



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

**IMPACTO DE LA CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA EN ESTUDIOS DE
FLOTACIÓN DE LABORATORIO DE UN MINERAL SULFURADO DE
COBRE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FRANCISCO ALEJANDRO BELLO MORENO

PROFESOR GUÍA:

FERNANDO VALENZUELA LOZANO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GONZALO MONTES ATENAS

PATRICIO DIP SEGOVIA

SANTIAGO DE CHILE

2021

IMPACTO DE LA CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA EN ESTUDIOS DE FLOTACIÓN DE LABORATORIO DE UN MINERAL SULFURADO DE COBRE

El objetivo de este trabajo de memoria es estudiar el efecto que tiene la calidad química del agua y el tiempo de residencia del mineral en la eficiencia de la flotación de minerales sulfurados de cobre, para lo cual se consideran pruebas de flotación *batch* a escala de laboratorio en condiciones *rougher* de cuatro combinaciones de muestras de mineral y agua que han estado en contacto períodos de tiempo distintos. Así, se identifica un mineral de bajo tiempo de residencia y un mineral de alto tiempo de residencia, *M-BTR* y *M-ATR*, respectivamente. Respecto a las muestras de agua, éstas presentan una diferencia de fuerza iónica de 27%, por lo cual se identifican como agua de baja y alta fuerza iónica, *A-BFI* y *A-AFI*. En este trabajo la calidad química del agua es definida en base a seis propiedades: pH, E_h , conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales.

La eficiencia de las pruebas de flotación de cada combinación es estudiada a partir de análisis a la recuperación metalúrgica y leyes de cobre obtenidas en el concentrado, analizando principalmente gráficos de razón de enriquecimiento vs tiempo, recuperación en función del tiempo y ley, recuperación metalúrgica vs recuperación de agua y comparación de modelos cinéticos. Adicionalmente se evalúa de manera gráfica el efecto de las propiedades del agua en las leyes y recuperaciones, junto con un análisis de la evolución de cada tipo de agua posterior a la flotación.

Adicionalmente se realiza un procedimiento anexo en que se varía de manera cíclica la temperatura de tres tipos de agua, agua destilada, agua fresca y agua recuperada de procesos, estas dos últimas proporcionadas por la planta de procesamiento de la División Andina de Codelco. El objetivo de esta actividad es efectuar un seguimiento a la evolución de la calidad química del agua, en base a las seis propiedades mencionadas anteriormente, al estresar de manera constante cada solución aumentando y disminuyendo la temperatura. A partir de esto se busca identificar la existencia de una correlación entre el envejecimiento del agua por reutilización y por cambios de temperatura.

Se concluye que la eficiencia de la flotación, en términos de recuperación metalúrgica final, es mejor para la combinación *M-ATR* / *A-AFI* que para la combinación *M-BTR* / *A-BFI*, con recuperaciones de 87,41% y 86,42%, respectivamente. Por otro lado, se observa que la ley acumulada de cobre para *M-BTR* / *A-BFI* es de 5,67%, mientras que *M-ATR* / *A-AFI* presenta una ley de 3,65%. Sin embargo, al comparar las cuatro combinaciones planteadas, se destaca que la mayor eficiencia la presenta la combinación *M-BTR* / *A-AFI*, para la cual se obtiene una ley acumulada de 6,28% y una recuperación metalúrgica de 87,98%.

Respecto al estudio de variación de temperatura se concluye que, a pesar de observar similitudes en la evolución del pH y E_h para los tres tipos de agua, probablemente asociadas con la carbonación del fluido, no es posible identificar una relación entre envejecimiento por temperatura y por flotación, principalmente a causa de la considerable diferencia en carga iónica, haciendo que los valores de conductividad y sólidos totales del agua recuperada sean inalcanzables para el resto de muestras.

**ABSTRACT OF THE THESIS SUBMITTED TO
OBTAIN THE DEGREE OF: MINING ENGINEERING
BY: FRANCISCO BELLO MORENO
DATE: JUNE 2021
THESIS ADVISOR: FERNANDO VALENZUELA LOZANO**

IMPACT OF THE WATER CHEMICAL QUALITY ON LABORATORY FLOTATION STUDIES OF A SULPHIDE COPPER ORE

The aim of this thesis is to study the effect that the water chemical quality and the residence time of the ore have on the efficiency of the froth flotation of sulphide copper ores, for which batch flotation tests are considered on a laboratory scale. In rougher conditions of four combinations of ore and water samples that have been in contact for different periods of time. Thus, a low residence time ore and a high residence time ore, *M-BTR* and *M-ATR*, respectively, are identified. Regarding the water samples, these present a difference in ionic strength of 27%, for which they are identified as *A-BFI* and *A-AFI*. In this work, the water chemical quality is defined based on six properties: pH, E_h , electrical conductivity, turbidity, dissolved oxygen and total solids.

The efficiency of the flotation tests of each combination is studied from the analysis of copper grades and metallurgical recovery, analyzing graphics of enrichment ratio vs time, recovery vs time, recovery vs grade, metallurgical recovery vs water recovery and kinetic models comparison. Additionally, the effect of water properties on grades and recoveries is graphically evaluated, along with analysis of the evolution of each type of water after flotation.

Additionally, an extra procedure is carried out in which the temperature of three types of water, distilled water, fresh water and recovered water, is cyclically varied. The latter two water samples were provided by the processing plant of Codelco's División Andina. The objective of this activity is to monitor the evolution of the water chemical quality, based on the six properties mentioned above, by constantly stressing each solution by increasing and decreasing the temperature, and thereby identify the existence of a correlation between the aging of the water by reuse and by changes in temperature.

It is concluded that the flotation efficiency, in terms of final metallurgical recovery, is better for the *M-ATR* / *A-AFI* combination than for the *M-BTR* / *A-BFI* combination, with recoveries of 87.41% and 86.42%, respectively. On the other hand, it is observed that the cumulative copper grade for the *M-BTR* / *A-BFI* combination is 5.67%, while the *M-ATR* / *A-AFI* combination presents a grade of 3.65%. However, when comparing the four combinations proposed, it is highlighted that the highest efficiency is presented by the *M-BTR* / *A-AFI* combination, for which a cumulative grade of 6.28% and a metallurgical recovery of 87.98% are obtained.

Regarding the study of temperature variation, it is concluded that, despite observing similarities in the evolution of pH and E_h for the three types of water, probably associated with the carbonation of the fluid, it is not possible to identify a relationship between aging by temperature and by flotation, mainly due to the considerable difference in ionic charge, making the conductivity and total solids values of the recovered water unattainable for the rest of the samples

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia. A mis padres, Héctor y Eleticia, por brindarme su apoyo durante todos estos años de estudio, especialmente durante el año pasado. Agradecer por enseñarme a trabajar duro, a no rendirme ante la adversidad, ser perseverante y dar siempre lo mejor de mí. Gracias, junto a mi hermana Vanessa, por tenerme tanta paciencia, principalmente en esos duros finales de semestre.

Quiero agradecer a mis amigos del liceo, Seba, Yiye, Gato (Zagal), Osorio, Provoste y Gato (Muñoz) por seguir soportándome aun después de 14 años de amistad. Un abrazo especial a Pizarro y Memo, por ofrecerme la distracción que necesité el año pasado para no caer en la desesperación de la pandemia.

A Carolina, por la gran amistad que hemos formado desde esos lejanos tiempos de misa y santidad. Por siempre estar disponible para un escape de la rutina y salir a desahogarnos.

Saludar a la gente especial que conocí durante mis años de universidad. A mis amigos de plan común, Alexis, Benja, Cristian, Edrian, Erick, Javi, Jordi, Oveja, Landa, Mati Valdivia, Mati Flores, Nano, Viki, Camilo, Charlie, Jota y Nico, gracias por todos estos años.

