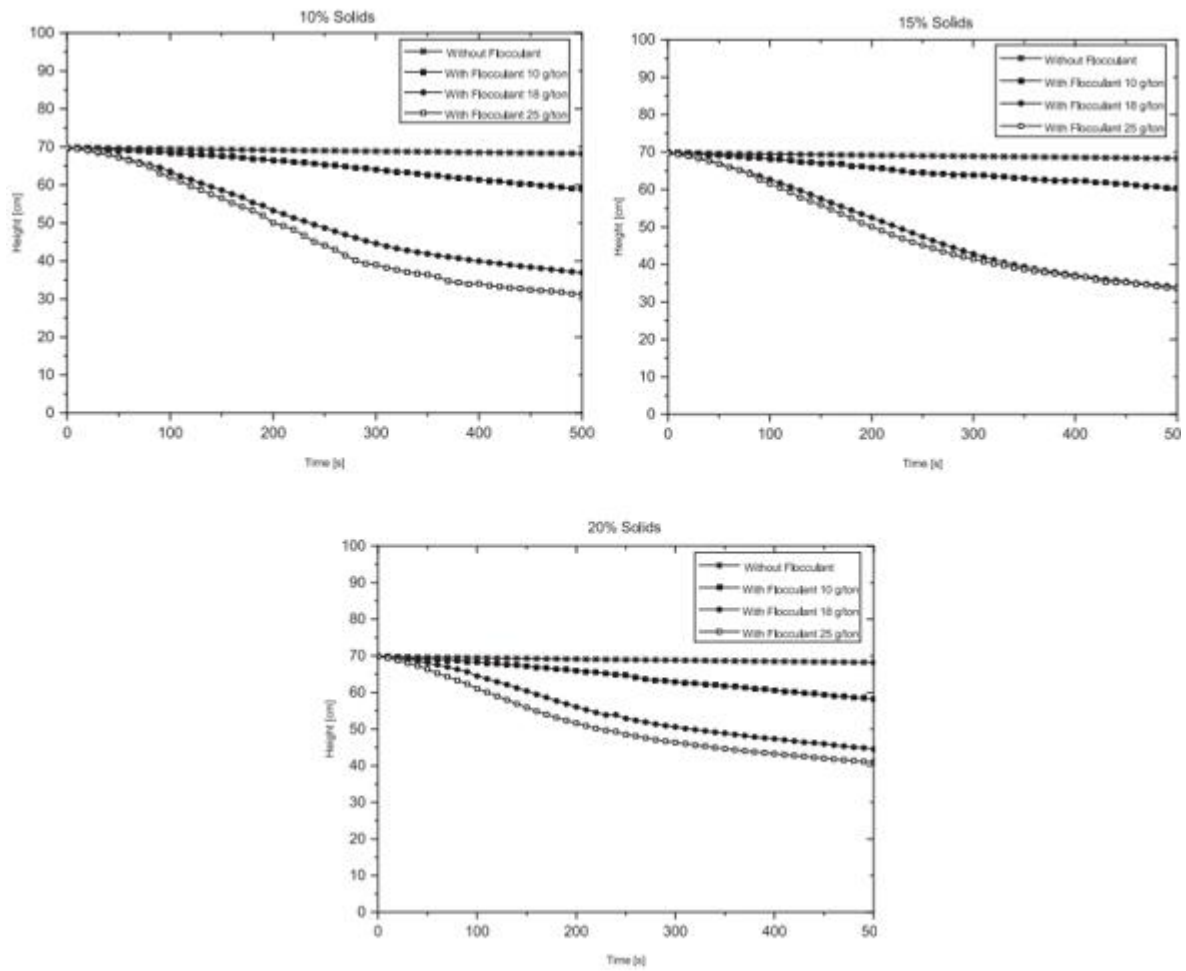


Figura 15: Efecto de la dosificación de floculante en distintos porcentajes de sólidos (A. Videla, 2020).

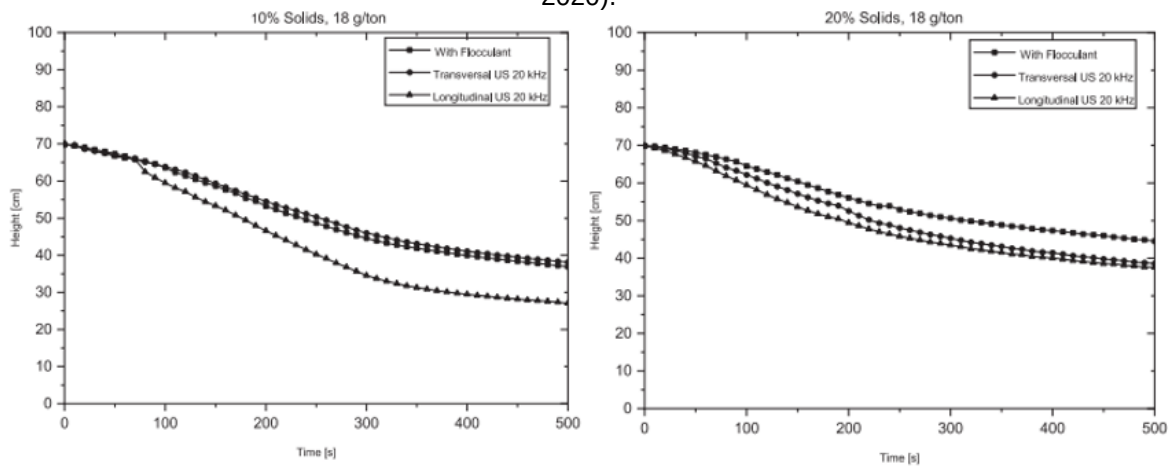


Figura 16: Efecto ultrasonido a 10 y 20% de sólidos y con 18 g/ton de floculante (A. Videla, 2020)

2.4 Reología

La reología es el estudio de la deformación y el fluir de la materia, y dado que las pulpas de minerales son transportadas mediante bombeo o presión a través de las tuberías, es necesario conocer las propiedades reológicas de éstas.

Las propiedades estudiadas son la viscosidad y el esfuerzo de corte de fluencia de los fluidos, mientras que las principales variables que inciden en ellas son la concentración de sólidos, granulometría, temperatura, pH, mineralogía, concentración y tipo de reactivos, en esta última entraría las bacterias, ya que estos microorganismos actúan como reactivos dentro del proceso de flotación y sedimentación (Instruments, 2016) (Merril, 2016).

Un fluido es caracterizado según el comportamiento de su deformación ante la aplicación de una fuerza cortante externa, dado esto, los fluidos se clasifican en dos grupos: fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.

2.4.1 Fluido Newtoniano

Cuando la relación que existe entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de deformación del cuerpo es un comportamiento lineal, el fluido se denomina newtoniano, donde se puede encontrar, por ejemplo, el aire, el agua, la gasolina, entre otros.

Estos tipos de fluidos se rigen por la ley de viscosidad de Newton, la cual establece que la fuerza tangencial ejercida por el fluido en contacto con una superficie u otro cuerpo es directamente proporcional a la tasa de deformación tangencial que este experimenta este al fluir, siendo esta constante. Matemáticamente se puede escribir (Vergara, 2021):

$$\tau = \mu\gamma$$

Ecuación 8: Ley de viscosidad de newton para fluidos newtonianos

Donde:

- τ = esfuerzo de corte aplicado.
- μ = Viscosidad dinámica del fluido.
- γ = tasa de deformación del fluido.

2.4.2 Fluidos no Newtonianos

Los fluidos no newtonianos se caracterizan porque el comportamiento entre el esfuerzo cortante y el gradiente de deformación es no lineal. En ellos, se observan tres distintos tipos de comportamiento:

- El esfuerzo de corte depende solamente del gradiente de deformación ($\tau = f(\dot{\gamma})$), donde en esta categoría entran los fluidos pseudoplásticos, dilatantes y plásticos de Bingham.
- El esfuerzo de corte depende de la gradiente de deformación y el tiempo ($\tau = f(\dot{\gamma}, t)$), como los fluidos tixotrópicos y reopéticos.
- El fluido reacciona elásticamente (viscoelásticos), donde la energía de deformación es recuperada tal como sucede con los sólidos elásticos.

Los fluidos no newtonianos se pueden describir de las siguientes maneras:

- **Fluidos dilatantes:** aquellos donde la resistencia a la deformación aumenta gradualmente al aumentar el cizalle, el comportamiento que exhiben estas sustancias es como las arenas movedizas o el almidón.
- **Fluidos pseudoplásticos:** aquellos fluidos donde disminuye su resistencia a la deformación al aumentar el cizalle, algunos ejemplos son las suspensiones, las pulpas en agua, el plasma de la sangre o las resinas.
- **Plásticos de Bingham:** en el caso límite de los fluidos plásticos, están los que requieren de un esfuerzo cortante finito para comenzar a fluir. Estos presentan un comportamiento elástico para valores menores a un esfuerzo cortante de fluencia (τ_0) y sobre este valor, muestran un comportamiento similar al de un fluido newtoniano (Vergara, 2021).

La relación que siguen los fluidos plásticos de Bingham tiene la siguiente estructura:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$$

Ecuación 9: Modelo de Bingham

Este tipo de modelos ideales se aplican con frecuencia en fluidos como pinturas, lodos y sólidos en suspensión en líquidos (como en el caso de relaves mineros).

La Figura 17 muestra la clasificación genérica de los fluidos descritos anteriormente.

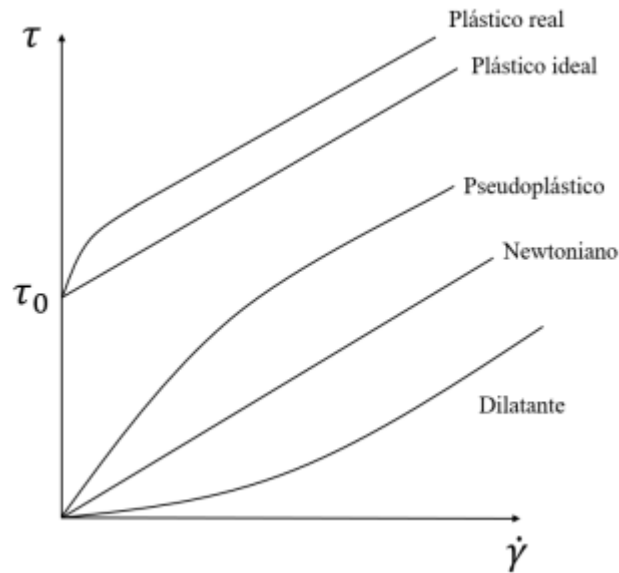


Figura 17: Clasificación de fluidos newtonianos y no newtonianos (Vergara, 2021)

Un fluido newtoniano puede ser presentado como una recta que pasa por el origen y cuya pendiente es la viscosidad. Plástico de Bingham se comporta como newtoniano al momento de alcanzar un esfuerzo mínimo (τ_0), posteriormente, al seguir aumentando el gradiente de velocidad se incrementa de forma lineal la tensión de cizallamiento

2.5 Modelo reológico para fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos independiente del tiempo tienen la particularidad que varían su viscosidad una vez comienzan a fluir. Esta característica depende fuertemente de la tasa de deformación del fluido, por lo que es importante evaluar la relación entre ambos parámetros. Diversos autores han desarrollado modelos reológicos que se ajustan a los distintos tipos de fluidos según la variación de la viscosidad como función de la tasa de deformación. A continuación, se presenta el Modelo de Ostwald-de Waele o potencial, dado que la curva tiene una forma de potencia.

2.5.1 Modelo de Ostwald-de Waele

Uno de los modelos de viscosidad más simples que permiten describir el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos, es el modelo de Ostwald-de Waele, basado en la ley de potencia y descrito de la siguiente manera

$$\tau = k\gamma^n$$

$$\mu(\gamma) = k\gamma^{n-1}$$

Ecuación 10: Modelo de Ostwald-de Waele

Donde:

- $\mu(\dot{\gamma})$ = viscosidad aparente o efectiva del fluido no newtoniano (dependiente de la tasa de deformación)
- k = índice de consistencia del fluido
- n = índice de comportamiento

Si $n < 1$ el fluido se “adelgaza” a medida que aumenta la tensión de corte, comportamiento acorde a un fluido pseudoplástico; si $n > 1$ el fluido se “espesa”, como un fluido dilatante y si $n = 1$, entonces $k = \mu$, lo que indica que el fluido es newtoniano.

Una desventaja de este tipo de modelos es que los parámetros k y n no tienen interpretación física directa, sino que son constantes que dependen del ajuste aplicado a cada fluido (Vergara, 2021).

3. Metodología Experimental

A continuación, se detalla la metodología de los experimentos que se llevaron a cabo para evaluar el uso de la bacteria *A. ferrooxidans* en el proceso de flotación y sedimentación de concentrados y relaves.

3.1 Mineral

El mineral fue obtenido de la mina Inca de Oro (cerca de Copiapó) con una composición que se puede apreciar en la Tabla 2. En primer lugar el mineral fue sometido a conminución en un chancador de mandíbula Labtech Hebro (Figura 18) y luego por un molino de bolas Hebro (Figura 19), y finalmente fue tamizado (Figura 20) para dejarlo bajo malla #70 (212 μm).

Tabla 2: Composición Mineralógica

Mineral	%Peso
Calcopirita	4,16
Calcosina	0,08
Covelina	0,0235
Bornita	0,0261
Tennantita	0,18
Enargita	0,104
Atacamita	0,05
Copper Wad	0,20
Pirita	2,43
Hematita	0,09
Limonita	0,38
Rutilo	0,18



Figura 18: Chancador de mandíbula Labtech Hebro



Figura 19: Molino de bolas Hebro



Figura 20. Tamizador.

3.2 Preparación de agua de mar artificial

Todos los experimentos se realizaron con agua de mar que fue preparada en el laboratorio. Se prepararon 10 litros de agua, lo que alcanzó para 4 experimentos. Se prepararon 5 litros de agua en un balde y el resto en otro balde, ya que en el primero se prepararon las sales gravimétricas y en el segundo las sales volumétricas. Las sales gravimétricas y volumétricas se presentan en Tabla 3 y 4, respectivamente. Luego, se agitó para disolver las sales, y posteriormente se trasvasió todo a un mismo balde para finalmente agitar hasta alcanzar un pH entre 7,8 y 8,2, ya que dentro de este rango se encuentra el pH del agua de mar (Kester, 1967).

Tabla 3: Balde 1, sales gravimétricas (Kester, 1967).

Sal	g/kg por solución	Cantidad para 10 litros (g)
NaCl	23,926	239,26
Na ₂ SO ₄	4,008	40,08
KCl	0,677	6,77
NaHCO ₃	0,196	1,96
KBr	0,098	0,98
H ₃ BO ₃	0,026	0,26
NaF	0,003	0,03

Tabla 4. Balde 2, sales volumétricas (Kester, 1967)

Sal	g/kg por solución	Cantidad para 10 litros (g)
MgCl ₂ ×6H ₂ O	10,831	108,31
CaCl ₂ ×2H ₂ O	1,519	15,19
SrCl ₂ ×6H ₂ O	0,024	0,24

3.3 Microorganismo

Las bacterias que se utilizaron en este trabajo corresponden a la cepa *A. ferrooxidans* ATCC19859. Se cultivaron a 30°C en un medio estéril con 0,4 g/L de sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄), 0,056 g/L de trihidrato de hidrógeno fosfato de di-potasio (K₂HPO₄ × 3H₂O) y 0,4 g/L de sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO₄ × 7H₂O) a pH 1,6. Se utilizó sulfato de hierro heptahidratado (FeSO₄ × 7H₂O) como sustrato. El medio estéril se inoculó con *A. ferrooxidans* y una solución al 33% (p/v) de sulfato de hierro heptahidratado obteniendo una concentración de 0,05 M de FeSO₄ × 7H₂O. Se prepararon dos matraces Erlenmeyer de 1000 mL y otros 2 matraces de 250 mL, con las siguientes cantidades (F. San Martín, 2018):

- Matraz Erlenmeyer de 1000 mL:
 - 362 mL de medio de cultivo
 - 18 mL de solución de sulfato de hierro
 - 20 mL de solución de bacterias
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL:
 - 90,5 mL de medio de cultivo
 - 4,5 mL de solución de sulfato de hierro
 - 5 mL de solución de bacterias.

Luego todos los matraces mencionados fueron llevados al shaker a 30°C y 100 rpm durante tres días de incubación. En Figura 22 se presenta una foto de los matraces con bacterias previo a la incubación. Después del tercer día, la solución que contenía las células se filtró con papel filtro Whatman 42 para eliminar los sólidos precipitados. Luego se filtraron con una membrana Millipore de 0,22 µm con el fin de obtener células libres de metabolitos y sin hierro. Finalmente, este filtro se dejó en un vaso precipitado y se resuspendieron las bacterias en 1 mL de agua destilada por cada 400 mL de solución hechas. En Figura 22 se

observan los matraces después del tercer día de incubación, se aprecia que la solución tomó un color anaranjado debido a la oxidación del hierro.



Figura 21: Solución de bacterias previo a incubación.

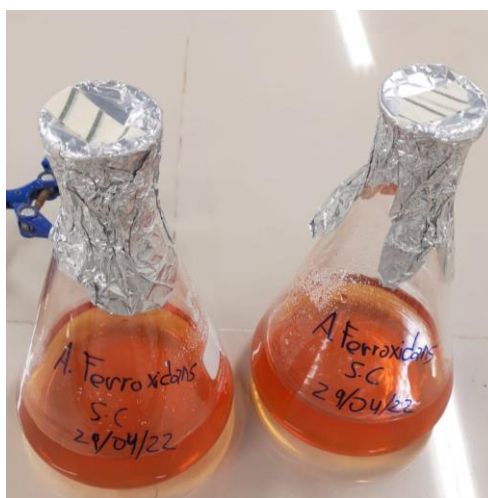


Figura 22: Solución de Bacterias posterior al tercer día de incubación.

Para realizar el conteo de bacterias, se diluyeron las bacterias concentradas agregando 0,2 mL de estas y 1,8 mL de agua para alcanzar una dilución 10, se agitaron y se extrajeron 20 uL de la dilución para contar las bacterias en el microscopio Olympus con un objetivo 40x. En la Figura 23 se puede observar las bacterias a nivel microscopio

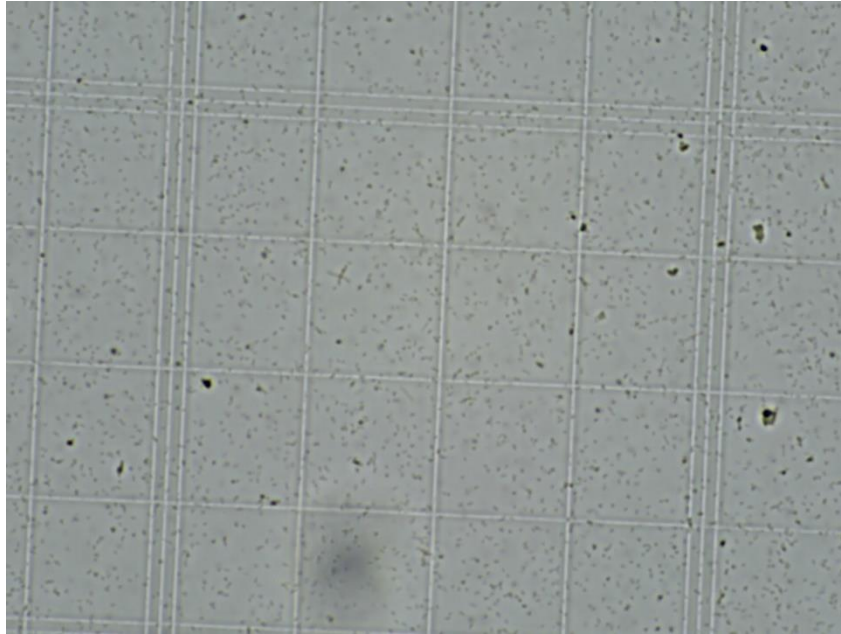


Figura 23: *A. ferrooxidans* observadas en el microscopio.