A todos quienes conocí en la carrera y me ayudaron a lo largo de ésta, en especial a Nino Lotito y Sebastián Abbott. Y un abrazo especial a Carlos Yantén, gracias por todo el apoyo brindado desde el primer día, y gracias sobre todo por esos descansos del estudio, momentos que siempre atesoraré.

Quiero agradecer al Profesor Gonzalo Montes y al Profesor Fernando Valenzuela por darme la oportunidad de trabajar en el área que me fascina de la minería, por el conocimiento ofrecido para el desarrollo de la memoria, y especialmente por la ayuda en las distintas circunstancias que surgieron producto de la pandemia, como otorgarme las facilidades para entrar a los laboratorios o el traslado de equipos y materiales. Gracias al Profesor Gonzalo y a Gloria Jiménez por auxiliarme con mi situación académica y arancelaria.

Gracias a Fernando Lara, por ser un gran guía dentro del laboratorio, enseñarme la utilización de equipos, aconsejarme la mejor manera de desarrollar mi trabajo, y por la disponibilidad de ayudar en todo cuanto lo necesitara. Sin su experiencia no habría sido tan sencillo sacar adelante las pruebas.

Finalmente, agradecer a mis amigos de vida, compañeros de banda y hermanos de otra madre, Jaime, Jota y Mario. Gracias por permitir expresarme musicalmente. Gracias por esas noches de conversación, risas y parchís. Gracias por la hermandad que hemos creado. Gracias por todo el aguante de estos 14 años.

Tabla de Contenido

1. Capítulo I: Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Alcances.....	3
1.3. Estructura de la memoria	3
2. Capítulo II: Revisión crítica de la literatura	5
2.1. Flotación de minerales	5
2.1.1. Fundamentos generales.....	5
2.1.2. Eficiencia del proceso.....	7
2.1.3. Modelos cinéticos de flotación.....	9
2.2. Impacto de la calidad química del agua en flotación	11
2.2.1. Agua salina	12
2.2.2. Agua recirculada.....	13
2.3. Procesos y parámetros que definen la calidad del agua.....	15
2.3.1. Procesos	15
2.3.2. Parámetros	22
2.4. Conclusión de la revisión.....	32
3. Capítulo III: Metodología.....	33
3.1. Pruebas de flotación <i>batch</i>	33
3.1.1. Recepción de muestras y mediciones preliminares	33
3.1.2. Preparación de muestras, adición de reactivos y acondicionamiento.....	36
3.1.3. Flotación y muestreo de concentrado	38
3.1.4. Filtración, secado y almacenamiento de muestras.....	38
3.1.5. Análisis de datos.....	39
3.2. Pruebas de cambios cíclicos de temperatura.....	40
3.2.1. Recepción y preparación de muestras de agua	40
3.2.2. Variación de la temperatura.....	41
4. Capítulo IV: Resultados y discusión	43
4.1. Pruebas de flotación.....	43
4.1.1. Mediciones preliminares a muestras de agua	43

4.1.2.	Recuperación másica y de agua.....	45
4.1.3.	Ley de cobre y razón de enriquecimiento.....	50
4.1.4.	Recuperación metalúrgica	54
4.1.5.	Modelos cinéticos.....	60
4.1.6.	Fracción no flotable, de flotación lenta y flotación rápida.....	65
4.1.7.	Evolución del agua	67
4.1.8.	Efecto del tipo de agua en la eficiencia de la flotación	70
4.2.	Estudio de variación cíclica de temperatura	72
4.2.1.	Mediciones preliminares a muestras de agua	72
4.2.2.	Evolución de las propiedades	73
4.2.3.	Comparación de muestras sin cambios de temperatura.....	78
4.2.4.	Comparación de muestras con cambios de temperatura.....	80
5.	Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	82
5.1.	Conclusiones.....	82
5.2.	Recomendaciones	84
6.	Capítulo VI: Bibliografía.....	85
7.	Anexos.....	88
7.1.	Anexo A: Memoria de cálculo.....	88
7.2.	Anexo B: Propiedades de muestras de agua para flotación	91
7.3.	Anexo C: Masa total, de sólido y líquido, y ley de cobre por prueba.....	97
7.4.	Anexo D: Constantes del ajuste polinómico.....	99
7.5.	Anexo E: Masa de cal administrada en estudio de variación de temperatura.....	100
7.6.	Anexo F: Evolución de propiedades del estudio variación de temperatura.....	102
7.7.	Anexo G: Descripción de equipos	104

Índice de Figuras

Figura 2-1: Esquema de hidrofobicidad	5
Figura 2-2: Columna de flotación (Yianatos, 2005).....	6
Figura 2-3: Esquema de a) colectores y b) espumantes (Wills y Finch, 2015)	7
Figura 2-4: Gráfico de recuperación por arrastre de cuarzo en función de la recuperación de agua (Cp = 17,8%; Jg = 0,56 [cm/s]; pH = 10,5; colector = 30 [g/T]; velocidad impeler = 450 [RPM]) (Kracht et al., 2016).....	7
Figura 2-5: Esquema de balance de masas	8
Figura 2-6: Gráfico ley en función de la recuperación metalúrgica (Wills y Finch, 2015).....	8
Figura 2-7: Gráfico esquemático del procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963)	11
Figura 2-8: Gráficos de a) recuperación de calcopirita y pirita en función de la recuperación de agua y b) ley de Cu en el concentrado en función de la recuperación de calcopirita, usando agua de mar y agua fresca (Jg = 1 [cm/s]; pH = 8,5; MX-7017 = 60 [g/T]; TX15216 = 60 [g/T]; MIBC = 30 [g/T]; velocidad impeler = 700 [RPM] (Mu y Peng, 2019).....	12
Figura 2-9: Gráficos de recuperación de pirita en función de la recuperación de agua para distintas concentraciones de Cu ²⁺ usando a) agua fresca y b) agua de mar (Jg = 1 [cm/s]; pH = 8,5; MX-7017 = 60 [g/T]; TX15216 = 60 [g/T]; MIBC = 30 [g/T]; velocidad impeler = 700 [RPM] (Mu y Peng, 2019).....	12
Figura 2-10: Gráfico de recuperación de calcopirita y molibdenita en función del pH empleando agua de mar y agua fresca (Cp = 35%; Jg = 10 [L/min]; Matcol TC-123 = 22 [g/T]; Sascol-95 = 11 [g/T], Diesel = 10 [g/T]; Matfroth-355 10 [g/T]; velocidad impeler = 900 [RPM]) (Ramos et al., 2013).....	13
Figura 2-11: Gráficos de recuperación real de a) Cu, c) Zn y d) Py, y recuperación por arrastre de b) Cu, d) Zn y f) Py para aguas con distinta concentración de iones (Cp = 30%; Jg = 3 [L/min]; pH = 11,5; Cytec3418A = 30 [g/T]; MIBC = 15 [g/T]; velocidad impeler = 1200 [RPM]) (Biçak et al., 2012).....	14
Figura 2-12: Gráficos de a) recuperación de Cu en función de la ley de Cu, y b) recuperación de Cu en función de la recuperación de Py, para flotación en condiciones rougher (Liu et al., 1993)	15
Figura 2-13: Gráficos de concentración de Cu, S y Fe disueltos para a) calcopirita, b) enargita y c) tenantita después de una hora de oxidación mediante 0,013% H ₂ O ₂ a pH 2, 5 y 11 (Sasaki et al., 2010).....	16
Figura 2-14: Gráficos de ley de Cu en función de la recuperación de Cu para distintas concentraciones de a) bentonita y b) caolinita (Jg = 3 [L/min]; pH = 9; PAX = 30[g/T] (3 [min]) y 15 g[T] (2 [min]); DSF004 = 15[g/T] (3 [min]) y 8 [g/T] (2 [min]); velocidad impeler = 1000 [RPM]) (Wang et al., 2015).....	18
Figura 2-15: Representación esquemática de la capa doble y el potencial zeta (Pate y Safier, 2016)	19
Figura 2-16: Representación esquemática de la variación del potencial zeta con respecto al pH (Pate y Safier, 2016)	19
Figura 2-17: Gráficos de a) recuperación de calcopirita (E _h = 310 [mV]) y calcosina (E _h = 260 [mV]), con y sin bentonita, en función del tiempo (pH = 9; PAX = 100 [g/T], IF56 = 150 [g/T]; velocidad impeler = 500 [RPM]) y b) potencial zeta de calcopirita, calcosina y bentonita en función del pH (Peng y Zhao, 2011).....	20

Figura 2-18: Gráficos de a) recuperación de calcopirita ($E_h = 500$ [mV]) y calcosina ($E_h = -300$ [mV]), con y sin bentonita, en función del tiempo (pH = 9; PAX = 100 [g/T], IF56 = 150 [g/T]; velocidad impeler = 500 [RPM]) y b) potencial zeta de calcopirita, calcosina y bentonita en función del pH (Peng y Zhao, 2011).....	20
Figura 2-19: Gráficos de tasa de agregación de partículas con a) carga superficial positiva en función de la concentración de sales de cloruro, b) carga superficial positiva en función de la concentración de sales de sodio, c) carga superficial negativa en función de la concentración de sales de cloruro y d) carga superficial negativa en función de la concentración de sales de sodio (Oncsik et al., 2015)	22
Figura 2-20: Gráficos de a) recuperación de agua y de masa, b) recuperación de ganga por mecanismo de arrastre y real, y c) recuperación y ley de cobre en función de la fuerza iónica del agua ($C_p = 35\%$; $J_g = 7$ [L/min]; SIBX = 150 [g/T]; DOW200 = 40-50-60 [g/T]; Stypres 504 = 0-500 [g/T]; Depramin 267 = 0-500 [g/T]; velocidad impeler = 1200 [RPM]) (Corin y Wiese, 2014)	23
Figura 2-21: Gráficos de a) potencial zeta y b) viscosidad de la pulpa en función del pH ($C_p = 33\%$; $J_g = 7$ [L/min]; velocidad impeler = 500 [RPM]) (Farrokhpay y Zanin, 2012).....	24
Figura 2-22: Gráfico de la altura de espuma en función del pH y tipo de agua ($C_p = 35\%$; $J_g = 10$ [L/min]; Matcol TC-123 = 22 [g/T]; Sascol-95 = 11 [g/T], Diesel = 10 [g/T]; Matfroth-355 10 [g/T]; velocidad impeler = 900 [RPM]) (Ramos et al., 2013).....	25
Figura 2-23: Gráficos de a) recuperación de cobre y molibdeno (pH = 10-11) (Nagaraj et al., 1983) y b) ley de cobre y molibdeno en el concentrado (Sepalveda-Suarez y Castro, 1996) en función del potencial.....	26
Figura 2-24: Gráfico de recuperación de calcopirita en función del tiempo para distintos potenciales y pH de pulpa ($J_g = 3$ [L/min]; NaEX = 250 [g/T]) (Kalegowda et al., 2015)	27
Figura 2-25: Gráfico de espectro UV-Visible de la adsorción y desorción de xantato sobre calcopirita a diferentes potenciales de pulpa ($J_g = 3$ [L/min]; NaEX = 250 [g/T]) (Kalegowda et al., 2015).....	27
Figura 2-26: Variación de la solubilidad de oxígeno con respecto a la temperatura y salinidad del fluido.....	28
Figura 2-27: Gráficos de a) tasa de adsorción de xantato y c) potencial de pulpa para pirita (pH = 6), y b) tasa de adsorción de xantato y d) potencial de pulpa para pirita (pH = 9) (Kuopanportti et al., 1997).....	28
Figura 2-28: Gráficos de a) tasa de adsorción de xantato y c) potencial de pulpa para calcopirita (pH = 6), y b) tasa de adsorción de xantato y d) potencial de pulpa para calcopirita (pH = 11,5) (Kuopanportti et al., 1997)	29
Figura 2-29: Gráfico de recuperación de PGM's en función de la conductividad de distintos tipos de agua (SIBX = 8 [mL]; $CuSO_4 = 2,3$ [mL]; Sendep 30E = 1 [mL]; espumante = 1 [mL]) (Muzenda, 2010).....	30
Figura 2-30: Gráficos de recuperación de PGM's en función de los TDS de distintos tipos de agua (SIBX = 8 [mL]; $CuSO_4 = 2,3$ [mL]; Sendep 30E = 1 [mL]; espumante = 1 [mL]) (Muzenda, 2010)	31
Figura 3-1: Gráficos de concentración de especies principales en muestras de agua obtenidos a partir de análisis ICP.....	34
Figura 3-2: Fotografías de a) cortador giratorio, b) medidor de pH, c) conductivímetro, d) turbidímetro, e) sensor de oxígeno disuelto y f) balanza analítica	36

Figura 3-3: Celda de flotación EDEMET	37
Figura 3-4: Fotografía de configuración del sistema de filtrado de las muestras de concentrado	39
Figura 3-5: Fotografía de microcortador riffle giratorio	39
Figura 3-6: Fotografía de muestras de agua destilada, agua fresca y agua recuperada (de izquierda a derecha).....	41
Figura 3-7: Fotografía de a) Hotplate Stirrer y b) configuración de nitrógeno gaseoso	42
Figura 4-1: Evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad eléctrica, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales promedio en el tiempo a temperatura ambiente	43
Figura 4-2: Gráficos de recuperación másica del mineral a) M-BTR y b) M-ATR en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	45
Figura 4-3: Gráficos de recuperación másica de a) cada combinación y b) promedio en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	47
Figura 4-4: Gráficos de recuperación de agua de a) cada combinación y b) promedio en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM]).....	47
Figura 4-5: Gráfico de recuperación másica promedio en función de la recuperación de agua promedio ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	48
Figura 4-6: Gráfico de recuperación másica y recuperación de agua en función de la conductividad del agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	49
Figura 4-7: Gráficos de a) recuperación másica y b) recuperación de agua de las muestras escogidas en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	49
Figura 4-8: Gráfico de recuperación másica en función de la recuperación de agua de las muestras escogidas ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	50
Figura 4-9: Gráficos de ley parcial de cobre en concentrado del mineral a) M-BTR y b) M-ATR en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	50
Figura 4-10: Gráficos de a) ley acumulada del mineral M-BTR, b) ley acumulada del mineral M-ATR, c) razón de enriquecimiento del mineral M-BTR y d) razón de enriquecimiento del mineral M-ATR en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	52
Figura 4-11: Gráficos de ley acumulada en función de a) recuperación másica y b) recuperación de agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	52
Figura 4-12: Gráficos de razón de enriquecimiento en función de a) recuperación másica y b) recuperación de agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	53
Figura 4-13: Gráficos de recuperación metalúrgica de cobre en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; pH = 10,5; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	54