Finalmente, para obtener la concentración de bacterias que se utilizó en los experimentos, se eligieron cinco cuadros de la imagen extraída del microscopio (Figura 23), se contaron las bacterias que había en cada cuadro y se obtuvo un promedio, luego considerando que el volumen de un cuadro es $0,00025 \text{ mm}^3$ se determinó la concentración de bacterias con la siguiente ecuación:

$$C_1 = \frac{\bar{x}}{V_{\text{cuadrado}}} F$$

Ecuación 11: Concentración de Bacterias

Donde:

- C_1 = concentración de bacterias 1
- $\bar{x}$ = promedio de bacterias contadas
- F = factor de Dilución
- V = volumen del cuadro

De esta ecuación se va a obtener una primera concentración que va a corresponder a la concentración de la solución de bacterias que se agregan al proceso (0,5 mL), pero se debe conocer la concentración de bacterias cuando estas estén disueltas en el proceso, por lo que es necesario conocer el volumen del líquido con el que se trabajará, por ejemplo,

en flotación el volumen del líquido es 1283 mL. Por lo que la concentración de bacterias en flotación (C_2) se determina con la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

- C_1 = concentración de bacterias en solución inicial
- V_1 = volumen de la solución inicial que se agrega=0,5 mL
- C_2 = concentración de bacterias en experimento
- V_2 = volumen de solución del experimento=1283 mL

Por lo tanto, de esta ecuación se obtendrá la concentración de bacterias final.

3.4 Flotación

Se determinó la cantidad de agua, la dosificación de los reactivos y la cantidad de mineral utilizados. Al conocer los valores anteriormente mencionados, en una celda de flotación automatizada Edemet (Figura 24) se procedió a agregar el agua y el mineral para poner en funcionamiento el sistema de agitación del equipo, luego se ajustó a un pH 8 agregando al sistema modificador de pH (ácido sulfúrico y NaOH), luego se depositó el colector (Isopropil xantato de sodio), el espumante (MIBC), y la bacteria *A. ferrooxidans* (en los experimentos que se requieran), para finalmente abrir la entrada de aire a la celda. Las dosificaciones de colector y espumante son los siguientes:

- Colector: 0 y 150 g/t
- Espumante: 12 μ L

Luego de un tiempo de acondicionamiento de 5 min, en los experimentos que no se utilizaron bacterias, y un tiempo de 20 min, para los casos donde sí se utilizaron, se comenzó la recolección del concentrado que sale por el rebalse de la celda para depositarlo en una bandeja. Cabe destacar que el tiempo de flotación fue de 6 min, por otro lado, el relave se dejará en un balde para que tanto este último, como el concentrado pasen a la etapa de sedimentación.



Figura 24: Celda de Flotación Edemet.

3.5 Sedimentación

En primer lugar, se debe determinar el porcentaje de sólidos, pesándola en una balanza Marcy, luego para los casos donde se utilice microorganismos se debe acondicionar la pulpa por 15 minutos para que la bacteria se pueda adherir a la superficie del mineral, después se debe agregar la pulpa a una probeta de 500 mL para dejarla en un lugar plano y grabar todo el proceso de sedimentación. Se utilizó el floculante Magnafloc 7793LT tanto para concentrados y relaves. Para la preparación se debía tener una solución con este reactivo con dos horas de anticipación. Para esto en un vaso precipitado de 1000 mL se agregaron 500 mL de agua, luego se agitó hasta crear un vórtice y se añadieron 0,5 g en el borde del vórtice para que se pudiera dispersar de buena manera. Se agitó por un tiempo entre 60 a 90 minutos. Posteriormente, se diluyó la solución floculante al 0,1% en 20 mL de agua. En Figura 26 se observa la probeta utilizada en los experimentos de sedimentación.

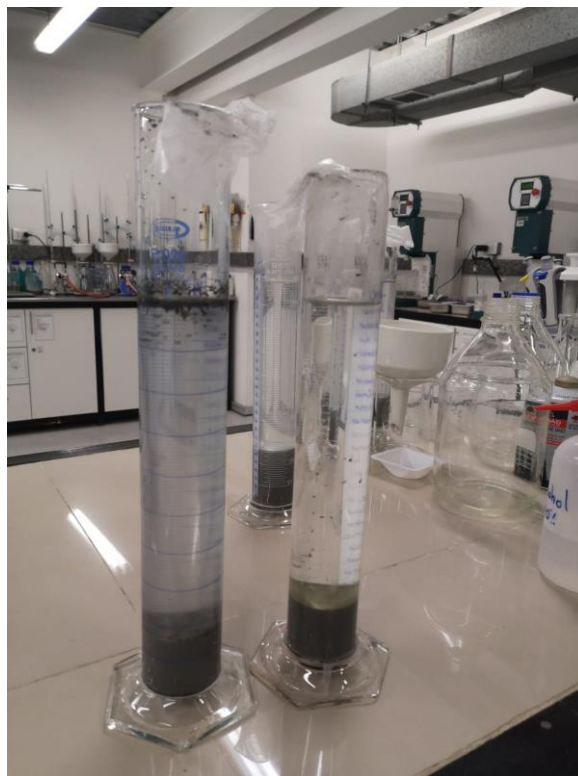


Figura 25: Probetas de 500 mL.

3.6 Viscosímetro

En un vaso precipitado de 250 mL se añadió pulpa sedimentada hasta los 100 mL y luego se agregó agua proveniente de sedimentación hasta los 200 mL para obtener una razón de 1:1.

Posteriormente, se procedió a utilizar el viscosímetro B-One Plus (Figura 26), en donde al interior del vaso precipitado con la muestra totalmente agitada se depositó un disco que toma los resultados de viscosidad. Para la toma de medidas se variaron los RPM con el que gira el disco, donde se partió con un valor de 5 RPM y luego se subió otros 5 RPM hasta llegar al valor de 40 RPM, desde este punto en adelante se subió en 20 RPM hasta llegar a los 250 RPM, el cual es el valor máximo que puede girar el disco. A partir de estas mediciones se pudo obtener la viscosidad, tensión de corte, esfuerzo de torsión y porcentaje de torque, además, se pudo obtener la tasa de deformación con los RPM y la altura y radio del disco, los cuales son 31 mm y 23,5 mm, respectivamente.

A partir de los datos obtenidos se construyó un gráfico de viscosidad vs tasa de deformación, donde se observará como afecta a la viscosidad si se utiliza la bacteria,

floculante químico o ninguno de los mencionados anteriormente y se obtendrá el modelo más adecuado para relaves y concentrados.

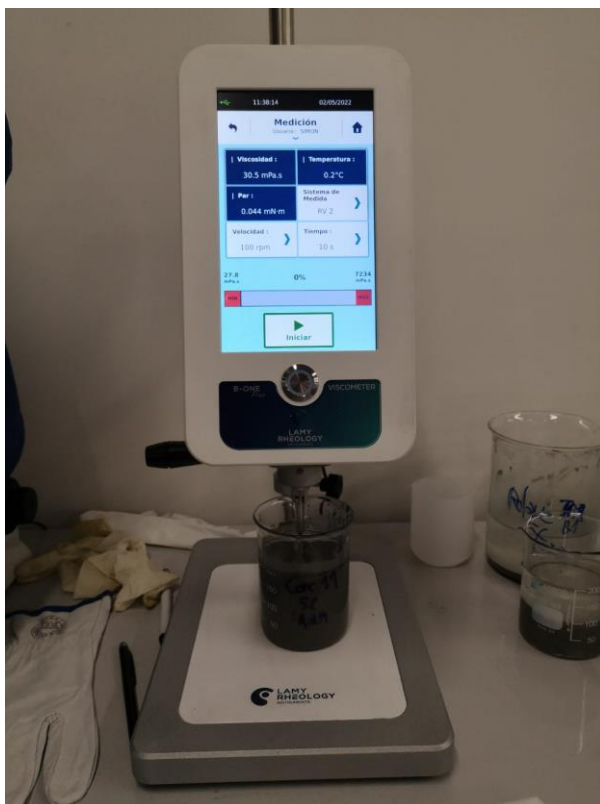


Figura 26. Viscosímetro B-One Plus.

3.7 Análisis Granulométrico

Utilizando los tamices presentados en la Tabla 5, se procedió a tarar cada tamiz para conocer su masa previo al tamizaje, luego se ubicaron los tamices con el mineral seco dentro del tamizador de la Figura 20 para ponerlo en funcionamiento durante 10 minutos. Luego del tamizaje, se procedió a pesar los tamices para conocer la masa de mineral que quedó retenida en la malla, se calculó el porcentaje de masa retenida, el pasante y el acumulado de ambos casos, finalmente se realizó el gráfico de porcentaje pasante acumulado vs abertura (Figura 27) y de esta forma se obtuvo el P80.

Tabla 5. Mallas utilizadas en tamizaje.

N° Malla	Abertura (μm)
70	212
100	150
140	106
200	75

270	53
400	38
-400	-

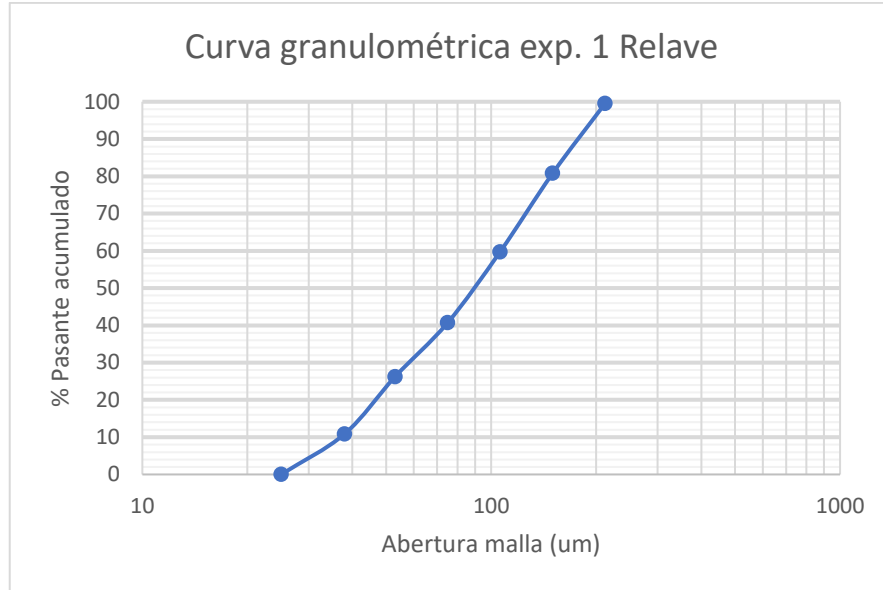


Figura 27: Curva granulométrica exp.1 Relave

A partir de la curva granulométrica se utiliza el modelo de Gates-Gaudin-Schumann linealizado (Ecuación 113) se estima el P80 para cada experimento, por lo que, a partir este dato, más las velocidades experimentales y el modelo de Steinour (Ecuación 3), se calcula la viscosidad representativa

$$P = 100 \left(\frac{X}{K} \right)^{\alpha}$$

Ecuación 12: Modelo Gates-Gaudin-Schumann

$$\log P = \alpha \log X + \log 100 - \alpha \log K$$

Ecuación 113: Modelo Gates-Gaudin-Schumann linealizado

Las demás curvas granulométricas se pueden encontrar en Anexo H

3.8 Matriz de experimentos

A continuación, se presenta la Tabla 6 con los experimentos que se realizaron a lo largo de la investigación y con los que se esperan cumplir los objetivos mostrados anteriormente, donde se realiza una sedimentación de concentrados y relaves provenientes del proceso

de flotación. Por otro lado, en la Tabla 7 se tiene tres experimentos más donde se sedimentó mineral de cabeza directamente sin pasar por un previo proceso de flotación.

Tabla 6. Tabla de experimentos 1.

Experimentos	Flotación				Sedimentación
	Colector	Espumante	Modificador pH	Bacteria	Floculante o coagulante
Experimento 1	0	Si	Si	No	No
Experimento 2	150	Si	Si	No	No
Experimento 3	0	Si	Si	Si	No
Experimento 4	150	Si	Si	Si	No
Experimento 5	0	Si	Si	No	Químico
Experimento 6	150	Si	Si	No	Químico
Experimento 7	0	Si	Si	No	Bacteria
Experimento 8	150	Si	Si	No	Bacteria

Tabla 7. Tabla de experimentos 2.

Sedimentación	
Experimentos	Floculante
Experimento 9	No
Experimento 10	Químico
Experimento 11	Bacteria

A continuación, se presenta el diagrama del proceso que se va a seguir para cada experimento, donde en la etapa de flotación se utilizó colector, espumante, modificador de pH y bacteria, luego, siguiendo con el proceso en sedimentación, tanto del concentrado como el relave se utilizará el floculante o bacteria.

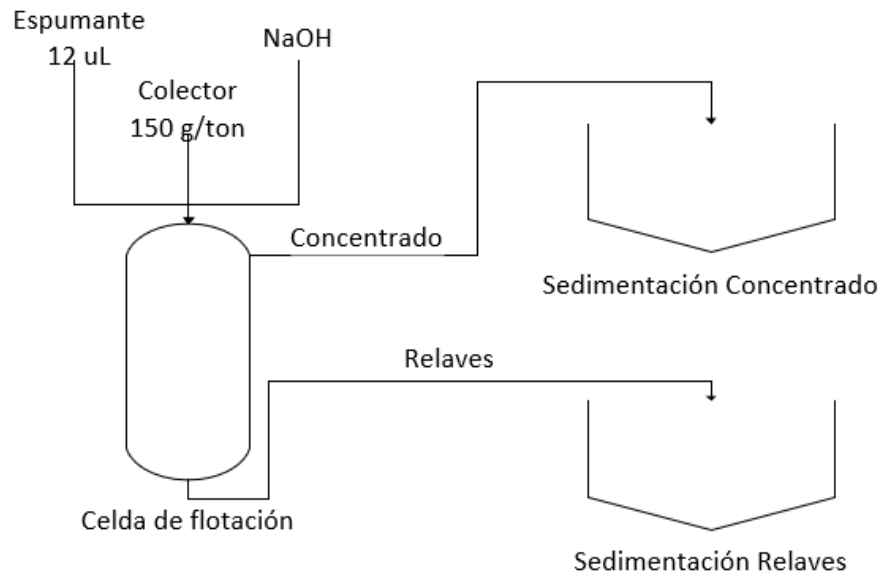


Figura 28: Diagrama flotación-sedimentación 1 y 2

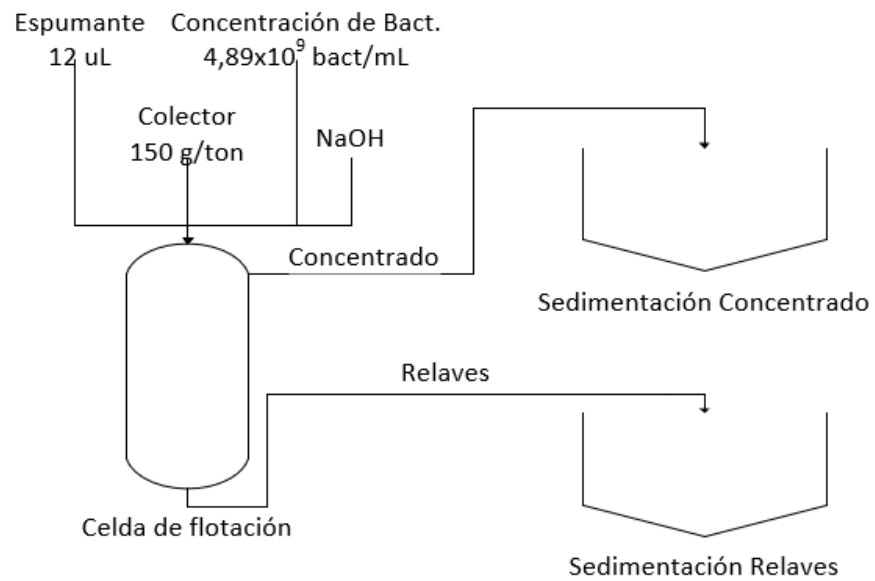


Figura 29: Diagrama flotación-sedimentación 3 y 4.

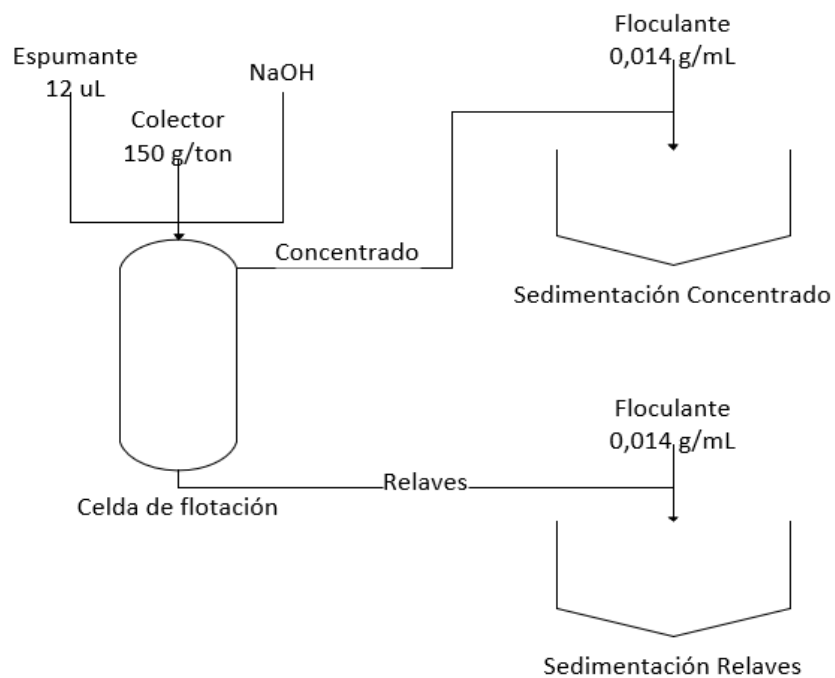


Figura 30: Diagrama flotación-sedimentación 5 y 6.

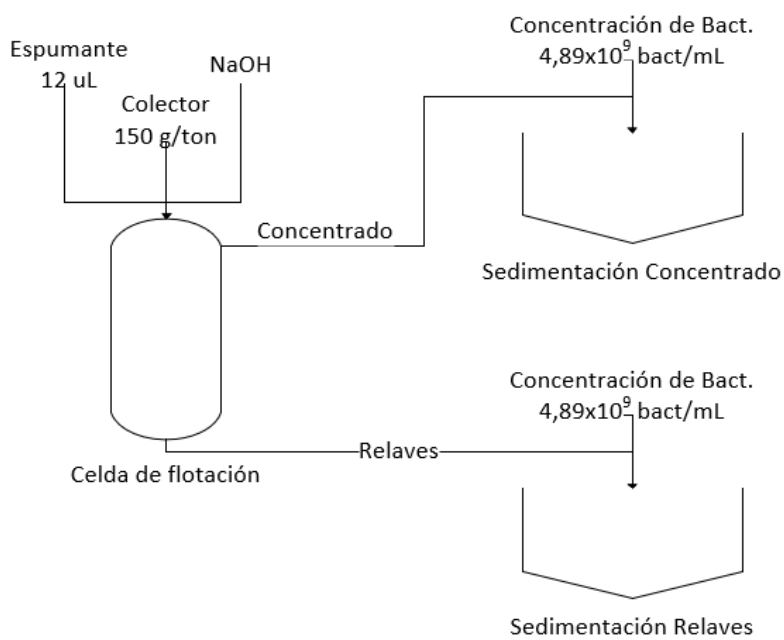
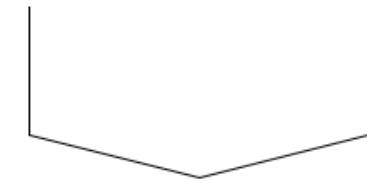


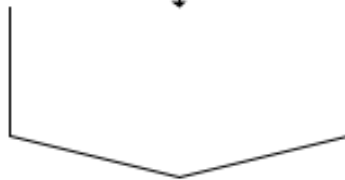
Figura 31: Diagrama flotación-sedimentación 7 y 8.



**Sedimentación Mineral
de cabeza**

Figura 32: Diagrama sedimentación exp. 9

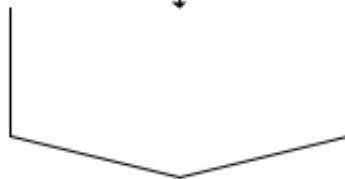
**Floculante
0,014 g/mL**



**Sedimentación
Mineral de Cabeza**

Figura 33: Diagrama sedimentación Exp. 10

**Concentración de Bact.
 $4,89 \times 10^9$ bact/mL**



**Sedimentación
Mineral de cabeza**

Figura 34: Diagrama sedimentación exp. 11

4. Resultados y Discusiones

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados en el laboratorio, los cuales todos se presentarán mediante gráficos realizados en MATLAB. El objetivo de esta sección es mostrar los resultados de velocidad de sedimentación y de reología, donde en este último se mostrarán los respectivos modelos que describen a las variables.