Figura 4-14: Gráficos de ley acumulada en función de la recuperación de cobre del mineral a) M-BTR y b) M-ATR ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	55
Figura 4-15: Gráficos de razón de enriquecimiento en función de la recuperación de cobre del mineral a) M-BTR y b) M-ATR ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	55
Figura 4-16: Gráficos del modelo AREV para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	57
Figura 4-17: Gráficos de recuperación calculada mediante modelo AREV en función de la recuperación experimental para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	58
Figura 4-18: Gráficos de recuperación metalúrgica en función de la recuperación de agua para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	59
Figura 4-19: Gráficos de recuperación modelada y recuperación experimental en función del tiempo para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	60
Figura 4-20: Gráficos de recuperación calculada mediante los modelos cinéticos en función de la recuperación experimental para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	61
Figura 4-21: Gráficos de mineral no recuperado en función del tiempo y curvas auxiliares para el procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963) de a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	66
Figura 4-22: Gráficos de comparación de las propiedades a) pH , b) E_h , c) conductividad, d) oxígeno disuelto y e) sólidos totales del agua antes y después de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	69
Figura 4-23: Gráficos de a) ley y b) recuperación metalúrgica en función de la conductividad del agua antes de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	71
Figura 4-24: Gráficos de a) ley y b) recuperación metalúrgica en función de los sólidos totales del agua antes de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])	71
Figura 4-25: Gráfico de pH del agua en función de la masa de cal añadida (Vaso C)	73
Figura 4-26: Gráficos de evolución de a) pH , b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua destilada, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11)	75

Figura 4-27: Gráficos de evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua fresca, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11).....	76
Figura 4-28: Gráficos de evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua recuperada, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11).....	78
Figura 4-29: Gráficos de comparación de la evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales para muestras sin cambios de temperatura (pH inicial de 11).....	79
Figura 4-30: Gráficos de comparación de la evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales para muestras con cambios de temperatura (pH inicial de 11).....	81
Figura 4-31: Diagrama de Pourbaix de muestras de agua con y sin variación de temperatura.....	81
Figura 7-1: Gráficos de evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales en función del tiempo para las muestras de agua A-BFI.....	93
Figura 7-2: Gráfico de evolución de a) pH, b) E _h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales en función del tiempo para las muestras de agua A-AFI.....	96
Figura 7-3: Fotografía de las soluciones buffer de calibración del medidor de pH.....	104
Figura 7-4:Fotografía de soluciones de calibración 0, 10 y 500 [FTU].....	105

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Modelos cinéticos de flotación batch (Dowling et al., 1985)	10
Tabla 2-2: Producto de actividad iónica para $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ basado en $[\text{Cu}^{2+}]$ disuelto y pH después de la oxidación de calcopirita, enargita y tenantita (Sasaki et al., 2010)	17
Tabla 2-3: Fuerza iónica I de las aguas preparadas (Corin y Wiese, 2014)	23
Tabla 2-4: Efecto de pH en estabilidad de la espuma (Farrokhpay y Zanin, 2012)	24
Tabla 2-5: Calidad química de las aguas empleadas en el estudio (Muzenda, 2010)	30
Tabla 2-6: Conductividad del agua pura en función de la temperatura y la concentración de NaCl (ASTM D1125-95(1999)).....	30
Tabla 3-1: Combinación de muestras a flotar.....	33
Tabla 3-2: Ley promedio de minerales de cobre durante año 2020	34
Tabla 3-3: Ley promedio de la ganga mineral durante el año 2020	34
Tabla 3-4: Dosificación de reactivos	37
Tabla 4-1: Valores promedio inicial y final de aguas A-BFI y A-AFI.....	44
Tabla 4-2: Recuperación másica de los concentrados	45
Tabla 4-3: Error relativo de la recuperación másica.....	46
Tabla 4-4: Recuperación de agua en los concentrados.....	47
Tabla 4-5: Valores de conductividad inicial de las muestras de agua	49
Tabla 4-6: Error relativo de las leyes parciales de cobre en concentrado	50
Tabla 4-7: Ley acumulada de cobre de las pruebas.....	51
Tabla 4-8: Razón de enriquecimiento de las pruebas	51
Tabla 4-9: Valores de recuperación metalúrgica.....	54
Tabla 4-10: Valor de parámetros de Modelo AREV	56
Tabla 4-11: Recuperación por flotación real y factor de arrastre de partículas hidrofóbicas.....	59
Tabla 4-12: Fracción de recuperación por arrastre de la recuperación total	59
Tabla 4-13: Valor del error relativo promedio para cada modelo de las combinaciones	62
Tabla 4-14: Valores de los parámetros pertenecientes a modelos cinéticos.....	62
Tabla 4-15: Valor del inverso de los parámetros λ del modelo Gamma y k del modelo Completamente Mezclado	65
Tabla 4-16: Fracción de mineral no flotable, de flotación lenta y flotación rápida	67
Tabla 4-17: Valor de constantes cinéticas de las porciones de flotación lenta y rápida.....	67
Tabla 4-18: Valores de las propiedades del agua pre y post flotación	67
Tabla 4-19: Aumento porcentual de las propiedades de las muestras de agua.....	68
Tabla 4-20: Valores originales de las muestras de agua para pruebas de cambio de temperatura	72
Tabla 4-21: Masa de cal y pH por tipo de agua.....	73
Tabla 7-1: Ecuaciones para determinación de constantes en splines cúbicos	90
Tabla 7-2: Concentración de especies disueltas en las muestras de agua obtenidas a partir de ICP	91
Tabla 7-3: Valores de las propiedades de las muestras de agua A-BFI	92
Tabla 7-4: Valores de las propiedades de las muestras de agua A-AFI	94
Tabla 7-5: Masa total de las muestras	97
Tabla 7-6: Masa de sólido de las muestras	97
Tabla 7-7: Masa de agua de las muestras	98
Tabla 7-8: Ley parcial de cobre de las muestras	98

Tabla 7-9: Constantes asociadas a variables de ajuste polinomial a recuperación metalúrgica....	99
Tabla 7-10: Constantes asociadas a variables de ajuste polinomial a ley	99
Tabla 7-11: Masa de cal vs pH de agua destilada (Vaso C)	100
Tabla 7-12: Masa de cal vs pH de agua fresca (Vaso C).....	100
Tabla 7-13: Masa de cal vs pH de agua recuperada (Vaso C).....	101
Tabla 7-14: Masa de cal añadida a Vaso C para mantener pH 11	101
Tabla 7-15: Evolución de agua destilada sin cambios de temperatura.....	102
Tabla 7-16: Evolución de agua destilada con cambios de temperatura.....	102
Tabla 7-17: Evolución de agua fresca sin cambios de temperatura	102
Tabla 7-18: Evolución de agua fresca con cambios de temperatura	103
Tabla 7-19: Evolución de agua recuperada sin cambios de temperatura	103
Tabla 7-20: Evolución de agua recuperada con cambios de temperatura	103
Tabla 7-21: Soluciones de calibración de conductímetro.....	105

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2-1: Balance de masas global	8
Ecuación 2-2: Balance de masas por especie	8
Ecuación 2-3: Recuperación metalúrgica de la especie i	8
Ecuación 2-4: Recuperación másica.....	9
Ecuación 2-5: Razón de enriquecimiento.....	9
Ecuación 2-6: Recuperación del valioso en función de la flotación real y por arrastre	9
Ecuación 2-7: Modelo AREV (Vera et al., 1999)	9
Ecuación 2-8: Oxidación de calcopirita.....	16
Ecuación 2-9: Definición del producto de solubilidad	16
Ecuación 2-10: Definición del índice de saturación.....	17
Ecuación 2-11: Definición de fuerza iónica	22
Ecuación 2-12: Definición de pH.....	23
Ecuación 2-13: Liberación de protón e ion bicarbonato.....	25
Ecuación 2-14: Disociación del ion bicarbonato.....	25
Ecuación 2-15: Reacción de la carbonación del agua	25
Ecuación 2-16: Cálculo de sólidos totales.....	32
Ecuación 7-1: Cálculo de volumen de agua	88
Ecuación 7-2: Cálculo de la masa de agua	88
Ecuación 7-3: Cálculo del porcentaje de sólidos en masa.....	88
Ecuación 7-4: Cálculo de masa de mineral en función de porcentaje de sólidos y volumen de pulpa	88
Ecuación 7-5: Cálculo de flujo de aire	88
Ecuación 7-6: Cálculo de la masa parcial de cobre en el concentrado i.....	89
Ecuación 7-7: Cálculo de la ley acumulada de metal.....	89
Ecuación 7-8: Cálculo de recuperación de agua.....	89
Ecuación 7-9: Cálculo de la raíz de la suma de diferencia cuadrática	89
Ecuación 7-10: Polinomio para splines cúbicos	90
Ecuación 7-11: Ecuación para ajuste polinomial	90

1. Capítulo I: Introducción

La flotación de minerales es un proceso de concentración en el cual se hace uso de las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas, fundamentalmente la hidrofobicidad de éstas, con el objetivo de separar de manera selectiva el mineral valioso de la ganga. En el caso de la flotación de sulfuros de cobre se pretende obtener un concentrado con un alto contenido de cobre, correspondiente al mineral valioso, y bajo contenido de ganga como sulfuros de hierro, principalmente pirita, o de silicatos, de tal forma de obtener un producto comercializable en el mercado.

De manera general, la flotación es un proceso trifásico, es decir que interactúan las tres fases, en donde la pulpa, compuesta por el mineral particulado fino proveniente de las etapas de conminución y el agua de procesos, se mantiene de forma homogénea al ser agitada dentro de un equipo denominado celda de flotación, en donde adicionalmente se inyecta aire para la formación de burbujas que ascienden a lo largo del equipo. La finalidad de este proceso es que el mineral valioso en agitación dentro del equipo colisione y se adhiera a las burbujas, formando un agregado burbuja-partícula que es transportado hasta una fase denominada zona de espuma, en la cual se concentra el agregado y, al rebalsar, es posteriormente retirado de la celda como concentrado.

Si bien existen minerales naturalmente hidrófobos, la mayoría requiere de reactivos que modifiquen la superficie de las partículas y otorguen tal propiedad. Dentro de los reactivos principales se encuentran los colectores que se encargan de alterar la superficie mineral y conceder la hidrofobicidad, los espumantes que tienen como objetivo prevenir la coalescencia de burbujas y promover la formación de una espuma estable, y los depresores o inhibidores que evitan que el mineral indeseado sea transportado al concentrado al adherirse a las burbujas de aire.

En la flotación de minerales existen varios parámetros condicionantes de que el proceso sea eficiente en términos de recuperación metalúrgica y ley del metal valioso en el concentrado. Estos factores pueden referirse a características de las celdas (forma, tamaño, modo de inyección de aire), dosificación de reactivos, la granulometría del mineral, el pH de la pulpa, la calidad química del agua, entre otros.

Actualmente el uso del agua es un tema de gran importancia en la industria producto del desarrollo sustentable que se busca implementar en la actividad minera. El uso de fuentes alternativas de agua, tales como agua de mar, que puede ser empleada directamente o con un proceso previo de desalinización, o bien el aumento de la recirculación de agua proveniente de etapas de espesamiento y filtración de concentrado, y/o espesamiento de relaves, son prácticas utilizadas por las plantas de procesamiento para sustituir el consumo de agua fresca en la flotación. En los últimos años se ha impulsado el uso de agua recirculada, en donde el año 2019 el consumo de esta fuente de agua fue de 53,32 [m³/s], equivalente al 76% del consumo total de agua en la industria minera. Adicionalmente, el consumo de esta agua aumentó en un 15% respecto al año 2018.

El aumento en el uso del agua recirculada puede tener diversas justificaciones, como económicas (comparación al invertir en una planta desalinizadora o una planta de tratamiento de relaves), justificaciones geográficas (imposibilidad de extraer agua de mar), o bien para reducir el impacto ambiental que conlleva la descarga de altos volúmenes de agua con presencia de contaminantes que se vierte al medioambiente. No obstante, la reutilización constante de agua tiene un efecto

importante en la eficiencia de la flotación, debido a que la calidad química del agua evoluciona con cada recirculación, es decir, el agua presenta un envejecimiento.

Uno de los aspectos fundamentales que definen la calidad química es la fuerza iónica del agua, la concentración de iones que se encuentran disueltos en el fluido. Generalmente se ha visto que cuando la fuerza iónica del agua aumenta, la recuperación de agua es mayor, lo cual tiene un impacto negativo en la eficiencia de la flotación puesto que la recuperación de agua se relaciona de manera directa con la recuperación de ganga mineral por arrastre. No obstante, también puede presentar efectos positivos, como un aumento en la recuperación metalúrgica del valioso causado por activación de partículas de flotación lenta causado por ciertos iones en solución.

Otro parámetro importante a mencionar es la presencia de partículas finas que se encuentran en suspensión en el agua, las cuales, dependiendo de las condiciones de pH y E_h (potencial de oxidación), pueden formar una capa en la superficie del mineral impidiendo la adsorción de los colectores y en consecuencia que el mineral de interés adquiera las propiedades hidrofóbicas necesarias para su recuperación, proceso denominado *slime coating*.

Por estas razones, al entrar en contacto el agua con el mineral para la formación de la pulpa, la calidad química del fluido supone una variación, por lo cual su composición y propiedades son distintas al agua fresca u original. Luego, es fundamental realizar un seguimiento de la evolución del agua puesto que puede presentarse uno de los problemas descritos previamente. En este trabajo de memoria se busca estudiar el impacto que tiene el envejecimiento del agua en términos de sus propiedades químicas en el proceso de la flotación de minerales sulfurados de cobre. Para esto se consideran dos actividades: la actividad principal consta de pruebas de flotación *batch* a escala de laboratorio, en las cuales se ejecutan flotaciones con combinaciones de muestras de mineral y agua con tiempos de contacto distintos; y una actividad auxiliar en que se varía la temperatura del agua de manera cíclica, de tal manera de observar propiedades similares a las que presenta el agua de procesos.

De este estudio se espera que las pruebas de flotación en que se emplean las muestras de mineral y agua con menos tiempo de contacto presenten una eficiencia mayor, en términos de ley y recuperación metalúrgica de cobre, que las pruebas de flotación en que se emplean las muestras con mayor tiempo de contacto. Luego, se plantea la siguiente hipótesis: al aumentar el tiempo de contacto entre mineral y agua, menor es la eficiencia obtenida en la etapa de flotación.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del envejecimiento del mineral y calidad química del agua en la eficiencia del proceso mediante estudios de flotación *batch* a escala de laboratorio de un mineral sulfurado de cobre en condiciones *rougher* para combinaciones de mineral y agua con distintos tiempos de contacto, determinar la combinación que presenta mejor eficiencia y conectar análisis con propiedades del agua.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar resultados de ley y recuperación metalúrgica de cobre, y relacionar la evolución de ambos tipos de agua en función de seis propiedades (pH, E_h , conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales) con la eficiencia del proceso.
- Evaluar diferentes modelos cinéticos de flotación e identificar cual representa mejor los resultados experimentales.
- Evaluar a escala de laboratorio variaciones cíclicas de la temperatura de tres muestras de agua (agua destilada, agua fresca y agua recuperada de procesos) y dosificación de reactivos alcalinizados sobre las propiedades previamente indicadas.
- Determinar relación entre el envejecimiento del agua por variaciones cíclicas de temperatura con un cambio en la calidad química posterior a la flotación del mineral.