4.1 Concentración de Bacterias

A continuación, se mostrarán las concentraciones de bacterias utilizadas en el proceso. Se utilizó una concentración promedio de bacterias para sedimentación desde el experimento 1 al 8 de $2,22 \times 10^6$ bacterias/mL, para flotación se utilizó una concentración de $1,86 \times 10^6$ bacterias/mL, mientras que, para sedimentación de mineral de cabeza la concentración es de $1,1 \times 10^7$ bacterias/mL.

4.2 Velocidad de Sedimentación en relaves con colector en flotación.

En esta subsección, se mostrarán los resultados obtenidos en cuanto a velocidad de sedimentación en los relaves, donde se va a comparar los distintos casos con su respectiva velocidad. Además, para todos estos casos se utilizó colector mencionado con anterioridad.

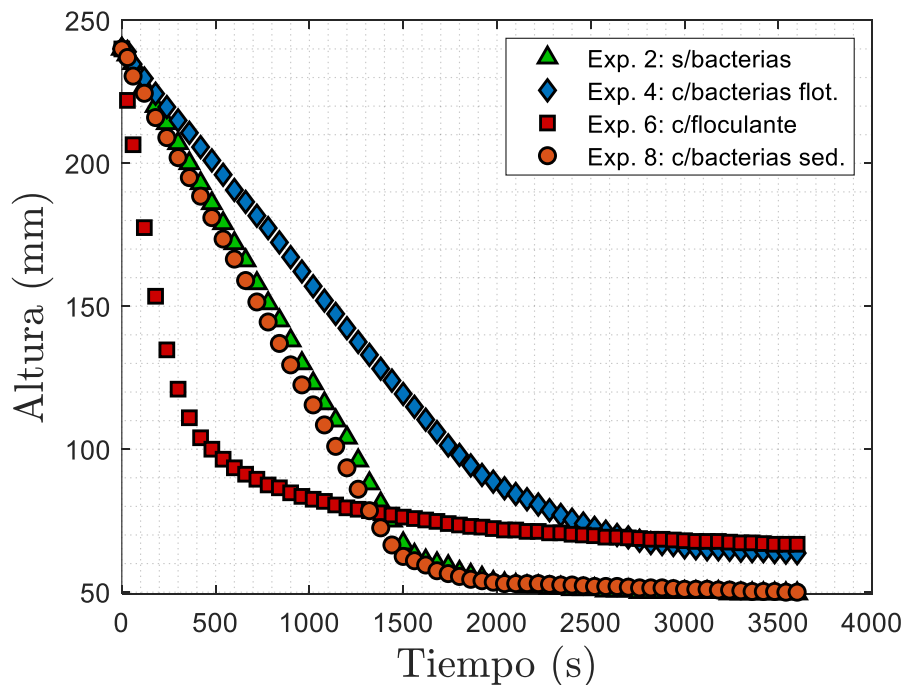


Figura 35. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Tabla 8: Comparación de la velocidad de sedimentación de relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Experimento	Floculante o Bacteria	Velocidad de sedimentación [mm/s]
2	No	0,115
4	Bacterias en Flotación	0,081
6	Floculante	0,401
8	Bacterias en sedimentación	0,120

En la Figura 35, se observa las distintas gráficas de velocidad para cada experimento, donde al utilizar bacterias en flotación (Curva azul) la curva tiene una menor inclinación comparado a las demás curvas, lo que indica que se tiene una menor velocidad de sedimentación, luego se observa que el experimento 2 (curva verde), donde no se utilizó bacterias ni floculante, y el experimento 8 (curva naranja), el cual se ocupó bacterias en sedimentación, tienen una gráfica con una inclinación similar, lo que indica que tienen una velocidad de sedimentación muy similar. Finalmente, el experimento 6 (curva roja), donde fue usado el floculante, la inclinación es mucho mayor comparado a las curvas anteriores, lo que indica que la mayor velocidad se alcanzó al utilizar el reactivo químico. Esto se puede confirmar con la información detallada en la Tabla 8, donde se evidencia que el experimento 2 y 8 tuvieron una velocidad muy similar, mientras que el experimento 4 y 6 alcanzaron el mínimo y máximo valor, respectivamente. Se puede analizar respecto a esta experimentación, que al utilizar bacterias en sedimentación no tuvo efecto, caso contrario, al ser usados directamente en flotación (experimento 4), donde tuvo un efecto negativo, es decir, disminuyó su velocidad de sedimentación. Por otro lado, existe coherencia que la máxima velocidad se haya alcanzado con el floculante (experimento 6), ya que es el reactivo que se utiliza actualmente en la industria minera y ha alcanzado buenos resultados.

4.3 Velocidad de sedimentación en relaves sin colector en flotación

A continuación, se mostrarán los resultados de los experimentos donde no se ocupó colector.

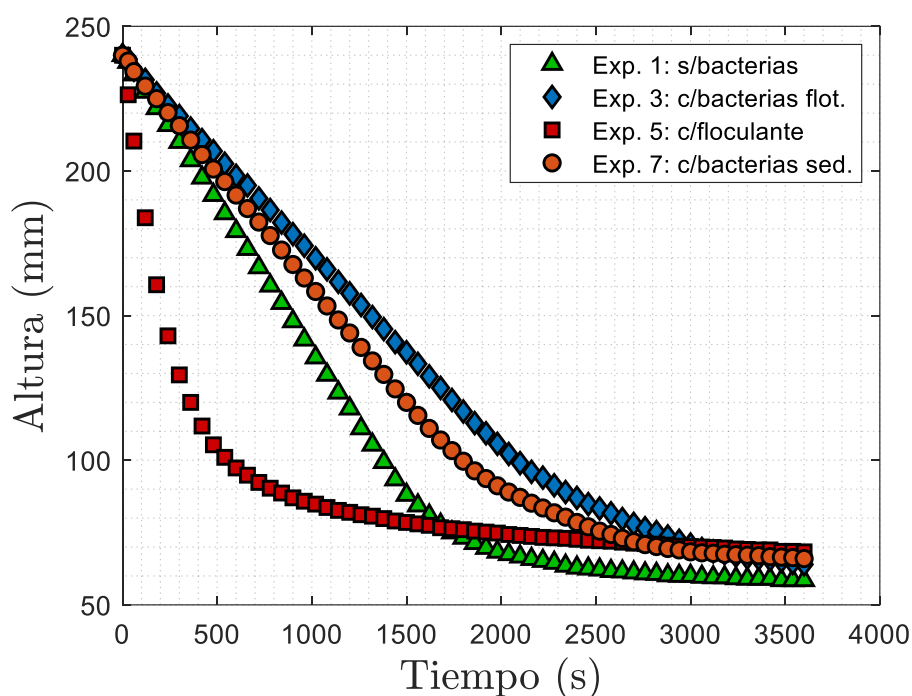


Figura 36. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).

Tabla 9. Comparación de la velocidad de sedimentación de relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).

Experimento	Floculante o Bacteria	Velocidad de sedimentación [mm/s]
1	No	0,102
3	Bacterias en Flotación	0,068
5	Floculante	0,376
7	Bacterias en sedimentación	0,080

En la Figura 36 se muestran las gráficas de sedimentación de relaves al no utilizar colector, donde la curva que alcanzó la menor inclinación es del experimento 3 (curva azul) el cual ocupó bacterias en flotación, lo anterior, se puede observar en la Tabla 9, donde la velocidad de sedimentación es de 0,068 mm/s. Luego, se observa que el experimento 7 (curva naranja), donde se usó bacterias en sedimentación, tiene una menor inclinación con respecto al experimento 1 (curva verde), es decir, la velocidad es menor al utilizar bacterias, tal como se observa en la Tabla 9, donde tanto el experimento 1 y 7 tienen velocidades de

0,102 mm/s y 0,080 mm/s, respectivamente. Finalmente, la curva roja (Experimento 5), tiene la mayor inclinación, lo que indica que se alcanzó la mayor velocidad, dado el uso de floculante.

A partir de estos experimentos, se puede mencionar que utilizar bacterias tanto en el proceso de flotación y sedimentación, no trajeron resultados positivos, ya que en ambos casos se alcanzaron velocidades menores comparado el experimento 1, donde no utilizó el microorganismo. Estos resultados son contradictorios con los de Vilinska et al. (A. Vilinska, 2008) ya que su estudio determinó que la bacteria utilizada forma flóculos lo que aumentaría la velocidad de sedimentación. Estas diferencias se pueden deber a que utilizaron otra bacteria la *Leptospirillum ferrooxidans* y además el mineral que sedimentaron era piritita pura, y en el presente trabajo se utilizó una mezcla de minerales reales.

El detalle de cada experimento se puede encontrar en Anexo A: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Relaves

4.3 Velocidad de Sedimentación de concentrados con colector en flotación.

En esta subsección se presentarán los resultados de los concentrados, donde se ocupó colector.

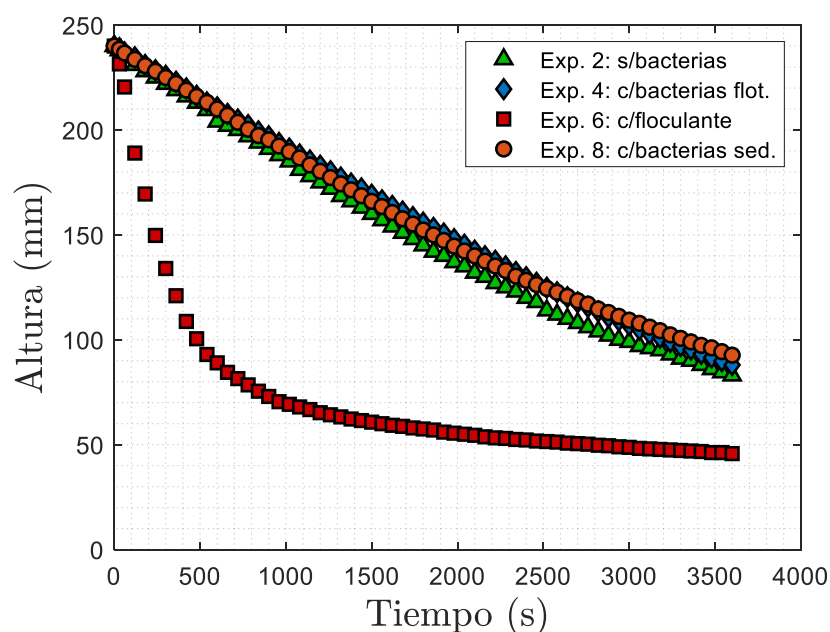


Figura 37. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Tabla 10: Comparación de la velocidad de sedimentación de concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Experimento	Floculante o Bacteria	Velocidad de sedimentación [mm/s]
2	No	0,068
4	Bacterias en Flotación	0,047
6	Floculante	0,324
8	Bacterias en sedimentación	0,049

En la Figura 37, se observa el gráfico con las velocidades de sedimentación de los distintos concentrados con colector, donde se aprecia que la curva de color verde (Experimento 2), azul (Experimento 4) y naranja (Experimento 8), tienen el mismo comportamiento desde el principio de la medición hasta aproximadamente 1000 segundos y a partir de este punto la curva verde del experimento sin bacterias tiene una inclinación levemente mayor que las otras dos curvas mencionadas, lo que indica que adquirió mayor velocidad de sedimentación. Por otro lado, la curva roja (Experimento 6) desde el principio tiene una inclinación mayor, lo que indica su alta velocidad de sedimentación, lo que fue disminuyendo desde los 500 segundos, ya que el material sedimentado se compactó al final de la probeta. Lo anterior, se puede verificar en la Tabla 10, donde se observa que el experimento 4 y 8, alcanzaron la misma velocidad de sedimentación al utilizar el microorganismo en flotación y sedimentación, respectivamente. Por otro lado, se observa que, al no utilizar bacterias, provocó que la velocidad fuera mayor comparado a los casos donde si se utilizó, finalmente, como ha sido tónica hasta el momento, el uso de floculante alcanza una mayor velocidad de sedimentación, lo que sigue demostrando su eficacia en esta parte del proceso.

4.4 Velocidad de Sedimentación de concentrados sin colector en flotación.

A continuación, se presentan los resultados de los concentrados donde no se utilizó el colector en la etapa de flotación.

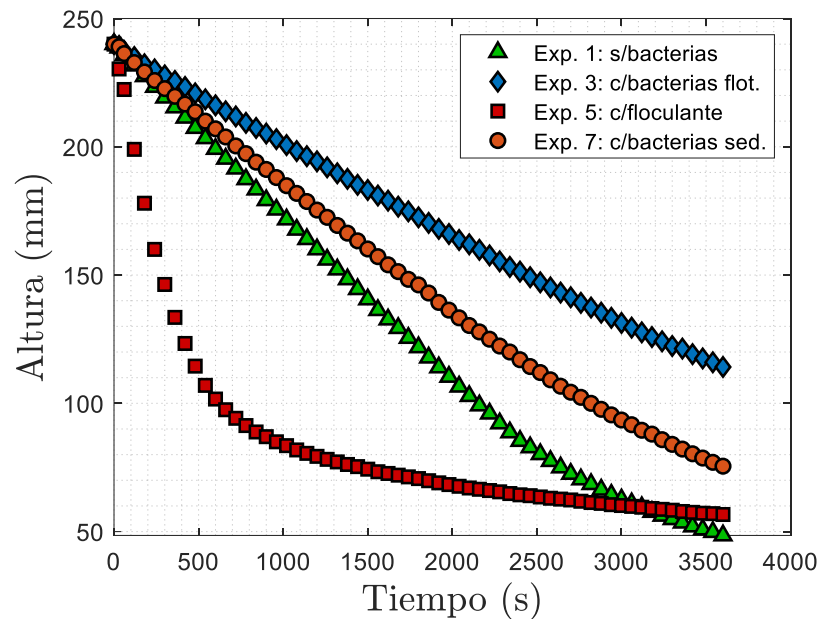


Figura 38: Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de concentrados sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).

Tabla 11: Comparación de la velocidad de sedimentación de concentrados sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7)

Experimento	Floculante o Bacteria	Velocidad de sedimentación [mm/s]
1	No	0,066
3	Bacterias en Flotación	0,038
5	Floculante	0,288
7	Bacterias en sedimentación	0,053

En la Figura 38, se aprecia las distintas velocidades de sedimentación de concentrados sin colector, donde al igual que en casos anteriores, el experimento que utilizó floculante (Curva roja) alcanzó una mayor velocidad de sedimentación a partir de su inclinación, donde esto se puede verificar con la información disponible en la Tabla 11, donde el experimento 5 alcanzó una velocidad de 0,288 mm/s. Además, se observa que los experimentos 3 y 7, donde se utilizó bacterias (Curva azul y naranja, respectivamente), tienen una inclinación menor comparado al caso que no se utilizó bacterias (curva verde), lo que indica que las velocidades de sedimentación alcanzadas fueron menores al utilizar bacterias, tal como se muestra en la Tabla 11, donde el experimento 1 alcanzó una mayor

velocidad comparado a los experimentos 3 y 7, lo que corrobora la información entregada en el gráfico.

El detalle de cada experimento se puede encontrar en Anexo B: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Concentrados Anexo A: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Relaves.

4.5 Velocidad de sedimentación en Mineral de cabeza

Finalmente, se realiza la comparación de velocidad en los casos donde solo se sedimentó mineral de cabeza, sin pasar previamente por flotación.

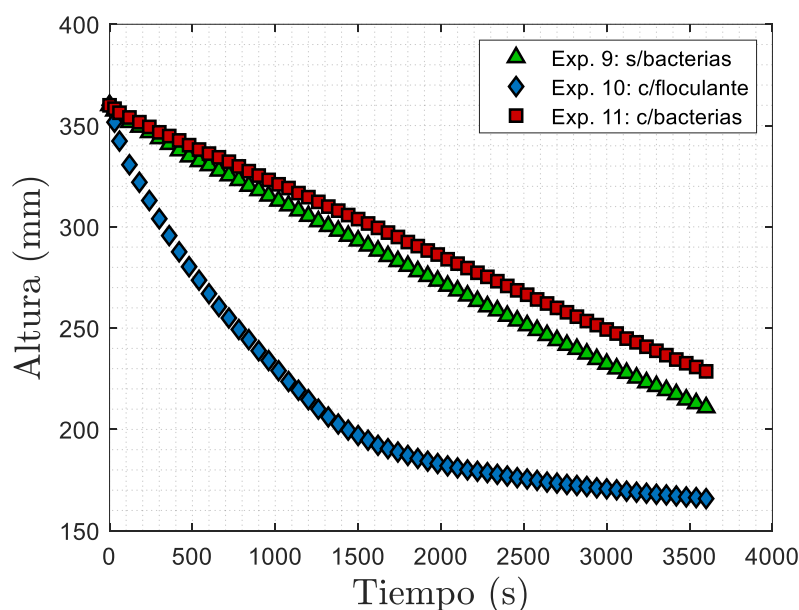


Figura 39. Gráfico comparativo de la velocidad de sedimentación de mineral de cabeza (exp. 9, 10 y 11).

Tabla 12: Comparación de la velocidad de sedimentación de mineral de alimentación (exp. 9, 10 y 11).

Experimentos	Floculante o Bacteria	Vel. De sedimentación [mm/s]
9	No	0,043
10	Floculante	0,151
11	Bacterias	0,037

En la Figura 39, se observa la velocidad de sedimentación de mineral de cabeza, donde la curva azul representa el experimento 10, que utilizó floculante; la curva verde, indica el experimento 9, el cual no utilizó bacterias ni floculante y finalmente, la curva roja, personifica el experimento 11, donde se usó las bacterias. Al analizar el gráfico, se puede estimar que la curva azul, alcanzó una mayor inclinación, lo que se traduce una mayor velocidad de sedimentación, luego esta inclinación fue disminuyendo desde aproximadamente los 1300 segundos, debido a que el mineral se fue compactando al fondo de la probeta. Lo anterior, es seguido por la curva verde que tiene una inclinación constante a lo largo de la medición, al igual que la curva roja, pero, esta última tiene una inclinación menor, lo que quiere decir, que se alcanzó una velocidad de sedimentación menor. Lo anterior, se puede verificar en la Tabla 12, donde la mayor velocidad se alcanzó al utilizar floculante (experimento 10), mientras que la menor velocidad se alcanzó al utilizar bacterias (experimento 11), siendo menor al caso donde no se utilizó bacterias ni floculante (Experimento 9).

El detalle de cada experimento se puede encontrar en Anexo C: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Mineral de cabeza.

Al observar los casos anteriormente mencionados, se ve que en ningún caso la velocidad de sedimentación mejoró cuando se aplicó la bacteria tanto en sedimentación como en flotación, de hecho, las velocidades fueron menores en comparación a cuando no se utilizó ni bacteria, ni floculante. Por lo que, a partir de lo anterior, no se puede aseverar que la bacteria actúa como floculante, si no la velocidad sería mayor, entonces, la bacteria está separando o esparciendo más el mineral lo que provocaría que la velocidad disminuya.

En la industria, el reactivo que cumple la función de separar más el mineral es el dispersante, que se adiciona para aumentar la fuerza de repulsión que existe entre las partículas de manera de evitar su adherencia o la formación de agregados (Binimelis, 2018).

Cuando se compara los experimentos donde se utilizó bacterias en flotación y bacterias en sedimentación, se observa una diferencia en la velocidad para todos los casos anteriores, dado que en el experimento que se utilizó bacterias en sedimentación, se obtuvo mayor velocidad que en el caso que se utilizó bacterias en flotación, esta diferencia se debe a que en flotación las bacterias están expuestas por un tiempo acondicionamiento de 20 minutos y velocidad de agitación de 900 RPM para que el microorganismo se pueda adherir a la

superficie del mineral, en cambio, en sedimentación el tiempo de acondicionamiento es de 15 minutos y a una velocidad de 550 RPM, por lo que las bacterias tendrán menor adherencia a la superficie del mineral, provocando que haya menor dispersión y sedimenten más rápido que los experimentos que utilizan bacterias en flotación.

La única excepción fue cuando se comparó la velocidad en la subsección 4.2, ya que en este caso la velocidad es muy similar para el caso sin bacterias (experimento 2), con el caso que si se ocupó el microorganismo (experimento 8). La razón, se puede deber a la acción del colector junto a la bacteria que provocó que la velocidad fuera igual, ya que el colector también puede formar flóculos que podrían aumentar la velocidad de sedimentación, pero de menor manera en comparación al floculante.