1.2. Alcances

- 1) En esta memoria se estudia el efecto en la eficiencia de la flotación *batch* a escala de laboratorio empleando las muestras de mineral y agua mencionadas. Para esto se hace uso de una celda de flotación EDEMET CFL-E 2.0 de 2.7 [L].
- 2) Las condiciones operacionales con las que se ejecutan las pruebas corresponden a las utilizadas por la empresa proveedora de las muestras, razón por la cual en este trabajo no se analiza el efecto que pueda tener cambios en el pH de la pulpa, porcentaje de sólidos, profundidad de espuma, flujo de aire, dosificación de reactivos, entre otros.
- 3) El estudio de la eficiencia del proceso se hace en base al análisis del contenido de cobre en el concentrado, despreciando la recuperación de otros metales como molibdeno o hierro.
- 4) Debido a la escasez de pruebas y consecuente falta de duplicados de éstas, no se realiza reconciliación de datos.
- 5) Para el análisis de la evolución del agua se consideran los parámetros mencionados en los objetivos. No se consideran estudios para conocer la composición del agua post flotación para determinar iones disueltos, residuos de reactivos, etc.

1.3. Estructura de la memoria

En el Capítulo II se entrega una revisión bibliográfica referente a la flotación de minerales y la influencia que tiene la calidad química del agua en la eficiencia del proceso, dando ejemplos de investigaciones desarrolladas empleando agua de mar y agua recirculada. Se especifican distintos estudios sobre los procesos y parámetros que definen la calidad química del agua y como cada uno repercute en la eficiencia de la flotación de sulfuros.

En el Capítulo III se detalla la metodología del trabajo realizado en laboratorio. Se entrega información sobre los tipos de agua y el mineral utilizado, tanto en las pruebas de flotación como en el estudio de variación de la temperatura. Se señala el protocolo empleado para la flotación, considerando las mediciones previas al agua, la preparación de la pulpa, adición de reactivos y acondicionamiento de la pulpa, tiempo de flotación del mineral y recolección de muestras, filtración y secado del concentrado y cola, balances de masa, y mediciones del agua recuperada

post flotación. Se presenta además el procedimiento para el experimento con variación cíclica de la temperatura, incluyendo la preparación del agua, el procedimiento para el aumento y disminución de la temperatura y las mediciones realizadas.

En el Capítulo IV se señalan los resultados obtenidos en ambos experimentos, en donde se presentan gráficos tales como recuperación vs ley o de modelos cinéticos para las pruebas de flotación, o de evolución de las propiedades del agua en función del tiempo para las pruebas de variación de la temperatura. Se entrega además una discusión y análisis de estos resultados.

En el Capítulo V se concluye lo obtenido en el trabajo y los análisis previamente realizados, haciendo énfasis en el cumplimiento de los objetivos. Se verifica la hipótesis planteada anteriormente y se entregan recomendaciones para futuros trabajos que se pretendan continuar en esta área, tales como variación de parámetros operacionales no estudiados en esta memoria.

2. Capítulo II: Revisión crítica de la literatura

2.1. Flotación de minerales

2.1.1. Fundamentos generales

Entre los procesos de concentración de minerales se encuentra la etapa de flotación, la cual corresponde a un proceso fisicoquímico de superficie en que existe una interacción trifásica entre la pulpa agitada, compuesta por el mineral proveniente de los circuitos de conminución con el agua de procesos, y las burbujas de aire inyectadas al sistema a las cuales se adhieren las partículas en movimiento. El objetivo de este proceso es separar de manera selectiva las especies de valor económico, el mineral valioso, de la ganga mineral que no contiene valor económico, obteniendo como producto un concentrado con las leyes de mineral y de ganga requeridas para su comercialización o traspaso a etapas posteriores de extracción metalúrgica.

La flotación se basa en las propiedades hidrofóbicas de las superficies minerales, es decir la afinidad que las partículas presentan con el agua al entrar en contacto entre ambas fases. Si bien la hidrofobicidad de los minerales puede ocurrir de manera natural, generalmente se requiere suministrar agentes reactivos que modifican la química de la pulpa, principalmente la superficie de las partículas, otorgando la propiedad requerida de acuerdo a si se pretende que éstas tengan repulsión con el agua (hidrofóbicas) o bien presenten afinidad con el fluido (hidrofílicas) (Figura 2-1).

En este ambiente acuoso con presencia de burbujas de aire, los minerales con superficies hidrofóbicas (correspondiente al mineral valioso en el caso de la minería del cobre) al estar en movimiento por la agitación de la pulpa, colisionan con las burbujas de aire y tienden a adherirse a éstas, de tal modo de minimizar el contacto con el agua, con lo cual se forma un agregado partícula-burbuja. Luego, debido a diferencias de densidad entre el agregado y la pulpa, éste asciende hacia una fase de espuma, donde posteriormente rebalsa del equipo y se retira, constituyendo uno de los dos productos de este proceso, el concentrado enriquecido en el metal valioso. Por el contrario, aquellos minerales con superficies hidrofílicas (correspondiente a la ganga en la minería del cobre) tienden a maximizar el contacto con el agua por lo cual no se adhieren a las burbujas, formando el relave que corresponde al segundo producto obtenido en esta etapa. Este mecanismo es conocido como flotación verdadera o real.

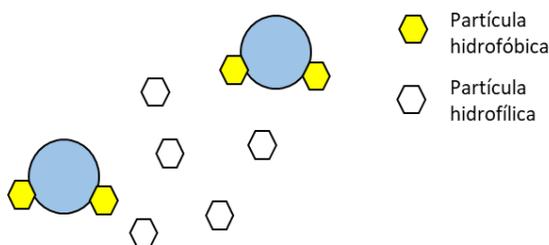


Figura 2-1: Esquema de hidrofobicidad

El proceso es realizado en un equipo denominado celda de flotación, en el cual es posible identificar dos zonas, una de colección y otra de espuma o limpieza. En la zona de colección ocurre la colisión entre partículas y burbujas, la adhesión selectiva del mineral hidrófobo, la formación del agregado partícula-burbuja y la ascensión del agregado a la fase de espuma. En la zona de espuma se

recolecta el agregado que ha logrado ascender, y que es retirado de la celda obteniéndose el concentrado. En la Figura 2-2 se presenta un esquema de la flotación de minerales con ambas zonas mencionadas.

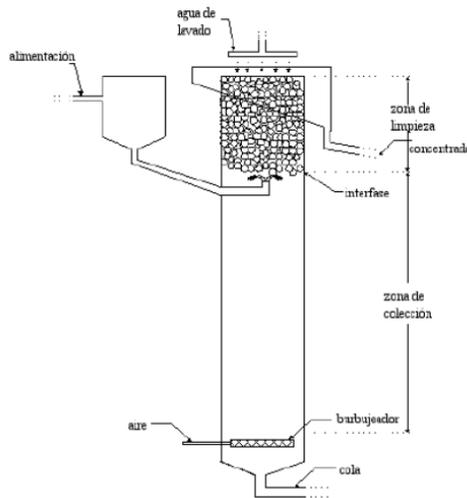


Figura 2-2: Columna de flotación (Yianatos, 2005)

Se ha mencionado que generalmente es necesario modificar la química de la pulpa para que el proceso ocurra de buena manera. Para esto se añaden distintos agentes reactivos que tienen como objetivo principal modificar la superficie de las especies que interaccionan en el proceso, entre los cuales es posible encontrar colectores, modificadores y espumantes, siendo estos tres tipos los más comunes empleados en el proceso.