4.6 Reología de relaves con colector

A continuación, en la Figura 40 se presentan las curvas de viscosidad en función de la tasa de deformación para relaves de los experimentos 2, 4, 6 y 8, cuando se utiliza colector en la etapa de flotación. Mientras que en la Tabla 14 se indican los modelos de Ostwald-de Waele o modelo potencial para cada caso de estudio y finalmente, en la Tabla 14, se muestra las variaciones de los parámetros K y n, con respecto al experimento 2.

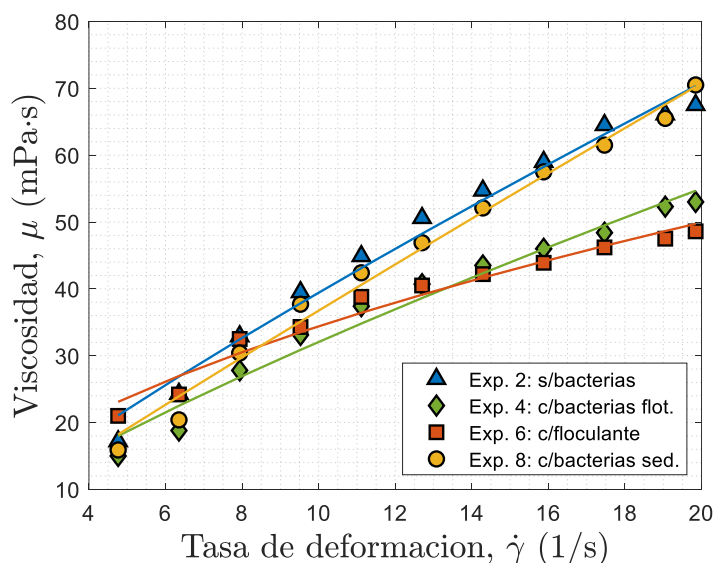


Figura 40. Viscosidad vs tasa de deformación relaves con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Tabla 13. Modelos reológicos (exp. 2, 4, 6 y 8).

Exp. 1	$4,25x^{0,84}$
Exp. 3	$5,40 x^{0,77}$
Exp. 5	$5,07 x^{0,79}$
Exp. 7	$4,60 x^{0,81}$

Tabla 14. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 2.

En base exp. 2		
	K %	N%
Exp. 4	-5,9	-6,7
Exp. 6	104,2	-38,4
Exp. 8	-23,5	9,2

En la Figura 40 se observa que tanto el experimento 2 y experimento 8, tienen un comportamiento muy similar a la largo de la tasa de deformación, además la diferencia de uno con el otro es mínima. Por otro lado, el experimento 4 y 6 tienen un comportamiento similar a los otros dos experimentos mencionados anteriormente para tasas de deformaciones bajas, pero sobre 10 s^{-1} , la diferencia de viscosidad aumenta y los experimentos 4 y 6 tienen un aumento menor de su viscosidad mientras aumenta la tasa de deformación. Por último, se puede observar que en todos los casos la viscosidad aumenta en cuanto aumenta la tasa de deformación, lo que indica que el relave es un fluido no newtoniano.

Al observar los modelos, se observa que en el experimento 2, 4 y 6, tienen un valor de N () menor a uno, lo que significa que n es mayor a uno (Ecuación 10), esto indica que el material se está haciendo más viscoso. Al ver el experimento 8, N dio un valor mayor a uno, por lo que n sería menor a uno, por consiguiente, el material va perdiendo viscosidad.

En cuanto a la variación de los parámetros K y N en base a experimento 2, se puede observar que, para K tanto el experimento 4 como el experimento 8 tuvieron una variación

negativa, en cambio, el experimento 6 tuvo una variación positiva. Por otro lado, N tiene una variación negativa para el experimento 4 y 6, pero el experimento 8 tiene una variación positiva.

4.7 Reología de Relaves sin colector

Al igual que en la subsección anterior, se mostrarán las curvas de viscosidad en función de la tasa de deformación para los experimentos 1, 3, 5 y 7, donde no se utilizó colector en la etapa de flotación.

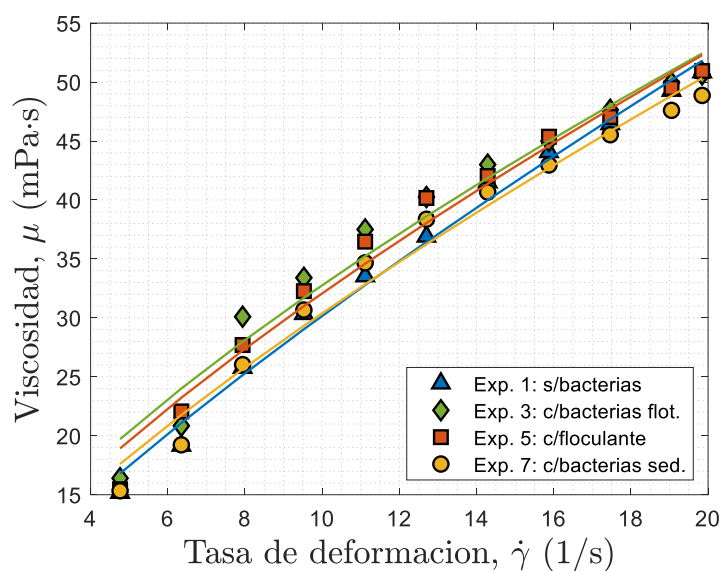


Figura 41. Viscosidad vs tasa de deformación relaves sin colector en flotación (exp. 1, 3, 5 y 7).

Tabla 15. Modelos reológicos (exp. 1, 3, 5 y 7).

Exp. 1	$25,20x^{0,28}$
Exp. 3	$17,16x^{0,39}$
Exp. 5	$17,22x^{0,40}$
Exp. 7	$18,60x^{0,35}$

Tabla 16. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 1.

En base exp. 1		
	K%	N%
Exp. 3	27,8	-8,77
Exp. 5	19,2	-6,21
Exp. 7	8,3	-4,03

Para este caso en particular, todos los experimentos tuvieron un comportamiento similar a lo largo de la tasa de deformación (Figura 41), donde la diferencia de un experimento con otro es mínima, por lo que en este caso se puede decir que no hubo ningún efecto en la viscosidad cuando se aplicó floculante o bacterias.

Al analizar la Tabla 15, en todos los modelos, N es menor a uno, por lo que el material se está volviendo más viscoso. Por otro lado, en la

Tabla 16, las variaciones de K y N con respecto al experimento 1 fueron bajas, donde K tuvo un cambio positivo en los demás experimentos y N ocurrió una variación negativa en todos los casos.

El detalle de cada experimento se puede encontrar en Anexo D: Tablas y Gráficos Reología de Relaves.

4.8 Reología de concentrados con colector

Para este caso, se expondrán las curvas de viscosidad vs tasa de deformación para los concentrados de los experimentos 2, 4, 6 y 8, cuando se utilizó colector en flotación.

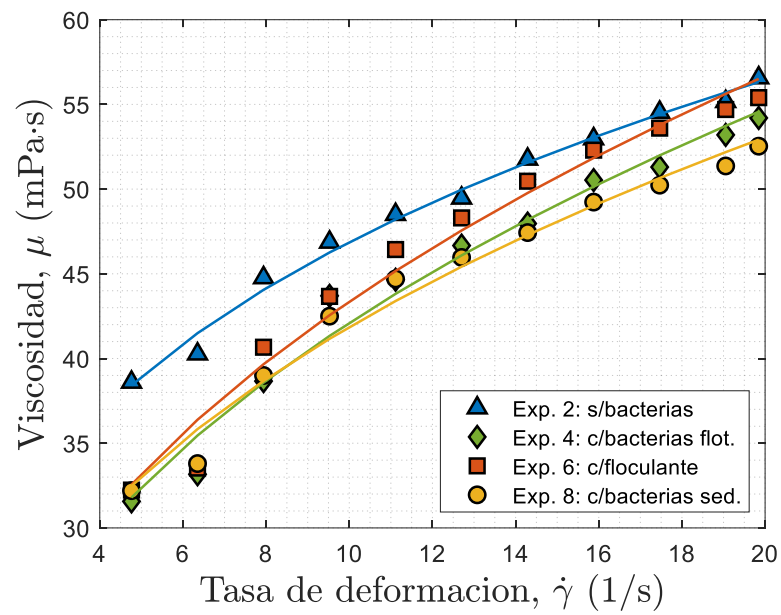


Figura 42. Viscosidad vs tasa de deformación concentrados con colector en flotación (exp. 2, 4, 6 y 8).

Tabla 17. Modelos reológicos (exp. 2, 4, 6 y 8).

Exp. 2	$25,20x^{0,28}$
Exp. 4	$17,16x^{0,39}$
Exp. 6	$17,22x^{0,40}$
Exp. 8	$18,60x^{0,35}$

Tabla 18. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 2.

En base a exp. 2		
	K%	N%

Exp. 4	-31,9	44,3
Exp. 6	-31,7	48,4
Exp. 8	-26,2	30,4

En la Figura 42, se puede observar que al aplicar floculante o bacterias la viscosidad disminuyó en todos los casos, donde el experimento 8 tuvo el mayor descenso en comparación al experimento 4 y 6, además, todas las curvas tienen un comportamiento similar a lo largo de la tasa de deformación, lo cual también indica que el concentrado es un flujo no newtoniano.

En la Tabla 17 se encuentran el modelo potencial para cada experimento, donde se puede observar que en todos los casos N es menor a uno, por lo tanto, n es mayor a uno, lo que indica que el concentrado se está volviendo más viscoso.

Por otro lado, en la Tabla 18 se encuentran las variaciones con respecto al experimento 2, donde para K , el cambio fue positivo para todos los experimentos, mientras que, para N en todos los casos la variación fue negativo.

4.9 Reología de concentrados sin colector

A continuación, se muestran las curvas de viscosidad, los modelos y las variaciones con respecto al experimento 1 para concentrados sin el uso de colector

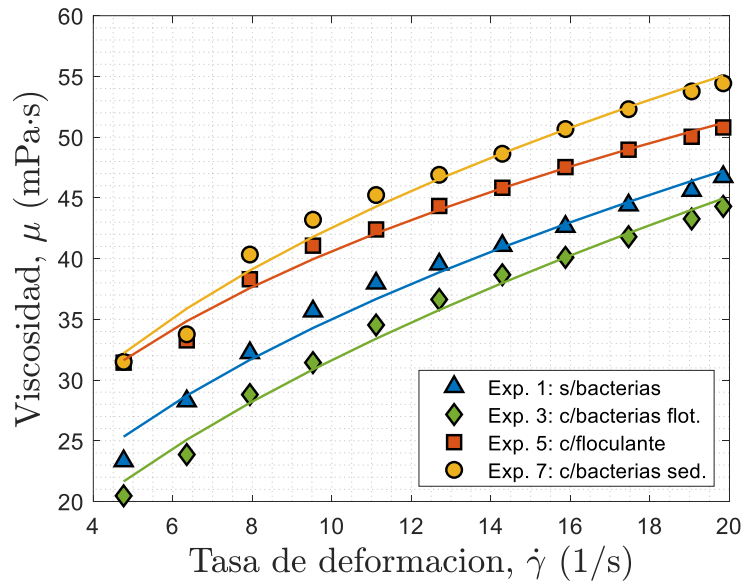


Figura 43. Viscosidad vs tasa de deformación concentrados sin colector en flotación (exp. 1,3, 5 y 7)

Tabla 19. Modelos reológicos (exp. 1,3, 5 y 7).

Exp. 1	$17,40 x^{0,39}$
Exp. 3	$18,41x^{0,34}$
Exp. 5	$12,09 x^{0,46}$
Exp. 7	$9,16 x^{0,54}$

Tabla 20. Variación parámetros K y N con respecto a exp. 1.

En base a exp. 1		
	K%	N%
Exp. 3	5,8	-11,4

Exp. 5	-30,5	18,7
Exp. 7	-47,3	38,3

Para este caso, se puede observar que el experimento 7 fue el que tuvo mayor viscosidad, seguido por el experimento 5, luego el experimento 1 y finalmente el experimento 3, por lo que para este caso se puede decir que la bacteria volvió más viscosa la pulpa cuando fue utilizada directamente en sedimentación. Cabe destacar que este fue el único caso donde la viscosidad aumentó, ya que en los demás disminuyó o mantuvo. En los modelos potenciales (

Tabla 19), se ve que al igual que el caso anterior N tiene un valor menor a uno, entonces, n es mayor a uno, lo que indica que el material se vuelve más viscoso, en cuanto a las variaciones en base al experimento 1, K tiene variación positiva en el experimento 3, mientras que el experimento 5 y 7 tienen una variación negativa. Para N el cambio fue positivo para el experimento 5 y 7, pero fue negativa para el experimento 3.

4.10 Reología de Mineral de Cabeza

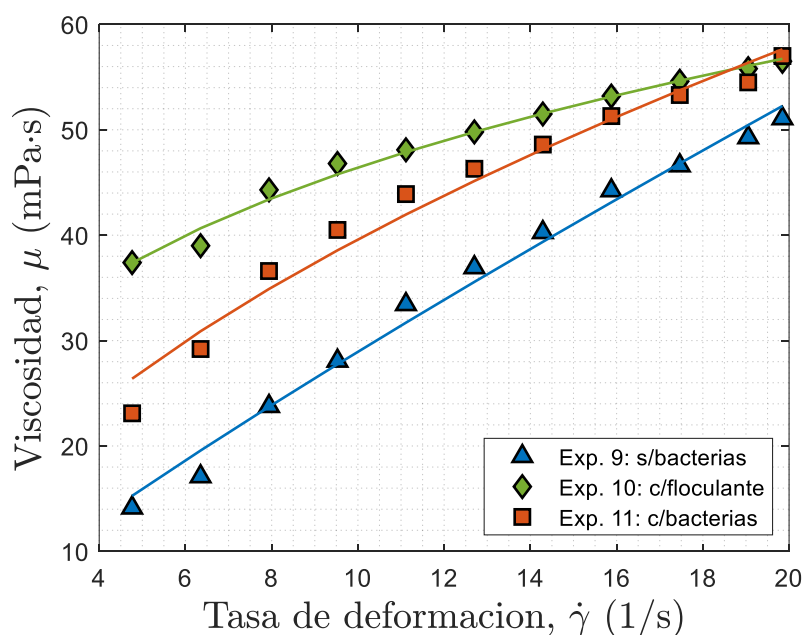


Figura 44. Viscosidad vs tasa de deformación del mineral de alimentación (exp. 9, 10 y 11).

Tabla 21. Modelos reológicos (exp. 9, 10 y 11).

Exp. 9	$4,61 x^{0,81}$
Exp. 10	$23,44x^{0,30}$
Exp. 11	$9,95 x^{0,59}$

Tabla 22: Variación parámetros K y N con respecto a exp. 9.

En base exp. 9		
	K%	N%
Exp. 10	408,5	-63,4
Exp. 11	115,9	-26,6

Para este caso se puede observar que la mayor viscosidad se alcanzó con el experimento 10, el cual utilizó floculante, luego es seguido por el experimento 11 el cual usó bacterias y por último quedó el experimento 9 donde no se usó bacterias y floculante.

Los modelos potenciales se encuentran en la Tabla 21 y muestran que el valor de N en los tres casos fue menor a uno, lo que indica que el mineral es más viscoso.

Finalmente, las variaciones de K con respecto al experimento 9 fueron muy altas, los cuales superan el 100%, pero la variación de N es muy inferior al anteriormente mencionado, los cuales además fueron negativas.

4.11 Efecto de la viscosidad en la velocidad de sedimentación.

En esta sección se relacionará la velocidad de sedimentación con la viscosidad, a partir de la ley de Stokes, mostrada en la sección 2.3. Como se mencionó en dicha sección, esta ley se utiliza para fluidos newtonianos, pero las pulpas mineras son fluidos no newtonianos, por lo que a continuación, se calcula una viscosidad representativa a partir de la velocidad de sedimentación experimental y el P80 estimado en análisis granulométrico para observar si este valor entra o no en el rango de viscosidad experimentales obtenidas a partir del viscosímetro.

Tabla 23. Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de relaves con colector

Relave (c/colector)					
Experimento	P80 [μm]	Visc. Stokes [mPa*s]	Vel. Exp. [mm/s]	Visc. Exp. [mPa*s]	RPM
6 (c/floculante)	149.01	9.01	0.40	21.0	60
2 (s/bact)	157.54	40.28	0.12	39.5	120
8 (c/bact. En sed)	151.78	37.39	0.12	37.7	120
4 (c/bact. En flot)	147.21	44.08	0.08	43.5	180

Tabla 24: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de relaves sin colector

Relave (s/colector)					
Experimento	P80 [μm]	Visc. Stokes [mPa*s]	Vel. Exp. [mm/s]	Visc. Exp. [mPa*s]	RPM
5 (c/floculante)	149.15	9.03	0.30	15.5	60
1 (s/bact)	152.20	37.60	0.10	37.6	160
7 (c/bact. En sed)	148.31	44.62	0.08	44.6	220
3 (c/bact. En flot)	150.00	52.16	0.07	50.7	250

Al ver la Tabla 23 y Tabla 24, se observa que al aumentar la viscosidad la velocidad de sedimentación disminuye, lo cual tiene lógica, ya que al ser más viscoso las partículas en el interior del fluido tienen mayor dificultad para moverse, además se puede observar que el experimento 2 y 8 tienen la misma velocidad, pero esta última tiene menor viscosidad, la razón para que se mantenga la misma velocidad es que el experimento 8 tiene un menor tamaño de grano, lo cual contrarresta la disminución de viscosidad. Por otro lado, se puede observar que en todos estos experimentos de relaves las viscosidades obtenidas a partir de Stokes dieron dentro del rango de viscosidades experimentales, excepto en los casos donde se ocupó floculante, dado que Ley de Stokes solo considera para su cálculo, la viscosidad, P80, densidades y concentración volumétrica, pero no considera otros parámetros como el uso de reactivos químicos como el floculante que aumenta la velocidad de sedimentación.

Tabla 25: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de concentrados con colector

Concentrado (c/colector)					
Experimento	P80 [μm]	Visc. Stokes [mPa*s]	Vel. Exp. [mm/s]	Visc. Exp [mPa*s]	RPM
6 (c/floculante)	155.27	14.44	0.32	32.2	60
2 (s/bact)	135.15	62.28	0.07	56.6	250
4 (c/bact. En flot)	129.10	79.55	0.05	54.2	250
8 (c/bact. En sed)	154.02	113.23	0.05	53	250

Tabla 26: Comparación viscosidad experimental y ley de Stokes de concentrados sin colector

Concentrado (s/colector)					
Experimento	P80 [μm]	Visc. Stokes [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	Vel. Exp. [mm/s]	Visc. Exp. [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	RPM
5 (c/floculante)	136.46	14.81	0.29	31.4	60
1 (s/bact)	131.91	59.33	0.07	46.7	250
7 (c/bact. En sed)	130.67	81.50	0.05	54.4	250
3 (c/bact. En flot)	93.55	52.22	0.04	44	250

Como se observa en la Tabla 25 y Tabla 26, las viscosidades obtenidas a partir de Ley de Stokes están por fuera del rango de viscosidades experimental, esto se puede deber a que experimentalmente las velocidades de sedimentación son muy pequeños, por lo que las viscosidades de Stokes tenderían aumentar. Por otro lado, se puede observar que para el experimento 3 la viscosidad disminuyó en comparación al experimento 1, pero la velocidad también disminuyó, lo cual no debe ocurrir, lo que sucede es que el P80 es muy bajo comparado a los otros casos, lo que disminuye considerablemente la velocidad de sedimentación.

Finalmente, se puede resumir que Ley de Stokes no se logra adaptar de buena manera para los fluidos no newtonianos, dado que hay mucha diferencia en distintos casos, como, por ejemplo, al usar floculante o en los concentrados.

Conclusiones

En la presente memoria se ha realizado una investigación para observar cómo afecta el uso de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* en el proceso de sedimentación y en la reología de concentrados y relaves provenientes de la etapa de flotación, mediante experimentación en laboratorio, con la hipótesis que el uso de este microorganismo cambiará la velocidad de sedimentación de las pulpas mineras anteriormente mencionadas.