Los colectores son compuestos orgánicos que modifican la superficie del mineral valioso al adsorberse en éste, otorgando las propiedades hidrofóbicas para la adhesión a las burbujas. Estos reactivos están conformados por una parte apolar que corresponde a una cadena de hidrocarburos, y una parte polar. La parte polar del compuesto es la que se adsorbe a la superficie del mineral, mientras que la parte apolar queda orientada hacia el fluido, otorgando la hidrofobicidad requerida (Figura 2-3.a)

Los modificadores se encargan de controlar la eficiencia del proceso, en donde es posible encontrar distintos tipos, como controladores de pH de la pulpa, activadores o depresores de especies indeseadas que se adhieren a las burbujas, y dispersantes de partículas aglomeradas.

Por otro lado, los espumantes tienen como objetivo evitar la coalescencia de burbujas, promoviendo la formación de burbujas más pequeñas que permite una mayor tasa de colisión con las partículas, disminuir la velocidad de ascenso para proveer un mayor tiempo de residencia de las burbujas en la pulpa, y la obtención de una espuma estable. El hecho de proporcionar una mayor tasa de colisión y tiempo de residencia permite que la cinética de flotación aumente, mientras que obtener una espuma estable posibilita que las burbujas no se rompan en la fase de espuma, haciendo que las partículas hidrófobas que conforman el agregado no sean devueltas a la zona de colección y permitiendo su recuperación. De manera similar a los colectores, los espumantes están formados por una parte polar, que en este caso se encuentra orientada hacia el fluido, y una parte polar (cadena de hidrocarburos) orientada hacia la burbuja de aire (Figura 2-3.b).

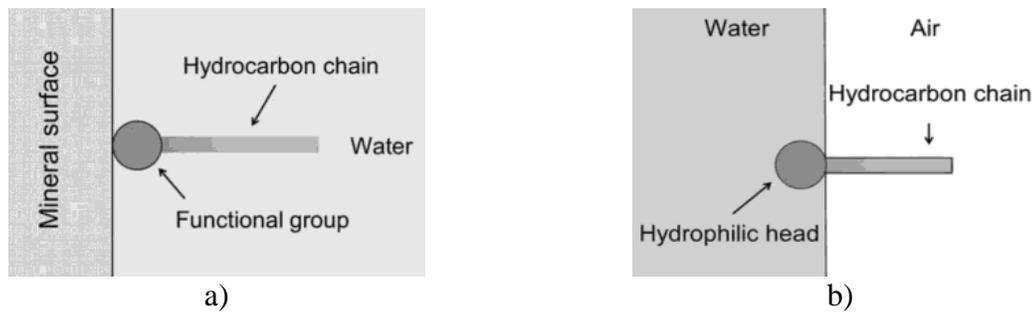


Figura 2-3: Esquema de a) colectores y b) espumantes (Wills y Finch, 2015)

Es posible identificar tres mecanismos que rigen la recuperación de mineral desde la zona de colección hasta la espuma: la flotación verdadera mencionada previamente, que se relaciona con la adhesión selectiva de las partículas hidrófobas a las burbujas de aire; el arrastre de mineral en el agua que llega hasta la espuma; y el atrapamiento de mineral entre partículas adheridas a las burbujas (Wills y Finch, 2015). Estos dos últimos mecanismos no son selectivos, lo que quiere decir que, a diferencia de la flotación verdadera, tanto el mineral valioso como la ganga mineral pueden ser recuperados en el concentrado, lo cual tiene un efecto negativo en la selectividad del proceso, y por consiguiente disminuye la calidad del concentrado (Kracht et al., 2016).

Con respecto a la flotación por arrastre, la recuperación de ganga mediante este mecanismo suele estar asociada de manera directa con la recuperación de agua, que corresponde a la razón de la masa de agua reportada en el concentrado con la masa de agua alimentada al sistema, la cual a su vez se relaciona con la estabilidad de la espuma. Kracht et al. (2016) estudia esta relación al realizar pruebas con distintos tipos de espumantes, obteniendo los resultados presentados en la Figura 2-4, en donde es posible apreciar que, independiente del reactivo, al aumentar la recuperación de agua mayor es el arrastre de partículas en el concentrado.

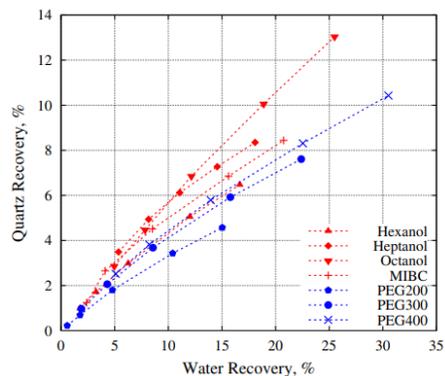


Figura 2-4: Gráfico de recuperación por arrastre de cuarzo en función de la recuperación de agua ($C_p = 17,8\%$; $J_g = 0,56$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 30 [g/T]; velocidad impeler = 450 [RPM]) (Kracht et al., 2016)

2.1.2. Eficiencia del proceso

Suponiendo que los equipos de flotación son un sistema cerrado que se encuentra en estado estacionario, entonces se cumple la ley de conservación de masa, por lo cual la suma de la masa de los flujos de entrada, es decir la alimentación, debe ser igual a la suma de los flujos de salida, concentrado y relave. Esto se cumple tanto a nivel global como por especie. En la Figura 2-5 se

aprecia un esquema con la entrada y salida de flujos al sistema, en donde F , C y T corresponden a la masa de los flujos de alimentación, concentrado y relave, respectivamente, y f_i , c_i y t_i son el contenido porcentual de la especie i en la alimentación, concentrado y relave, respectivamente.

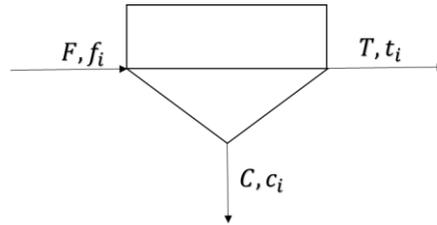


Figura 2-5: Esquema de balance de masas

El balance de masa global se puede determinar a partir de la Ecuación 2-1. De la misma forma, es posible determinar la masa de cada especie mineral en el sistema, para lo cual se plantea la Ecuación 2-2.

$$F = C + T \quad (2.1)$$

Ecuación 2-1: Balance de masas global

$$F \times f_i = C \times c_i + T \times t_i \quad (2.2)$$

Ecuación 2-2: Balance de masas por especie

A partir de esto, es posible definir la eficiencia de la flotación de minerales en base a dos términos fundamentales, la ley y la recuperación metalúrgica del metal valioso en el concentrado. La ley de un metal corresponde al contenido o fracción de éste en un determinado flujo (f_i , c_i y t_i en el esquema mostrado), mientras que la recuperación metalúrgica es la fracción del metal total contenido en la alimentación que se obtiene en el concentrado (Wills y Finch, 2015). La recuperación R_i entonces queda definida como:

$$R_i = \frac{C \times c_i}{F \times f_i} \quad (2.3)$$

Ecuación 2-3: Recuperación metalúrgica de la especie i

Estas dos medidas se relacionan de manera inversa, es decir que a mayor recuperación se tiene una menor ley del metal de interés, y viceversa. Esto se produce puesto que al recuperar mayor mineral conteniendo el metal, también se recupera ganga asociada al mineral. En la Figura 2-6 se muestra un gráfico con lo indicado previamente, en donde al aumentar la recuperación metalúrgica de cobre (calcopirita) disminuye la ley de éste.