Los experimentos se dividieron en dos grupos, el primer grupo es desde el experimento 1 al 8, los cuales pasaron por la etapa de flotación, donde se varió ciertas condiciones para luego el concentrado y el relave siguieran al proceso de sedimentación, el segundo grupo consta de los experimentos 9 al 11, donde el mineral de cabeza fue sedimentado sin ser flotado previamente para que de esta manera poder evaluar el uso de la bacteria como depresante o floculante. Cabe destacar que todos los procesos de sedimentación fueron grabados en video para luego extraer los datos a Excel, de esta forma poder graficar y extraer la información necesaria para los resultados y evaluar si es efectivo utilizar la bacteria en sedimentación.

Para el análisis reológico se utilizó el viscosímetro disponible en laboratorio para medir y extraer los datos de viscosidad a distintos valores de RPM para todos los experimentos, así poder observar el comportamiento de estos flujos, obtener los modelos reológicos y las diferencias entre cada experimento.

A partir del cultivo se obtuvo que la concentración de bacterias para flotación es de $1,86 \times 10^6$ bacterias/mL y para sedimentación la concentración estimada es $2,22 \times 10^6$ bacterias/mL. Los resultados a velocidad de sedimentación arrojaron valores que no se esperaban, ya que según bibliografía las bacterias forman flóculos, lo que provocaría que aumente la velocidad de sedimentación, pero en laboratorio esto no ocurrió, ya que la velocidad se mantuvo solo en un experimento, mientras que en todos los demás disminuyó al utilizar la bacteria, esto en comparación al experimento 1 y 2, donde no se utilizó ni bacterias ni floculante. Lo que ocurrió es que la bacteria en vez de estar formando flóculos o partículas de mineral de mayor tamaño está esparciendo o separando más el relave y concentrado, lo que explicaría de porque la velocidad disminuyó, en la industria minera existe un reactivo llamado dispersante, que aumenta la fuerza de repulsión entre

las partículas de mineral para así evitar su adherencia o la formación de agregados, se puede utilizar en el proceso de flotación para así evitar que la arcilla flote.

Por otro lado, los resultados arrojados en reología muestran que la bacteria modifica la viscosidad de las pulpas mineras, donde solo en un caso aumentó la viscosidad, mientras que en los demás casos disminuyó, además en todos los casos se estimó el modelo para cada uno, donde se utilizó el modelo de Ostwald-de Waele o potencial y se obtuvieron los parámetros K y n para cada caso, en este último, se puede ver que solo en un experimento se ve un n menor a uno y en todos los demás, arrojó mayor a uno, lo que indica que el material es más viscoso.

Por último, futuras investigaciones deben enfocarse en como varía la velocidad de sedimentación y la viscosidad de concentrados y relaves si se aumenta la concentración de bacterias, ya que en otras investigaciones se utilizaron concentraciones de magnitud 100 veces más de la que se ocupó en esta memoria, lo que arrojó muy buenos resultados.

Referencias

1. Bernardelli et al. 2017. *Biominería: Los Microorganismos en la Extracción y Remediación de Metales*. Santiago : s.n., 2017.
2. Binimelis, Milton Gárce. 2018. *Evaluación del efecto de dispersantes en la flotabilidad de calcopirita en agua de mar a pH alcalino*. Concepción : s.n., 2018.
3. Carrasco, JM. 2019. *Análisis de factibilidad técnica y económica del rediseño de proceso de flotación de sulfuros de cobre a partir de bacterias*. Santiago de Chile : s.n., 2019.
4. Cochilco. 2022. *Base de datos electrónicos*. [En línea] 2022. <http://www.cochilco.cl:4040/boletinweb/>.
5. —. 2020. *Consumo de agua en la minería*. Santiago : s.n., 2020.
6. —. 2020. *Proyección de consumo de agua*. Santiago : s.n., 2020.
7. Concha, Fernando. 2014. *Solid-Liquid separation in the mining industry*. s.l. : Springer, 2014.
8. *Enhancement of the sedimentation rate of copper tailings by application of acoustic field*. A. Videla, et al. 2020. Santiago de Chile : s.n., 2020, Elsevier.
9. *Evaluation of the replacement of NaCN with Acidithiobacillus ferrooxidans in the flotation of high-pyrite, low-grade lead-zinc ore*. J.V Mehrabani, S.M. Mousavi, M. Noaparast. 2011. 2011, Elsevier, págs. 202-208.
10. F. San Martín, W. Kracht, T. Vargas. 2018. *Biodepression of pyrite using Acidithiobacillus ferrooxidans in seawater*. 2018. págs. 127-131.
11. Kester, Dana. 1967. *Preparation of Artificial Seawater*. Oregon : s.n., 1967.
12. *Leptospirillum ferrooxidans-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation and bioflocculation*. A. Vilinska, K. Hanumantha. 2008. Lulea : s.n., 2008, Science Press, págs. 1403-1409.
13. Limited, Malvern Instruments. 2016. *A Basic Introduction to Rheology*. 2016.
14. M. Kumar, M.T.Zeyad, P. Choudhary. 2020. *Thiobacillus*. 2020. págs. 547-560.
15. Maldonado, V. 2016. *Sedimentación*. Santiago de Chile : s.n., 2016.

16. Merril, Javier. 2016. *Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada*. Santiago de Chile : s.n., 2016.
17. Morris, E. Guazelli and J. 2021. *A Physical Introduction to Suspension Dynamics*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021.
18. N. Ohmura, K. Kitamura, H. Saiki. 1992. *Mechanism of Microbial Flotation Using Thiobacillus Ferrooxidans for Pyrite Suppression*. 1992. págs. 671-672.
19. Palma, Sergio. 2016. *Sedimentation of polydisperse particles at low Reynolds number in inclined geometric numerical and laboratory experiments*. Santiago : s.n., 2016.
20. *Rheology of pyrite slurry and its dispersant for the biooxidation process*. L. Sun, et al. 2010. Yantai : s.n., 2010, Elsevier, págs. 178-185.
21. *Selective separation of pyrite from chalcopyrite and arsenopyrite*. al, Chandrababha et. 2006. New York : s.n., 2006, Elsevier, págs. 113-122.
22. Vergara. 2021. *Influencia de la reología de un relave en la distancia peligrosa mediante herramientas de fluidodinámica computacional*. 2021.
23. Yianatos, Juan. 2008. *Flotación de minerales*. 2008.

ANEXOS

Anexo A: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Relaves

1A. Experimento 1

Tabla 27: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 1 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	2	238	0.078
60	1	7	233	0.111
120	2	13	227	0.106
180	3	18	222	0.102
240	4	24	216	0.101
300	5	30	210	0.100
360	6	36	204	0.101
420	7	42	198	0.101
480	8	48	192	0.101
540	9	55	185	0.101
600	10	61	179	0.101
660	11	67	173	0.102
720	12	73	167	0.102
780	13	80	160	0.102
840	14	86	154	0.102
900	15	92	148	0.102
960	16	98	142	0.102
1020	17	105	136	0.102
1080	18	111	130	0.102
1140	19	117	123	0.102
1200	20	122	118	0.102
1260	21	129	111	0.102
1320	22	135	105	0.102
1380	23	141	99	0.102
1440	24	147	93	0.102
1500	25	152	88	0.101
1560	26	156	84	0.100
1620	27	159	81	0.098
1680	28	162	78	0.097
1740	29	165	75	0.095
1800	30	167	73	0.093
1860	31	169	71	0.091
1920	32	170	70	0.089
1980	33	172	68	0.087
2040	34	173	68	0.085

2100	35	173	67	0.083
2160	36	174	66	0.081
2220	37	175	65	0.079
2280	38	176	65	0.077
2340	39	177	64	0.075
2400	40	177	63	0.074
2460	41	178	63	0.072
2520	42	178	62	0.071
2580	43	178	62	0.069
2640	44	179	62	0.068
2700	45	179	61	0.066
2760	46	179	61	0.065
2820	47	179	61	0.064
2880	48	180	60	0.062
2940	49	180	60	0.061
3000	50	180	60	0.060
3060	51	180	60	0.059
3120	52	181	60	0.058
3180	53	181	60	0.057
3240	54	181	59	0.056
3300	55	181	59	0.055
3360	56	181	59	0.054
3420	57	181	59	0.053
3480	58	182	59	0.052
3540	59	182	59	0.051
3600	60	182	59	0.050

2A. Experimento 2

Tabla 28: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 2 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	2	238	0.067
60	1	7	233	0.111
120	2	14	226	0.114
180	3	21	219	0.115
240	4	28	212	0.118
300	5	35	205	0.118
360	6	43	197	0.120
420	7	51	189	0.122

480	8	59	181	0.124
540	9	67	173	0.125
600	10	75	165	0.124
660	11	81	159	0.123
720	12	89	151	0.124
780	13	96	144	0.123
840	14	103	137	0.122
900	15	110	130	0.122
960	16	118	122	0.123
1020	17	126	114	0.124
1080	18	136	104	0.126
1140	19	143	97	0.126
1200	20	151	89	0.126
1260	21	159	81	0.126
1320	22	168	72	0.127
1380	23	175	65	0.127
1440	24	180	60	0.125
1500	25	185	55	0.123
1560	26	188	52	0.121
1620	27	189	51	0.117
1680	28	190	50	0.113
1740	29	191	49	0.110
1800	30	192	48	0.107
1860	31	193	47	0.104
1920	32	194	47	0.101
1980	33	195	45	0.098
2040	34	195	45	0.096
2100	35	195	45	0.093
2160	36	196	44	0.091
2220	37	196	44	0.088
2280	38	196	44	0.086
2340	39	196	44	0.084
2400	40	197	44	0.082
2460	41	197	44	0.080
2520	42	197	43	0.078
2580	43	197	43	0.076
2640	44	197	43	0.075
2700	45	197	43	0.073
2760	46	197	43	0.071
2820	47	197	43	0.070
2880	48	198	43	0.069

2940	49	198	43	0.067
3000	50	198	43	0.066
3060	51	198	43	0.065
3120	52	198	43	0.063
3180	53	198	42	0.062
3240	54	198	42	0.061
3300	55	198	42	0.060
3360	56	198	42	0.059
3420	57	198	42	0.058
3480	58	198	42	0.057
3540	59	198	42	0.056
3600	60	198	42	0.055

3A. Experimento 3

Tabla 29: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 3 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	1	239	0.044
60	1	5	235	0.083
120	2	9	232	0.071
180	3	13	227	0.073
240	4	17	223	0.072
300	5	21	219	0.070
360	6	25	215	0.070
420	7	29	211	0.070
480	8	33	207	0.069
540	9	38	203	0.069
600	10	42	198	0.069
660	11	45	195	0.068
720	12	50	191	0.069
780	13	54	187	0.069
840	14	58	182	0.069
900	15	62	178	0.069
960	16	66	174	0.069
1020	17	70	170	0.069
1080	18	74	166	0.069
1140	19	78	162	0.069
1200	20	82	158	0.069
1260	21	86	154	0.069

1320	22	91	150	0.069
1380	23	95	145	0.069
1440	24	99	141	0.069
1500	25	103	137	0.068
1560	26	107	133	0.068
1620	27	111	129	0.069
1680	28	115	125	0.068
1740	29	119	121	0.068
1800	30	123	117	0.068
1860	31	127	113	0.068
1920	32	131	109	0.068
1980	33	134	106	0.068
2040	34	138	102	0.068
2100	35	141	99	0.067
2160	36	144	96	0.067
2220	37	146	94	0.066
2280	38	149	91	0.065
2340	39	151	89	0.065
2400	40	153	87	0.064
2460	41	155	85	0.063
2520	42	157	83	0.062
2580	43	158	82	0.061
2640	44	160	80	0.061
2700	45	162	78	0.060
2760	46	164	77	0.059
2820	47	165	75	0.058
2880	48	166	74	0.058
2940	49	168	72	0.057
3000	50	169	71	0.056
3060	51	171	69	0.056
3120	52	172	69	0.055
3180	53	172	68	0.054
3240	54	173	67	0.053
3300	55	174	66	0.053
3360	56	174	66	0.052
3420	57	174	66	0.051
3480	58	175	65	0.050
3540	59	176	65	0.050
3600	60	176	64	0.049

4A. Experimento 4

Tabla 30: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 4 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.0000
30	0.5	1	239	0.0333
60	1	5	235	0.0889
120	2	10	230	0.0861
180	3	16	224	0.0870
240	4	20	220	0.0847
300	5	25	215	0.0833
360	6	29	211	0.0815
420	7	34	206	0.0817
480	8	39	201	0.0813
540	9	44	196	0.0815
600	10	49	191	0.0822
660	11	54	187	0.0811
720	12	58	182	0.0810
780	13	63	177	0.0803
840	14	68	172	0.0806
900	15	73	167	0.0809
960	16	78	162	0.0811
1020	17	83	157	0.0814
1080	18	88	152	0.0815
1140	19	93	147	0.0813
1200	20	98	142	0.0814
1260	21	103	138	0.0813
1320	22	107	133	0.0811
1380	23	112	128	0.0810
1440	24	116	124	0.0806
1500	25	121	119	0.0804
1560	26	125	115	0.0802
1620	27	130	110	0.0800
1680	28	134	106	0.0798
1740	29	139	101	0.0797
1800	30	142	98	0.0789
1860	31	146	94	0.0783
1920	32	149	91	0.0776
1980	33	151	89	0.0764
2040	34	154	86	0.0753
2100	35	156	84	0.0741

2160	36	158	83	0.0729
2220	37	159	81	0.0718
2280	38	161	79	0.0708
2340	39	163	77	0.0697
2400	40	165	75	0.0686
2460	41	166	74	0.0675
2520	42	168	73	0.0665
2580	43	169	71	0.0654
2640	44	170	70	0.0644
2700	45	171	69	0.0633
2760	46	172	68	0.0623
2820	47	173	67	0.0613
2880	48	173	67	0.0601
2940	49	174	67	0.0590
3000	50	174	66	0.0581
3060	51	175	65	0.0571
3120	52	175	65	0.0561
3180	53	175	65	0.0550
3240	54	175	65	0.0541
3300	55	176	65	0.0532
3360	56	176	64	0.0523
3420	57	176	64	0.0514
3480	58	176	64	0.0506
3540	59	176	64	0.0498
3600	60	176	64	0.0490

5A. Experimento 5

Tabla 31: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 5 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0.000	240.000	0.000
30	0.5	13.667	226.333	0.456
60	1	29.667	210.333	0.494
120	2	56.167	183.833	0.468
180	3	79.333	160.667	0.441
240	4	97.000	143.000	0.404
300	5	110.500	129.500	0.368
360	6	120.000	120.000	0.333
420	7	128.167	111.833	0.305
480	8	134.667	105.333	0.281

540	9	139.000	101.000	0.257
600	10	142.667	97.333	0.238
660	11	145.167	94.833	0.220
720	12	147.667	92.333	0.205
780	13	149.667	90.333	0.192
840	14	151.333	88.667	0.180
900	15	153.000	87.000	0.170
960	16	154.167	85.833	0.161
1020	17	155.167	84.833	0.152
1080	18	156.333	83.667	0.145
1140	19	157.333	82.667	0.138
1200	20	158.000	82.000	0.132
1260	21	158.833	81.167	0.126
1320	22	159.333	80.667	0.121
1380	23	160.167	79.833	0.116
1440	24	161.000	79.000	0.112
1500	25	161.500	78.500	0.108
1560	26	162.000	78.000	0.104
1620	27	162.500	77.500	0.100
1680	28	163.333	76.667	0.097
1740	29	163.667	76.333	0.094
1800	30	164.000	76.000	0.091
1860	31	164.500	75.500	0.088
1920	32	164.833	75.167	0.086
1980	33	165.167	74.833	0.083
2040	34	165.667	74.333	0.081
2100	35	166.000	74.000	0.079
2160	36	166.333	73.667	0.077
2220	37	166.667	73.333	0.075
2280	38	166.833	73.167	0.073
2340	39	167.000	73.000	0.071
2400	40	167.333	72.667	0.070
2460	41	167.667	72.333	0.068
2520	42	167.833	72.167	0.067
2580	43	168.000	72.000	0.065
2640	44	168.333	71.667	0.064
2700	45	168.667	71.333	0.062
2760	46	168.833	71.167	0.061
2820	47	169.000	71.000	0.060
2880	48	169.333	70.667	0.059
2940	49	169.667	70.333	0.058

3000	50	169.833	70.167	0.057
3060	51	170.000	70.000	0.056
3120	52	170.167	69.833	0.055
3180	53	170.333	69.667	0.054
3240	54	170.667	69.333	0.053
3300	55	170.833	69.167	0.052
3360	56	171.000	69.000	0.051
3420	57	171.000	69.000	0.050
3480	58	171.500	68.500	0.049
3540	59	171.500	68.500	0.048
3600	60	171.667	68.333	0.048

6A. Experimento 6

Tabla 32: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 6 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	18	222	0.600
60	1	34	207	0.558
120	2	63	178	0.521
180	3	87	154	0.481
240	4	105	135	0.439
300	5	119	121	0.397
360	6	129	111	0.358
420	7	136	104	0.324
480	8	140	100	0.292
540	9	144	97	0.266
600	10	147	94	0.244
660	11	149	91	0.225
720	12	151	90	0.209
780	13	153	88	0.196
840	14	154	87	0.183
900	15	155	85	0.173
960	16	157	84	0.163
1020	17	158	83	0.154
1080	18	158	82	0.147
1140	19	160	81	0.140
1200	20	161	80	0.134
1260	21	161	79	0.128
1320	22	162	79	0.122

1380	23	162	78	0.118
1440	24	163	77	0.113
1500	25	164	76	0.109
1560	26	164	76	0.105
1620	27	165	75	0.102
1680	28	165	75	0.098
1740	29	166	74	0.095
1800	30	167	74	0.093
1860	31	167	73	0.090
1920	32	167	73	0.087
1980	33	168	72	0.085
2040	34	168	72	0.082
2100	35	168	72	0.080
2160	36	169	71	0.078
2220	37	169	71	0.076
2280	38	169	71	0.074
2340	39	169	71	0.072
2400	40	170	70	0.071
2460	41	170	70	0.069
2520	42	170	70	0.068
2580	43	171	69	0.066
2640	44	171	69	0.065
2700	45	171	69	0.063
2760	46	171	69	0.062
2820	47	172	69	0.061
2880	48	172	69	0.060
2940	49	172	68	0.058
3000	50	172	68	0.057
3060	51	172	68	0.056
3120	52	172	68	0.055
3180	53	172	68	0.054
3240	54	173	68	0.053
3300	55	173	67	0.052
3360	56	173	67	0.051
3420	57	173	67	0.051
3480	58	173	67	0.050
3540	59	173	67	0.049
3600	60	173	67	0.048

7A. Experimento 7

Tabla 33: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 7 Relave

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	2	238	0.067
60	1	6	234	0.094
120	2	11	229	0.089
180	3	15	225	0.083
240	4	20	220	0.083
300	5	24	216	0.081
360	6	29	211	0.081
420	7	34	206	0.082
480	8	39	201	0.082
540	9	44	196	0.081
600	10	48	192	0.081
660	11	53	187	0.080
720	12	58	182	0.080
780	13	62	178	0.080
840	14	67	173	0.080
900	15	72	168	0.080
960	16	77	163	0.080
1020	17	82	158	0.080
1080	18	87	153	0.080
1140	19	92	149	0.080
1200	20	96	144	0.080
1260	21	101	139	0.080
1320	22	106	134	0.080
1380	23	110	130	0.080
1440	24	115	125	0.080
1500	25	120	120	0.080
1560	26	125	116	0.080
1620	27	129	111	0.080
1680	28	133	107	0.079
1740	29	137	103	0.079
1800	30	140	100	0.078
1860	31	144	96	0.077
1920	32	146	94	0.076
1980	33	149	91	0.075

2040	34	151	89	0.074
2100	35	153	87	0.073
2160	36	155	85	0.072
2220	37	157	84	0.070
2280	38	158	82	0.069
2340	39	160	80	0.068
2400	40	162	79	0.067
2460	41	163	77	0.066
2520	42	165	76	0.065
2580	43	166	74	0.064
2640	44	167	73	0.063
2700	45	168	72	0.062
2760	46	169	71	0.061
2820	47	170	70	0.060
2880	48	171	70	0.059
2940	49	171	69	0.058
3000	50	172	68	0.057
3060	51	172	68	0.056
3120	52	172	68	0.055
3180	53	173	68	0.054
3240	54	173	67	0.053
3300	55	173	67	0.052
3360	56	173	67	0.051
3420	57	173	67	0.051
3480	58	174	67	0.050
3540	59	174	66	0.049
3600	60	174	66	0.048

8A. Experimento 8

Tabla 34: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 8 Relave
Promedio

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	3	237	0.100
60	1	10	231	0.158
120	2	16	225	0.129
180	3	24	216	0.133
240	4	31	209	0.129
300	5	38	202	0.127
360	6	45	195	0.125

420	7	52	189	0.123
480	8	59	181	0.123
540	9	67	174	0.123
600	10	74	167	0.123
660	11	81	159	0.123
720	12	89	152	0.123
780	13	96	145	0.122
840	14	103	137	0.123
900	15	111	130	0.123
960	16	118	123	0.122
1020	17	125	116	0.122
1080	18	132	109	0.122
1140	19	139	101	0.122
1200	20	147	94	0.122
1260	21	154	86	0.122
1320	22	162	79	0.122
1380	23	168	73	0.121
1440	24	174	67	0.120
1500	25	178	63	0.118
1560	26	179	61	0.115
1620	27	181	60	0.111
1680	28	183	58	0.109
1740	29	184	57	0.105
1800	30	185	56	0.103
1860	31	186	55	0.100
1920	32	186	54	0.097
1980	33	187	54	0.094
2040	34	187	53	0.092
2100	35	187	53	0.089
2160	36	187	53	0.087
2220	37	187	53	0.084
2280	38	187	53	0.082
2340	39	188	53	0.080
2400	40	188	53	0.078
2460	41	188	52	0.076
2520	42	188	52	0.075
2580	43	188	52	0.073
2640	44	188	52	0.071
2700	45	188	52	0.070
2760	46	189	52	0.068
2820	47	189	52	0.067

2880	48	189	52	0.065
2940	49	189	51	0.064
3000	50	189	51	0.063
3060	51	189	51	0.062
3120	52	189	51	0.061
3180	53	189	51	0.060
3240	54	189	51	0.058
3300	55	190	51	0.057
3360	56	190	50	0.056
3420	57	190	50	0.055
3480	58	190	50	0.055
3540	59	190	50	0.054
3600	60	190	50	0.053

Anexo B: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Concentrados

1B. Experimento 1

Tabla 35: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 1 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	1	239	0.044
60	1	4	236	0.072
120	2	8	232	0.069
180	3	13	228	0.069
240	4	17	223	0.069
300	5	21	219	0.069
360	6	25	215	0.069
420	7	29	211	0.068
480	8	33	207	0.068
540	9	37	203	0.068
600	10	41	199	0.068
660	11	45	195	0.068
720	12	49	192	0.067
780	13	53	187	0.068
840	14	57	183	0.067
900	15	61	179	0.068
960	16	65	176	0.067
1020	17	68	172	0.067

1080	18	72	168	0.067
1140	19	76	164	0.067
1200	20	80	160	0.067
1260	21	84	156	0.067
1320	22	88	152	0.067
1380	23	92	148	0.066
1440	24	96	145	0.066
1500	25	100	141	0.066
1560	26	104	136	0.066
1620	27	107	133	0.066
1680	28	111	129	0.066
1740	29	115	126	0.066
1800	30	118	122	0.066
1860	31	122	118	0.066
1920	32	126	114	0.066
1980	33	130	110	0.065
2040	34	134	107	0.065
2100	35	137	103	0.065
2160	36	141	99	0.065
2220	37	144	96	0.065
2280	38	148	92	0.065
2340	39	151	89	0.065
2400	40	155	85	0.064
2460	41	157	83	0.064
2520	42	160	80	0.063
2580	43	163	78	0.063
2640	44	165	75	0.063
2700	45	168	73	0.062
2760	46	170	70	0.061
2820	47	172	69	0.061
2880	48	174	66	0.060
2940	49	176	64	0.060
3000	50	178	63	0.059
3060	51	179	61	0.058
3120	52	181	60	0.058
3180	53	182	58	0.057
3240	54	184	56	0.057
3300	55	185	55	0.056
3360	56	187	54	0.056
3420	57	188	52	0.055
3480	58	189	51	0.054

3540	59	190	50	0.054
3600	60	192	49	0.053

2B. Experimento 2

Tabla 36: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 2 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	2	239	0.050
60	1	4	236	0.063
120	2	9	231	0.075
180	3	13	227	0.072
240	4	17	223	0.071
300	5	21	219	0.070
360	6	25	215	0.069
420	7	29	211	0.069
480	8	33	207	0.069
540	9	37	203	0.069
600	10	43	197	0.071
660	11	46	194	0.070
720	12	50	190	0.069
780	13	54	186	0.069
840	14	58	182	0.069
900	15	62	178	0.069
960	16	66	174	0.069
1020	17	70	170	0.069
1080	18	75	166	0.069
1140	19	79	162	0.069
1200	20	83	158	0.069
1260	21	87	154	0.069
1320	22	91	149	0.069
1380	23	95	146	0.068
1440	24	99	142	0.068
1500	25	103	138	0.068
1560	26	107	134	0.068
1620	27	110	130	0.068
1680	28	114	127	0.068
1740	29	117	123	0.067
1800	30	121	119	0.067
1860	31	124	116	0.067

1920	32	127	113	0.066
1980	33	130	110	0.066
2040	34	133	108	0.065
2100	35	135	105	0.064
2160	36	138	103	0.064
2220	37	140	100	0.063
2280	38	143	98	0.063
2340	39	145	96	0.062
2400	40	147	93	0.061
2460	41	149	91	0.061
2520	42	152	88	0.060
2580	43	154	86	0.060
2640	44	156	84	0.059
2700	45	158	82	0.059
2760	46	160	80	0.058
2820	47	162	79	0.057
2880	48	164	77	0.057
2940	49	165	75	0.056
3000	50	167	74	0.056
3060	51	169	72	0.055
3120	52	170	70	0.054
3180	53	171	69	0.054
3240	54	173	67	0.053
3300	55	175	66	0.053
3360	56	176	64	0.052
3420	57	178	63	0.052
3480	58	179	61	0.051
3540	59	180	60	0.051
3600	60	181	59	0.050

3B. Experimento 3

Tabla 37: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 3 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	1	239	0.022
60	1	3	237	0.044
120	2	5	235	0.042
180	3	8	232	0.044
240	4	10	230	0.041
300	5	12	228	0.041

360	6	14	226	0.040
420	7	17	223	0.040
480	8	19	221	0.040
540	9	22	219	0.040
600	10	24	216	0.040
660	11	26	214	0.040
720	12	28	212	0.039
780	13	31	209	0.039
840	14	33	207	0.039
900	15	35	205	0.039
960	16	37	203	0.039
1020	17	39	201	0.039
1080	18	42	198	0.039
1140	19	44	196	0.038
1200	20	46	194	0.038
1260	21	48	192	0.038
1320	22	50	190	0.038
1380	23	53	188	0.038
1440	24	55	185	0.038
1500	25	57	183	0.038
1560	26	59	181	0.038
1620	27	61	179	0.038
1680	28	63	177	0.038
1740	29	65	175	0.037
1800	30	68	173	0.038
1860	31	70	170	0.037
1920	32	72	168	0.038
1980	33	74	166	0.037
2040	34	76	164	0.037
2100	35	78	162	0.037
2160	36	80	160	0.037
2220	37	82	158	0.037
2280	38	85	155	0.037
2340	39	87	153	0.037
2400	40	89	151	0.037
2460	41	91	149	0.037
2520	42	93	147	0.037
2580	43	95	145	0.037
2640	44	97	143	0.037
2700	45	99	141	0.037
2760	46	101	139	0.037

2820	47	103	137	0.036
2880	48	105	135	0.036
2940	49	107	133	0.036
3000	50	109	131	0.036
3060	51	111	130	0.036
3120	52	112	128	0.036
3180	53	114	126	0.036
3240	54	116	124	0.036
3300	55	118	122	0.036
3360	56	119	121	0.035
3420	57	121	119	0.035
3480	58	123	118	0.035
3540	59	124	116	0.035
3600	60	126	114	0.035

4B. Experimento 4

Tabla 38: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 4 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	1	239	0.033
60	1	3	237	0.050
120	2	5	235	0.044
180	3	9	231	0.050
240	4	12	229	0.048
300	5	14	226	0.047
360	6	17	223	0.047
420	7	20	220	0.048
480	8	24	216	0.049
540	9	27	213	0.050
600	10	29	211	0.049
660	11	32	208	0.049
720	12	35	205	0.049
780	13	38	202	0.048
840	14	41	199	0.048

900	15	43	197	0.048
960	16	46	194	0.048
1020	17	49	191	0.048
1080	18	52	188	0.048
1140	19	55	186	0.048
1200	20	57	183	0.048
1260	21	60	180	0.047
1320	22	63	177	0.047
1380	23	66	175	0.047
1440	24	68	172	0.047
1500	25	71	169	0.047
1560	26	74	167	0.047
1620	27	76	164	0.047
1680	28	79	161	0.047
1740	29	82	159	0.047
1800	30	84	156	0.047
1860	31	87	153	0.047
1920	32	89	151	0.047
1980	33	92	148	0.046
2040	34	95	145	0.046
2100	35	98	143	0.046
2160	36	100	140	0.046
2220	37	102	138	0.046
2280	38	105	135	0.046
2340	39	108	132	0.046
2400	40	110	130	0.046
2460	41	113	127	0.046
2520	42	115	125	0.046
2580	43	117	123	0.045
2640	44	120	120	0.045
2700	45	122	118	0.045
2760	46	124	116	0.045
2820	47	127	114	0.045
2880	48	129	111	0.045
2940	49	131	109	0.045
3000	50	133	107	0.044
3060	51	135	105	0.044
3120	52	137	103	0.044
3180	53	139	101	0.044
3240	54	141	99	0.044
3300	55	143	97	0.043

3360	56	145	95	0.043
3420	57	147	93	0.043
3480	58	149	92	0.043
3540	59	150	90	0.042
3600	60	152	88	0.042

5B. Experimento 5

Tabla 39: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 5 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	10	230	0.322
60	1	18	222	0.294
120	2	41	199	0.342
180	3	62	178	0.344
240	4	80	160	0.333
300	5	94	146	0.312
360	6	107	134	0.296
420	7	117	123	0.278
480	8	126	115	0.261
540	9	133	107	0.246
600	10	138	102	0.231
660	11	143	98	0.216
720	12	146	94	0.203
780	13	149	91	0.191
840	14	151	89	0.180
900	15	153	87	0.170
960	16	155	85	0.161
1020	17	157	84	0.153
1080	18	158	82	0.146
1140	19	160	81	0.140
1200	20	161	79	0.134
1260	21	162	78	0.128
1320	22	163	77	0.123
1380	23	164	76	0.119
1440	24	165	75	0.114
1500	25	166	74	0.110
1560	26	167	73	0.107
1620	27	167	73	0.103
1680	28	168	72	0.100
1740	29	169	71	0.097

1800	30	169	71	0.094
1860	31	170	70	0.091
1920	32	171	69	0.089
1980	33	172	68	0.087
2040	34	172	68	0.084
2100	35	173	67	0.082
2160	36	174	67	0.080
2220	37	174	66	0.078
2280	38	175	66	0.077
2340	39	175	65	0.075
2400	40	176	64	0.073
2460	41	176	64	0.072
2520	42	177	64	0.070
2580	43	177	63	0.069
2640	44	177	63	0.067
2700	45	178	62	0.066
2760	46	178	62	0.065
2820	47	179	61	0.063
2880	48	179	61	0.062
2940	49	180	61	0.061
3000	50	180	60	0.060
3060	51	180	60	0.059
3120	52	181	60	0.058
3180	53	181	59	0.057
3240	54	181	59	0.056
3300	55	182	58	0.055
3360	56	182	58	0.054
3420	57	183	58	0.053
3480	58	183	57	0.053
3540	59	183	57	0.052
3600	60	183	57	0.051

6B Experimento 6

Tabla 40: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 6 Concentrado
Promedio

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	9	232	0.283
60	1	20	221	0.325
120	2	51	189	0.425

180	3	71	170	0.392
240	4	90	150	0.376
300	5	106	134	0.353
360	6	119	121	0.331
420	7	131	109	0.313
480	8	140	101	0.291
540	9	147	93	0.272
600	10	151	89	0.252
660	11	156	85	0.236
720	12	159	82	0.220
780	13	162	79	0.207
840	14	165	76	0.196
900	15	167	73	0.186
960	16	170	71	0.177
1020	17	171	69	0.167
1080	18	172	68	0.159
1140	19	173	67	0.152
1200	20	175	65	0.146
1260	21	176	64	0.139
1320	22	177	63	0.134
1380	23	178	62	0.129
1440	24	179	62	0.124
1500	25	179	61	0.120
1560	26	180	60	0.115
1620	27	181	59	0.112
1680	28	181	59	0.108
1740	29	182	58	0.105
1800	30	183	58	0.101
1860	31	183	57	0.098
1920	32	184	56	0.096
1980	33	185	56	0.093
2040	34	185	55	0.091
2100	35	186	55	0.088
2160	36	186	54	0.086
2220	37	187	53	0.084
2280	38	187	53	0.082
2340	39	188	53	0.080
2400	40	188	52	0.078
2460	41	188	52	0.077
2520	42	189	52	0.075
2580	43	189	51	0.073

2640	44	189	51	0.072
2700	45	190	51	0.070
2760	46	190	50	0.069
2820	47	190	50	0.067
2880	48	191	50	0.066
2940	49	191	49	0.065
3000	50	191	49	0.064
3060	51	192	48	0.063
3120	52	192	48	0.062
3180	53	192	48	0.060
3240	54	193	48	0.059
3300	55	193	47	0.058
3360	56	193	47	0.057
3420	57	193	47	0.057
3480	58	194	46	0.056
3540	59	194	46	0.055
3600	60	194	46	0.054

7B. Experimento 7

Tabla 41: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 7 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	1	239	0.033
60	1	4	236	0.061
120	2	7	233	0.060
180	3	11	229	0.060
240	4	14	226	0.059
300	5	17	223	0.058
360	6	20	220	0.056
420	7	23	217	0.056
480	8	26	214	0.055
540	9	30	210	0.056
600	10	33	207	0.055
660	11	36	204	0.055
720	12	40	200	0.055
780	13	43	197	0.055

840	14	46	194	0.055
900	15	49	191	0.054
960	16	52	188	0.054
1020	17	55	185	0.054
1080	18	58	182	0.054
1140	19	61	179	0.054
1200	20	65	175	0.054
1260	21	68	173	0.054
1320	22	71	169	0.054
1380	23	74	166	0.053
1440	24	77	163	0.053
1500	25	80	160	0.053
1560	26	83	157	0.053
1620	27	86	154	0.053
1680	28	89	151	0.053
1740	29	92	148	0.053
1800	30	94	146	0.052
1860	31	97	143	0.052
1920	32	101	139	0.052
1980	33	104	136	0.052
2040	34	107	133	0.052
2100	35	110	130	0.052
2160	36	112	128	0.052
2220	37	115	125	0.052
2280	38	118	122	0.052
2340	39	120	120	0.051
2400	40	123	117	0.051
2460	41	126	114	0.051
2520	42	128	112	0.051
2580	43	131	109	0.051
2640	44	133	107	0.051
2700	45	136	104	0.050
2760	46	138	102	0.050
2820	47	140	100	0.050
2880	48	142	98	0.049
2940	49	145	96	0.049
3000	50	147	94	0.049
3060	51	148	92	0.048
3120	52	151	90	0.048
3180	53	152	88	0.048
3240	54	154	86	0.048

3300	55	156	84	0.047
3360	56	158	82	0.047
3420	57	160	80	0.047
3480	58	161	79	0.046
3540	59	163	77	0.046
3600	60	165	76	0.046

8B Experimento 8

Tabla 42: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 8 Concentrado

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	240	0.000
30	0.5	2	239	0.050
60	1	3	237	0.056
120	2	6	234	0.053
180	3	9	231	0.052
240	4	12	228	0.050
300	5	15	225	0.050
360	6	18	222	0.050
420	7	21	219	0.050
480	8	24	216	0.050
540	9	27	213	0.050
600	10	30	210	0.050
660	11	33	207	0.050
720	12	36	204	0.050
780	13	40	200	0.051
840	14	43	197	0.051
900	15	45	195	0.050
960	16	48	192	0.050
1020	17	50	190	0.049
1080	18	53	187	0.049
1140	19	57	183	0.050
1200	20	60	180	0.050
1260	21	63	177	0.050
1320	22	66	174	0.050
1380	23	69	172	0.050
1440	24	71	169	0.050
1500	25	74	166	0.049
1560	26	77	164	0.049
1620	27	79	161	0.049
1680	28	82	158	0.049

1740	29	85	155	0.049
1800	30	88	152	0.049
1860	31	90	150	0.048
1920	32	93	147	0.048
1980	33	95	145	0.048
2040	34	98	142	0.048
2100	35	100	140	0.048
2160	36	103	138	0.047
2220	37	105	135	0.047
2280	38	107	133	0.047
2340	39	110	130	0.047
2400	40	112	128	0.047
2460	41	114	126	0.046
2520	42	116	125	0.046
2580	43	117	123	0.045
2640	44	119	121	0.045
2700	45	121	119	0.045
2760	46	123	117	0.045
2820	47	125	115	0.044
2880	48	127	113	0.044
2940	49	129	111	0.044
3000	50	131	109	0.044
3060	51	132	108	0.043
3120	52	134	106	0.043
3180	53	136	104	0.043
3240	54	138	102	0.042
3300	55	139	101	0.042
3360	56	141	99	0.042
3420	57	143	97	0.042
3480	58	144	96	0.041
3540	59	146	94	0.041
3600	60	147	93	0.041

Anexo C: Tablas y Gráficos Velocidad de Sedimentación Mineral de cabeza

1C. Experimento 9

Tabla 43: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 9

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	360	0.000

30	0.5	3	357	0.089
60	1	5	355	0.089
120	2	8	352	0.069
180	3	11	349	0.059
240	4	13	347	0.056
300	5	16	344	0.054
360	6	19	341	0.053
420	7	22	338	0.053
480	8	25	335	0.053
540	9	28	332	0.051
600	10	30	330	0.049
660	11	32	328	0.049
720	12	35	325	0.048
780	13	37	323	0.047
840	14	40	320	0.047
900	15	42	318	0.047
960	16	45	315	0.047
1020	17	47	313	0.046
1080	18	50	311	0.046
1140	19	52	308	0.046
1200	20	55	305	0.046
1260	21	57	303	0.046
1320	22	60	300	0.045
1380	23	62	298	0.045
1440	24	65	296	0.045
1500	25	67	293	0.045
1560	26	69	291	0.044
1620	27	72	288	0.044
1680	28	75	286	0.044
1740	29	77	283	0.044
1800	30	79	281	0.044
1860	31	82	278	0.044
1920	32	84	276	0.044
1980	33	87	273	0.044
2040	34	89	271	0.044
2100	35	92	269	0.044
2160	36	94	266	0.044
2220	37	97	263	0.044
2280	38	99	261	0.044
2340	39	101	259	0.043
2400	40	104	256	0.043

2460	41	106	254	0.043
2520	42	109	251	0.043
2580	43	111	249	0.043
2640	44	114	247	0.043
2700	45	116	244	0.043
2760	46	118	242	0.043
2820	47	120	240	0.043
2880	48	123	237	0.043
2940	49	125	235	0.043
3000	50	128	232	0.043
3060	51	130	230	0.042
3120	52	132	228	0.042
3180	53	135	226	0.042
3240	54	137	223	0.042
3300	55	139	221	0.042
3360	56	141	219	0.042
3420	57	143	217	0.042
3480	58	145	215	0.042
3540	59	147	213	0.042
3600	60	149	211	0.041

2C. Experimento 10

Tabla 44: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 10

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	360	0.000
30	0.5	8	352	0.278
60	1	18	342	0.294
120	2	29	331	0.244
180	3	38	322	0.211
240	4	47	313	0.196
300	5	56	304	0.187
360	6	64	296	0.179
420	7	72	288	0.172
480	8	80	280	0.166
540	9	86	274	0.160
600	10	93	267	0.155

660	11	99	261	0.151
720	12	105	255	0.146
780	13	111	249	0.142
840	14	116	244	0.138
900	15	121	239	0.135
960	16	126	234	0.131
1020	17	131	229	0.128
1080	18	136	224	0.126
1140	19	141	219	0.123
1200	20	145	215	0.121
1260	21	150	210	0.119
1320	22	154	206	0.117
1380	23	157	203	0.114
1440	24	160	200	0.111
1500	25	163	197	0.109
1560	26	165	195	0.106
1620	27	168	192	0.104
1680	28	170	191	0.101
1740	29	171	189	0.098
1800	30	173	187	0.096
1860	31	174	186	0.094
1920	32	176	184	0.091
1980	33	177	183	0.089
2040	34	178	182	0.087
2100	35	179	181	0.085
2160	36	180	180	0.083
2220	37	181	179	0.081
2280	38	181	179	0.080
2340	39	182	178	0.078
2400	40	183	177	0.076
2460	41	184	176	0.075
2520	42	185	176	0.073
2580	43	185	175	0.072
2640	44	186	174	0.070
2700	45	187	174	0.069
2760	46	187	173	0.068
2820	47	188	172	0.067
2880	48	188	172	0.065
2940	49	189	171	0.064
3000	50	189	171	0.063
3060	51	190	170	0.062

3120	52	191	170	0.061
3180	53	191	169	0.060
3240	54	192	169	0.059
3300	55	192	168	0.058
3360	56	192	168	0.057
3420	57	193	167	0.056
3480	58	193	167	0.056
3540	59	194	166	0.055
3600	60	194	166	0.054

3C. Experimento 11

Tabla 45: Datos Velocidad de sedimentación Experimento 11

Promedio				
Tiempo [s]	Tiempo [min]	Altura [mm]	Gradiente [mm]	Velocidad [mm/s]
0	0	0	360	0.000
30	0.5	2	358	0.056
60	1	4	356	0.061
120	2	6	354	0.050
180	3	8	352	0.046
240	4	11	349	0.044
300	5	13	347	0.044
360	6	15	345	0.042
420	7	17	343	0.041
480	8	20	340	0.041
540	9	22	338	0.040
600	10	24	336	0.040
660	11	26	334	0.039
720	12	28	332	0.039
780	13	30	330	0.039
840	14	33	328	0.039
900	15	35	325	0.039
960	16	37	323	0.038
1020	17	39	321	0.038
1080	18	41	319	0.038
1140	19	43	317	0.038
1200	20	45	315	0.038
1260	21	48	312	0.038
1320	22	50	310	0.038
1380	23	52	308	0.038
1440	24	54	306	0.038
1500	25	56	304	0.037

1560	26	58	302	0.037
1620	27	61	300	0.037
1680	28	63	297	0.037
1740	29	65	295	0.037
1800	30	68	293	0.038
1860	31	70	291	0.037
1920	32	72	288	0.037
1980	33	74	286	0.037
2040	34	76	284	0.037
2100	35	78	282	0.037
2160	36	80	280	0.037
2220	37	83	277	0.037
2280	38	85	275	0.037
2340	39	87	273	0.037
2400	40	89	271	0.037
2460	41	91	269	0.037
2520	42	94	267	0.037
2580	43	96	264	0.037
2640	44	98	262	0.037
2700	45	100	260	0.037
2760	46	102	258	0.037
2820	47	104	256	0.037
2880	48	107	254	0.037
2940	49	109	252	0.037
3000	50	111	249	0.037
3060	51	113	247	0.037
3120	52	115	245	0.037
3180	53	117	243	0.037
3240	54	119	241	0.037
3300	55	121	239	0.037
3360	56	123	237	0.037
3420	57	126	235	0.037
3480	58	127	233	0.037
3540	59	129	231	0.036
3600	60	131	229	0.036

Anexo D: Tablas y Gráficos Reología de Relaves

1D. Experimento 1

Tabla 46: Datos Reología Exp. 1 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	15.2	910.0	0.016	4.763
80	10	19.2	1528.0	0.028	6.351
100	10	25.8	2576.3	0.046	7.938
120	10	30.3	3643.7	0.066	9.526
140	10	33.5	4693.3	0.084	11.114
160	10	36.9	5905.7	0.106	12.701
180	10	41.5	7472.7	0.134	14.289
200	10	44.1	8818.0	0.158	15.877
220	10	46.4	10214.0	0.184	17.465
240	10	49.3	11827.7	0.213	19.052
250	10	50.8	12663.0	0.227	19.846

2D. Experimento 2

Tabla 47: Datos Reología Exp. 2 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	17.2	1031.0	0.019	4.763
80	10	24.3	1944.7	0.035	6.351
100	10	32.9	3288.0	0.059	7.938
120	10	39.5	4739.7	0.085	9.526
140	10	44.9	6284.7	0.077	11.114
160	10	50.6	8102.0	0.146	12.701
180	10	54.7	9849.3	0.177	14.289
200	10	59.0	11811.0	0.212	15.877
220	10	64.5	13820.3	0.257	17.465
240	10	66.1	15859.0	0.285	19.052
250	10	67.5	16870.0	0.303	19.846

3D. Experimento 3

Tabla 48: Datos Reología Exp. 2 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	16.4	981.5	0.018	2	4.763
80	10	20.85	1671.5	0.03	3.5	6.351

100	10	30.1	3012	0.054	7.5	7.938
120	10	33.4	4008	0.072	10.5	9.526
140	10	37.5	5245.5	0.0945	12.5	11.114
160	10	40.25	6444.5	0.116	15.5	12.701
180	10	43	7736.5	0.139	18.5	14.289
200	10	45	8999	0.1615	22	15.877
220	10	47.65	10485.5	0.1885	25.5	17.465
240	10	49.95	11990.5	0.2155	29.5	19.052
250	10	50.65	12590	0.226	31	19.846

4D. Experimento 4

Tabla 49: Datos Reología Exp. 4 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	15.0	899.3	0.0	2.9	4.763
80	10	18.8	1501.0	0.0	4.1	6.351
100	10	27.8	2780.0	0.0	6.6	7.938
120	10	33.1	3974.3	0.1	8.5	9.526
140	10	37.4	5232.3	0.1	11.7	11.114
160	10	40.7	6513.3	0.1	13.6	12.701
180	10	43.5	7838.3	0.1	16.8	14.289
200	10	46.0	9192.3	0.2	19.3	15.877
220	10	48.4	10641.3	0.2	21.8	17.465
240	10	52.3	12538.0	0.2	26.4	19.052
250	10	53.0	13227.0	0.2	27.9	19.846

5D. Experimento 5

Tabla 50: Datos Reología Exp. 5 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	15.5	928.7	0.0	2.0	4.763
80	10	22.1	1766.3	0.0	4.0	6.351
100	10	27.7	2769.7	0.0	6.3	7.938
120	10	32.3	3871.3	0.1	9.3	9.526
140	10	36.5	5102.3	0.1	12.0	11.114

160	10	40.2	6429.0	0.1	15.7	12.701
180	10	42.0	7560.0	0.1	18.7	14.289
200	10	45.4	9069.0	0.2	22.3	15.877
220	10	47.0	10344.7	0.2	25.3	17.465
240	10	49.5	11800.7	0.2	29.0	19.052
250	10	50.9	12708.0	0.2	31.3	19.846

6D. Experimento 6

Tabla 51: Datos Reología Exp. 6 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	21.0	1262.3	0.022	3.6	4.763
80	10	24.2	1937.7	0.035	5.5	6.351
100	10	32.5	3248.3	0.058	8.6	7.938
120	10	34.3	4074.0	0.073	10.2	9.526
140	10	38.8	5430.0	0.098	13.0	11.114
160	10	40.5	6486.0	0.117	14.9	12.701
180	10	42.2	7589.7	0.136	17.4	14.289
200	10	43.9	8773.7	0.158	20.3	15.877
220	10	46.2	10167.0	0.183	22.8	17.465
240	10	47.5	11389.0	0.205	25.4	19.052
250	10	48.6	12100.7	0.215	26.9	19.846

7D. Experimento 7

Tabla 52: Datos Reología Exp. 7 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	15.3	912.0	0.016	2.0	4.763
80	10	19.2	1536.3	0.028	3.3	6.351
100	10	26.0	2605.0	0.047	6.0	7.938
120	10	30.7	3679.3	0.066	8.0	9.526
140	10	34.7	4853.7	0.087	11.0	11.114
160	10	38.4	6134.0	0.110	14.0	12.701
180	10	40.7	7323.7	0.132	17.7	14.289
200	10	43.0	8596.7	0.154	20.0	15.877
220	10	45.5	10013.7	0.180	23.7	17.465
240	10	47.6	11421.3	0.205	27.0	19.052
250	10	48.9	12209.7	0.219	29.0	19.846

8D. Experimento 8

Tabla 53: Datos Reología Exp. 8 relave

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	16	952	0.017	4.763
80	10	20	1710	0.029	6.351
100	10	30	3025	0.055	7.938
120	10	38	4519	0.081	9.526
140	10	42	5929	0.107	11.114
160	10	47	7489	0.135	12.701
180	10	52	9376	0.168	14.289
200	10	58	11505	0.207	15.877
220	10	61	12905	0.236	17.465
240	10	66	14545	0.261	19.052
250	10	71	15714	0.283	19.846

Anexo E: Tablas y Gráficos Reología de Concentrados

1E. Experimento 1

Tabla 54: Datos Reología Exp. 1 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	23.3	1400.0	0.025	4.763
80	10	28.3	2259.0	0.041	6.351
100	10	32.2	3223.3	0.058	7.938
120	10	35.7	4280.7	0.077	9.526
140	10	38.0	5317.7	0.096	11.114
160	10	39.5	6328.7	0.114	12.701
180	10	41.1	7377.3	0.133	14.289
200	10	42.6	8525.7	0.153	15.877
220	10	44.4	9775.0	0.176	17.465
240	10	45.6	10943.0	0.197	19.052
250	10	46.7	11681.3	0.210	19.846

2E. Experimento 2

Tabla 55: Datos Reología Exp. 2 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	38.6	2417.7	0.043	4.763
80	10	40.3	3316.7	0.056	6.351
100	10	44.8	4474.7	0.080	7.938
120	10	46.9	5626.0	0.101	9.526
140	10	48.5	6790.0	0.122	11.114
160	10	49.5	7913.0	0.142	12.701
180	10	51.8	9320.3	0.168	14.289
200	10	53.0	10596.0	0.191	15.877
220	10	54.5	12006.3	0.216	17.465
240	10	55.2	13246.3	0.238	19.052
250	10	56.6	14135.3	0.254	19.846

3E. Experimento 3

Tabla 56: Datos Reología Exp. 3 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	20	1229	0.0223	2	4.763
80	10	24	1908	0.0343	4	6.351
100	10	29	2881	0.0517	6	7.938
120	10	31	3767	0.0677	8	9.526
140	10	35	4833	0.0870	10	11.114
160	10	37	5859	0.1057	13	12.701
180	10	39	6963	0.1250	16	14.289
200	10	40	8013	0.1440	18	15.877
220	10	42	9187	0.1653	21	17.465
240	10	43	10380	0.1863	24	19.052
250	10	44	11072	0.1990	25	19.846

4E. Experimento 4

Tabla 57: Datos Reología Exp. 4 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
-----	------------	--------------------	------------------------	----------------------------	---------	---------------------------

60	10	31.6	1933.0	0.0	4.9	4.763
80	10	33.2	2654.7	0.0	6.5	6.351
100	10	38.7	3865.7	0.1	9.0	7.938
120	10	43.7	5245.0	0.1	11.5	9.526
140	10	44.7	6269.0	0.1	14.0	11.114
160	10	46.7	7418.3	0.1	16.6	12.701
180	10	48.0	8633.7	0.2	19.4	14.289
200	10	50.5	10105.3	0.2	22.3	15.877
220	10	51.3	11283.7	0.2	24.8	17.465
240	10	53.2	12762.3	0.2	27.7	19.052
250	10	54.2	13498.7	0.2	29.6	19.846

5E. Experimento 5

Tabla 58: Datos Reología Exp. 5 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	31.4	2023.7	0.0	4.7	4.763
80	10	33.3	2664.7	0.0	6.3	6.351
100	10	38.3	3828.0	0.1	9.3	7.938
120	10	41.1	4926.0	0.1	11.7	9.526
140	10	42.4	5937.7	0.1	14.3	11.114
160	10	44.3	7093.3	0.1	17.0	12.701
180	10	45.8	8248.3	0.1	20.0	14.289
200	10	47.5	9503.7	0.2	23.0	15.877
220	10	49.0	10779.0	0.2	26.3	17.465
240	10	50.0	12004.7	0.2	29.3	19.052
250	10	50.8	12369.3	0.2	31.0	19.846

6E. Experimento 6

Tabla 59: Datos Reología Exp. 6 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	32.2	2040.3	0.037	4.3	4.763
80	10	33.5	2771.0	0.049	6.1	6.351
100	10	40.7	4084.0	0.074	9.3	7.938
120	10	43.7	5221.0	0.094	11.2	9.526
140	10	46.4	6494.7	0.117	13.7	11.114
160	10	48.3	7699.3	0.140	16.2	12.701

180	10	50.5	9128.3	0.163	18.8	14.289
200	10	52.3	10433.0	0.189	22.0	15.877
220	10	53.6	11774.0	0.212	24.5	17.465
240	10	54.7	13159.0	0.236	27.7	19.052
250	10	55.4	13843.7	0.249	28.6	19.846

7E. Experimento 7

Tabla 60: Datos Reología Exp. 7 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	31.5	1890.0	0.0	4.0	4.763
80	10	33.8	2673.0	0.0	6.3	6.351
100	10	40.3	4031.7	0.1	10.0	7.938
120	10	43.2	5183.7	0.1	12.7	9.526
140	10	45.2	6308.7	0.1	15.0	11.114
160	10	46.9	7505.3	0.1	18.3	12.701
180	10	48.6	8750.3	0.2	21.3	14.289
200	10	50.7	10130.7	0.2	25.0	15.877
220	10	52.3	11507.3	0.2	28.3	17.465
240	10	53.8	12899.7	0.2	31.7	19.052
250	10	54.4	13606.0	0.2	33.7	19.846

8E. Experimento 8

Tabla 61: Datos Reología Exp. 8 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	Tasa de deformación [1/s]
60	10	32	1993	0.036	4.763
80	10	34	2666	0.048	6.351
100	10	39	3898	0.070	7.938
120	10	43	5102	0.091	9.526
140	10	45	6257	0.112	11.114
160	10	46	7352	0.132	12.701
180	10	47	8535	0.154	14.289
200	10	49	9844	0.177	15.877
220	10	50	11051	0.199	17.465
240	10	51	12325	0.221	19.052
250	10	53	13129	0.236	19.846

Anexo F: Tablas y Gráficos Reología de Mineral de Cabeza

1F. Experimento 9

Tabla 62: Datos Reología Exp. 9 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de defromación [1/s]
60	10	14	846	0.015	1	4.763
80	10	17	1369	0.024	2	6.351
100	10	24	2376	0.043	4.5	7.938
120	10	28	3368	0.061	7	9.526
140	10	33	4678	0.084	10.5	11.114
160	10	37	5908	0.106	13.5	12.701
180	10	40	7247	0.130	17	14.289
200	10	44	8850	0.159	21	15.877
220	10	47	10200	0.183	25	17.465
240	10	49	11827	0.213	29	19.052
250	10	51	12746	0.229	32	19.846

2F. Experimento 10

Tabla 63: Datos Reología Exp. 10 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	%Torque	Tasa de deformación [1/s]
60	10	37.4	2474.5	0.045	6.00	4.763
80	10	39.0	3117.0	0.056	7.00	6.351
100	10	44.3	4515.5	0.081	10.50	7.938
120	10	46.8	5612.5	0.101	13.50	9.526
140	10	48.1	6733.0	0.121	16.50	11.114
160	10	49.8	7968.0	0.143	19.50	12.701
180	10	51.5	9274.5	0.167	22.50	14.289
200	10	53.2	10648.5	0.192	26.00	15.877
220	10	54.6	11996.5	0.216	29.50	17.465
240	10	55.8	13371.5	0.240	33.00	19.052
250	10	56.5	14124.0	0.254	35.00	19.846

3F. Experimento 11

Tabla 64: Datos Reología Exp. 11 concentrado

Rpm	tiempo [s]	Viscosidad [mPa*s]	tensión de corte [mPa]	Esfuerzo de torsión [mN*m]	% Torque	Tasa de deformación
60	10	23.1	1383.3	0.025	3.0	4.763
80	10	29.2	2340.3	0.042	5.0	6.351
100	10	36.6	3657.7	0.066	8.7	7.938
120	10	40.5	4861.0	0.088	11.7	9.526
140	10	43.9	6150.3	0.111	14.7	11.114
160	10	46.3	7404.3	0.133	18.3	12.701
180	10	48.6	8749.7	0.157	21.3	14.289
200	10	51.3	10253.7	0.184	25.0	15.877
220	10	53.3	11716.3	0.210	29.0	17.465
240	10	54.5	13079.7	0.235	32.3	19.052
250	10	57.0	14255.7	0.256	35.3	19.846

Anexo G

Tabla 65: P80 de Concentrados y Relaves

Experimento	P80 Relave	P80 Conc.
1	152.20	131.91
2	157.54	135.15
3	150.00	93.55
4	147.21	129.10
5	149.15	136.46
6	149.01	155.27
7	148.31	130.67
8	151.78	154.02

Anexo H

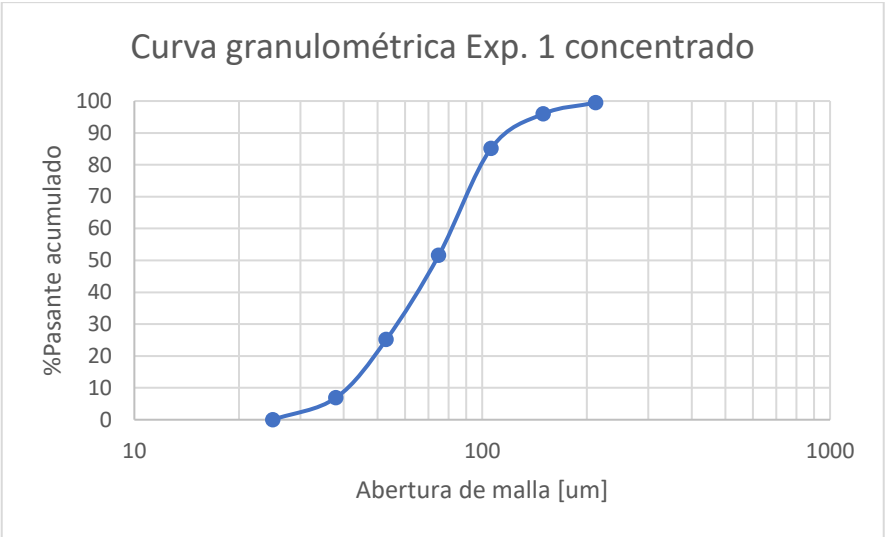


Figura 45: Curva granulométrica exp.1 Concentrado

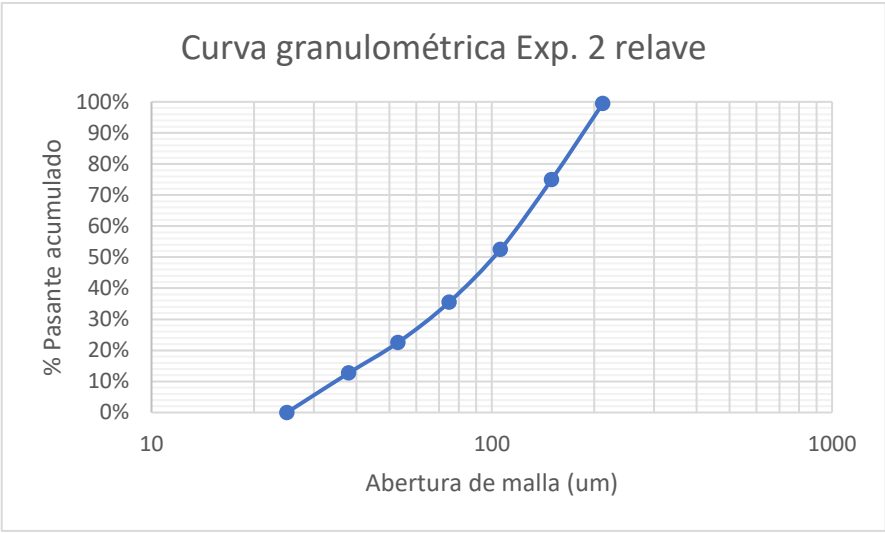


Figura 46: Curva granulométrica exp.2 Relave

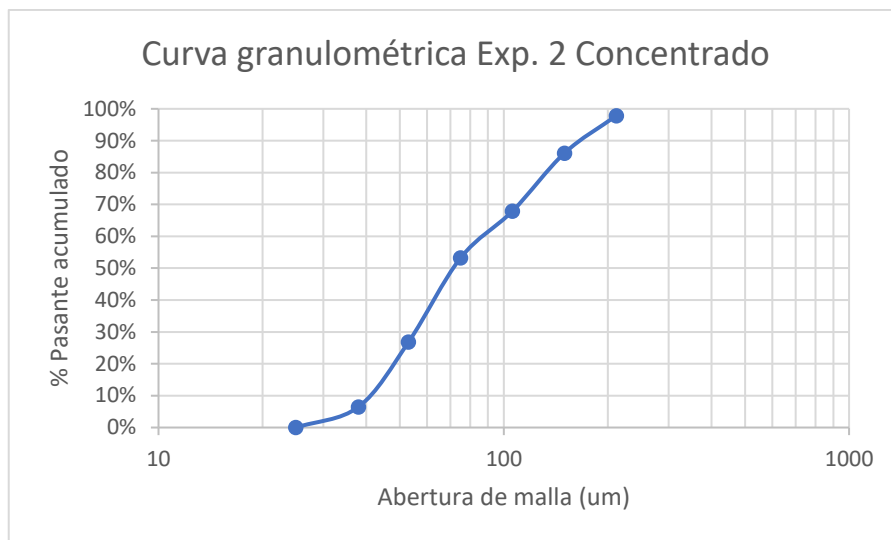


Figura 47: Curva granulométrica exp.2 Concentrado

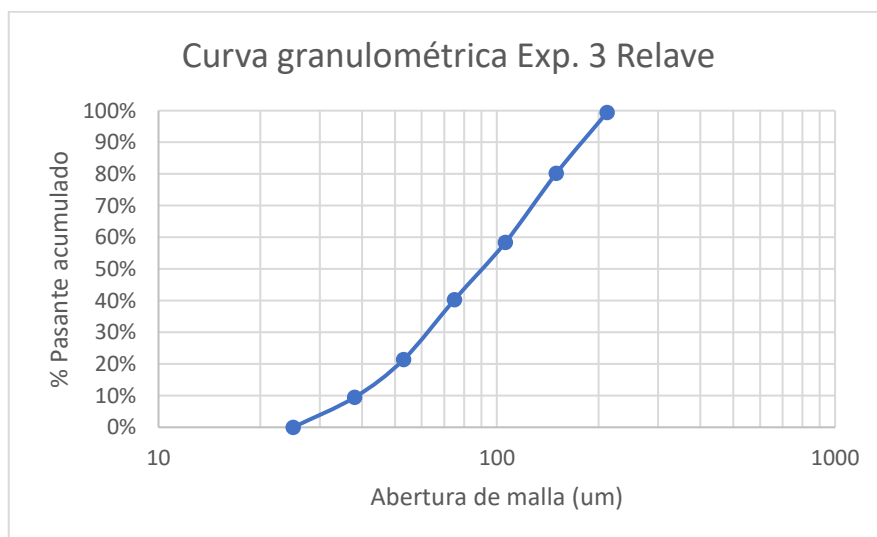


Figura 48: Curva granulométrica exp.3 Relave

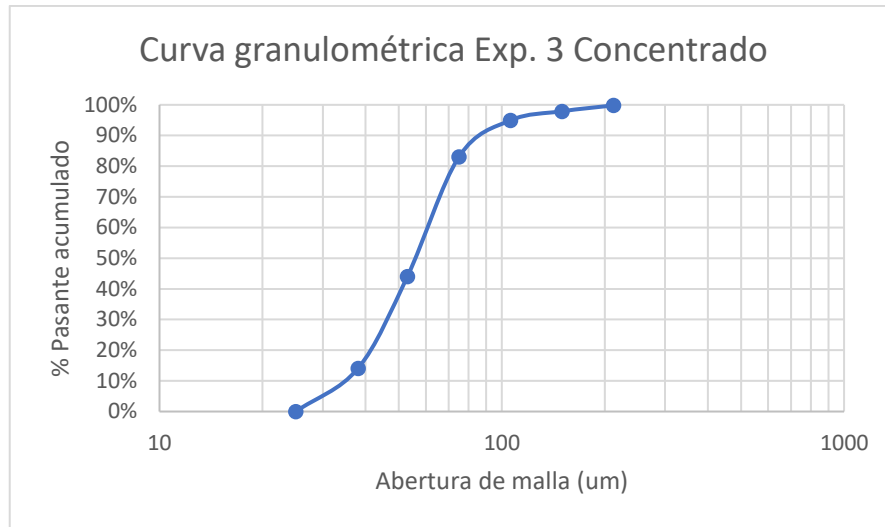


Figura 49: Curva granulométrica exp.3 Concentrado

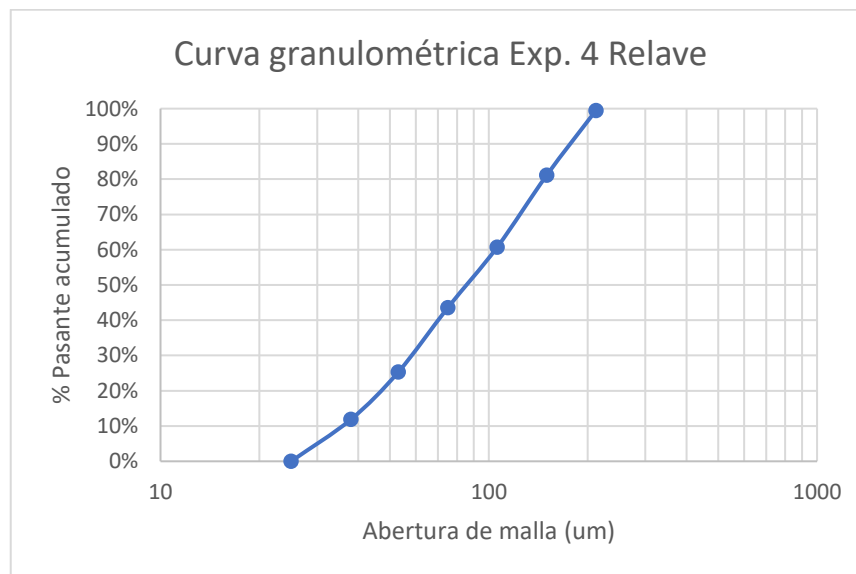


Figura 50: Curva granulométrica exp.4 Relave

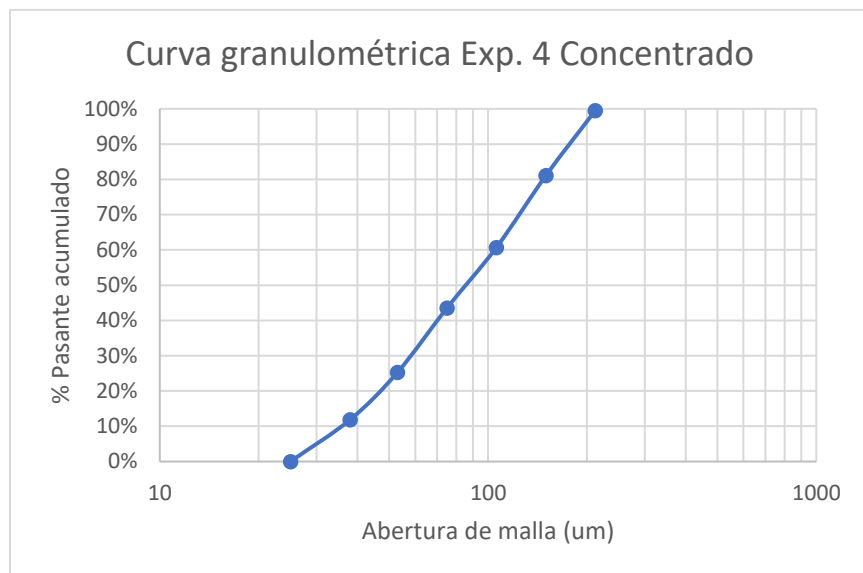


Figura 51: Curva granulométrica exp.4 Concentrado

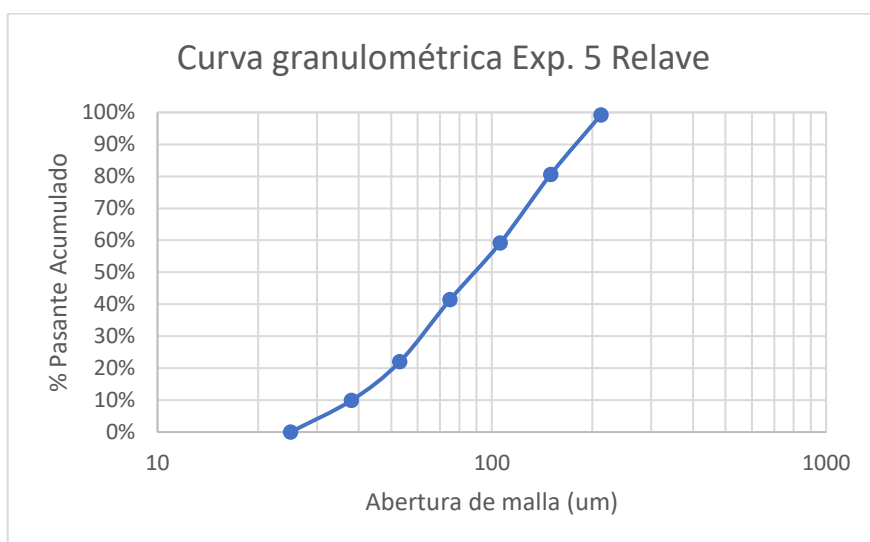


Figura 52: Curva granulométrica exp.5 Relave

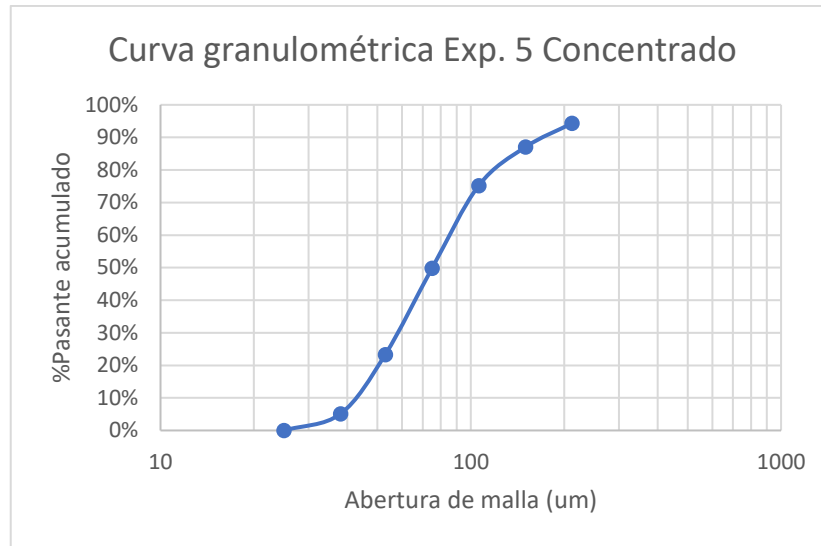


Figura 53: Curva granulométrica exp.5 Concentrado

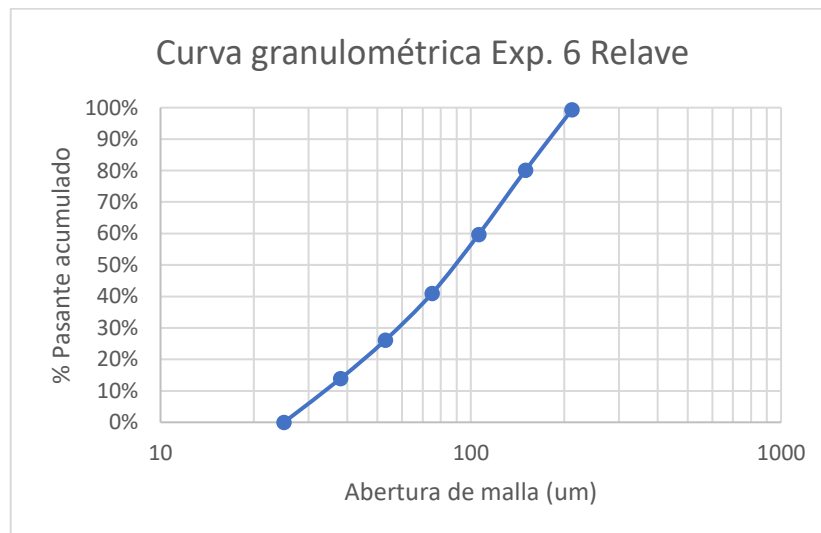


Figura 54: Curva granulométrica exp.6 Relave

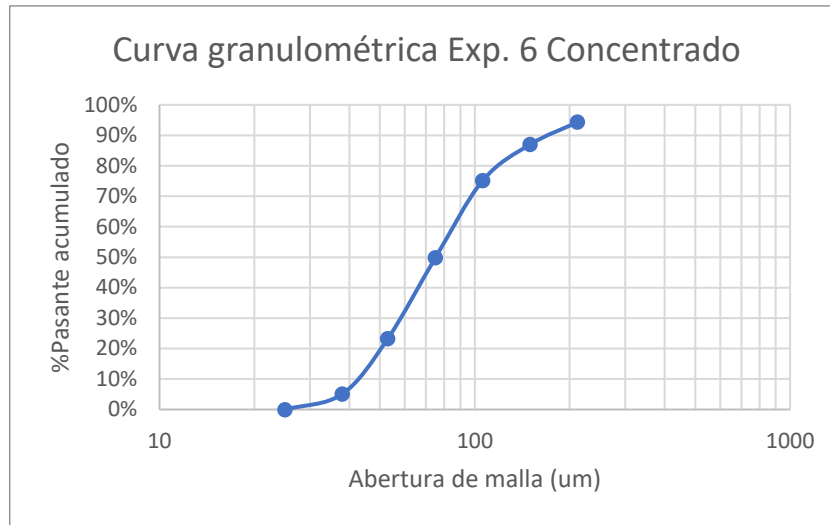


Figura 55: Curva granulométrica exp.6 Concentrado

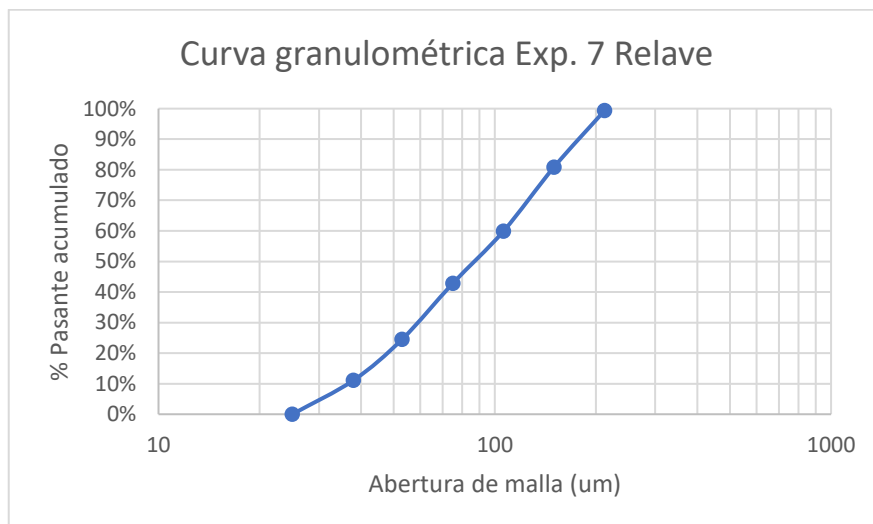


Figura 56: Curva granulométrica exp.7 Relave

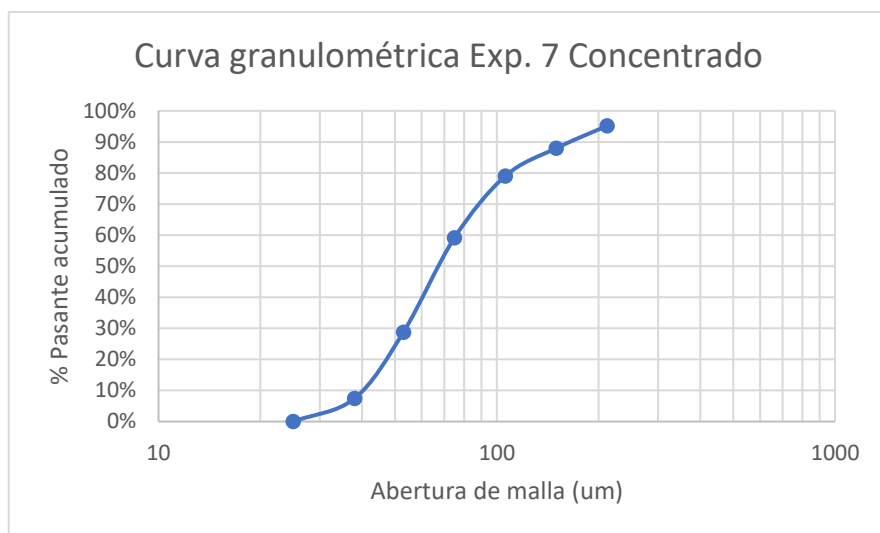


Figura 57: Curva granulométrica exp.7 Concentrado

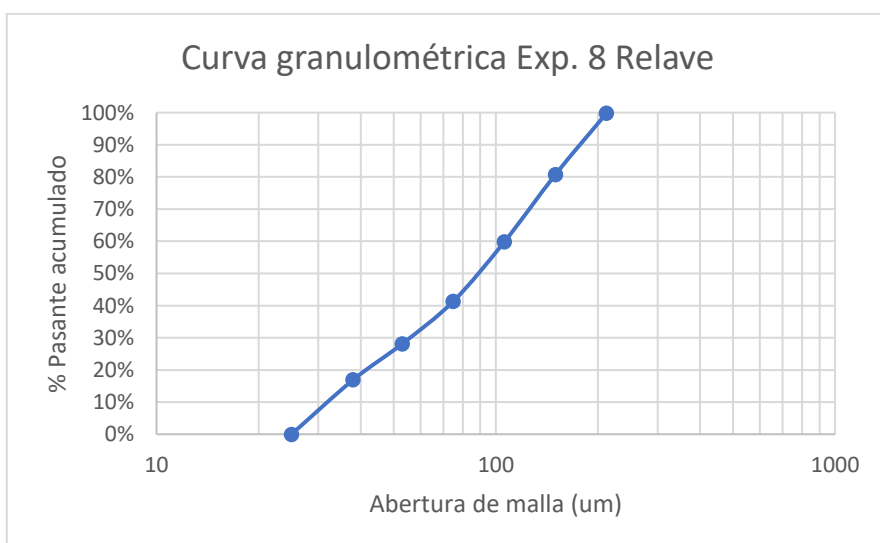


Figura 58: Curva granulométrica exp.8 Relave

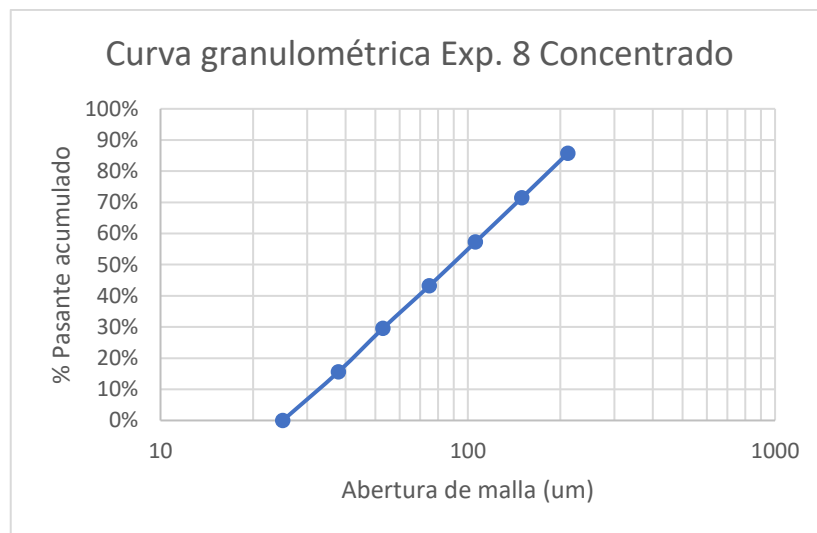


Figura 59: Curva granulométrica exp. 8 concentrado.