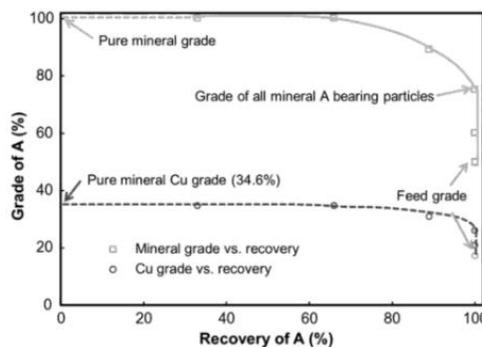


Figura 2-6: Gráfico ley en función de la recuperación metalúrgica (Wills y Finch, 2015)

También se definen otros parámetros para estudiar la eficiencia del proceso, tales como la recuperación másica, que corresponde a la razón entre la masa total de concentrado y la masa total de alimentación, y la razón de enriquecimiento, que es la razón entre la ley de la especie en el concentrado y la ley de la especie en la alimentación.

$$Y = \frac{C}{F} \quad (2.4)$$

Ecuación 2-4: Recuperación másica

$$\gamma = \frac{c_i}{f_i} \quad (2.5)$$

Ecuación 2-5: Razón de enriquecimiento

Otra relación que permite estudiar la eficiencia del proceso es la recuperación metalúrgica con respecto a la recuperación de agua en el concentrado. Se ha mencionado que mediante el mecanismo de arrastre es posible recuperar tanto partículas del mineral valioso como de ganga, además de que este mecanismo se relaciona de manera directa con la recuperación de agua. Smith et al. (1989) indica que la recuperación de especies hidrofóbicas se compone de una recuperación asociada con la flotación real o verdadera, independiente de la recuperación de agua, y una recuperación asociada al arrastre de mineral, que aumenta con un incremento de agua en el concentrado. Al analizar la curva de un gráfico de recuperación metalúrgica en función de la recuperación de agua, es posible definir la siguiente relación:

$$R_v = F_v + e_v R_w \quad (2.6)$$

Ecuación 2-6: Recuperación del valioso en función de la flotación real y por arrastre

En donde F_v es el intercepto de la curva extrapolada con el eje de la recuperación metalúrgica, e_v es un factor de arrastre para el mineral valioso, y R_w corresponde a la recuperación de agua. A partir de esto se logra identificar la recuperación asociada a la flotación real del mineral hidrófobo representada por F_v , y la porción asociada a la recuperación por arrastre con $e_v R_w$.

Finalmente, Vera et al. (1999) desarrolla un modelo (AREV) en el cual se compara la recuperación metalúrgica con la razón de enriquecimiento γ . Para esto considera tres parámetros, R^* , a y b . El parámetro R^* corresponde a la recuperación global cuando γ tiende a 1 (ley en concentrado es igual a la ley en la alimentación), b es la tasa a la cual las partículas flotables más rápidas se contaminan con otras partículas presentes en el mineral, y a es la flexibilidad de la curva. En la Ecuación 2-7 se presenta el modelo descrito.

$$R = R^* - a \times \sinh[b(\gamma - 1)] \quad (2.7)$$

Ecuación 2-7: Modelo AREV (Vera et al., 1999)

2.1.3. Modelos cinéticos de flotación

Considerando que la formación del agregado partícula-burbuja se puede plantear como una reacción química, en la cual los reactivos corresponden a las partículas hidrofóbicas y a las burbujas de aire, y el agregado es el producto del proceso, es posible definir una cinética o velocidad de reacción. Varios autores han utilizado esta aproximación para definir distintos modelos que permiten ajustar la recuperación metalúrgica experimental en función del tiempo, basándose en distintas distribuciones de la constante cinética y cantidad de parámetros. En la reseña presentada

por Dowling et al. (1985) se muestra una variedad de modelos de distinto orden y distribución de la constante cinética, de los cuales se indican algunos en la Tabla 2-1 con su respectiva ecuación matemática y descripción de los parámetros que los definen.

Tabla 2-1: Modelos cinéticos de flotación batch (Dowling et al., 1985)

Modelo	Ecuación	Parámetros
Modelo Clásico (García-Zúñiga, 1935)	$R = R_{\infty}(1 - e^{-kt})$	R_{∞} : Máxima recuperación posible del metal. k : constante cinética de la flotación [min^{-1}].
Modelo de Klimpel (Klimpel, 1980)	$R = R_{\infty} \left(1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right)$	R_{∞} : Recuperación de equilibrio para largos tiempos de flotación k : constante cinética de la flotación [min^{-1}].
Modelo de Kelsall (Kelsall, 1961)	$R = (1 - \phi)(1 - e^{-k_f t}) + \phi(1 - e^{-k_s t})$	ϕ : porción de minerales con constante cinética lenta. k_f : constante cinética rápida [min^{-1}] k_s : constante cinética lenta [min^{-1}].
Modelo de Kelsall Modificado (Jowett, 1974)	$R = (R_{\infty} - \phi)(1 - e^{-k_f t}) + \phi(1 - e^{-k_s t})$	R_{∞} : Máxima recuperación posible del metal. ϕ : porción de minerales con constante cinética lenta. k_f : constante cinética rápida [min^{-1}] k_s : constante cinética lenta [min^{-1}].
Modelo Gamma (Huber-Panu et al., 1976)	$R = R_{\infty} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + t} \right)^P \right]$	R_{∞} : Máxima recuperación posible del metal. λ : constante cinética [min]. P : exponente.
Modelo Completamente Mezclado (Imaizumi et al., 1965)	$R = R_{\infty} \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{t}{k}} \right) \right]$	R_{∞} : Máxima recuperación posible del metal. k : constante cinética de la flotación [min].

Otra manera de modelar la cinética del proceso es considerando materiales con distintas velocidades de flotación mediante la metodología planteada por Imaizumi e Inoue (1963), a partir de la cual es posible determinar la fracción de mineral no flotable, de flotación lenta y de flotación rápida, junto con sus respectivas constantes cinéticas. Para esto se utiliza el gráfico de mineral no recuperado (1-R) en función del tiempo, en donde se trazan curvas auxiliares tangentes a la curva principal. En la Figura 2-7 se presenta un esquema del método planteado. En primer lugar, se extrapola una recta tangente (2) desde el extremo derecho de la curva principal (1), cuya intersección con el eje de las ordenadas representa la fracción de mineral no flotable, mientras que la pendiente corresponde a la constante cinética del mineral con flotación lenta. Luego, se extrapola una nueva recta (4) tangente a una curva auxiliar (3) resultante de la resta entre la recta anterior (2) y la curva principal (1). De igual manera, la intersección de la recta (4) menos la intersección de la recta (2) representa la fracción de mineral con flotación lenta, y la pendiente de la recta (4) equivale

a la constante cinética del mineral con flotación rápida. Finalmente, el porcentaje de este último material corresponde a 1 menos la intersección de la recta (4).

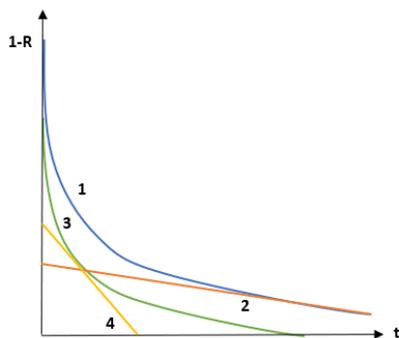


Figura 2-7: Gráfico esquemático del procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963)

En consecuencia de las distintas medidas mencionadas que permiten definir la eficiencia de la flotación, se debe notar que ésta depende de variables químicas (tipo de reactivos, dosificación, adsorción de reactivos para otorgar la hidrofobicidad al mineral o controlar el tamaño de burbuja), variables físicas (tamaño de partícula, grado de liberación del mineral), y factores relacionados con el equipo (flujo de aire, velocidad de rotación, etc.), lo cual se ve reflejado en los diversos mecanismos que gobiernan el proceso tanto en las zonas de colección como de espuma: colisión, adhesión, ascenso del agregado, retiro de la fase espuma al concentrado y retorno del mineral desde la espuma a la pulpa (Yianatos, 2005; Wills y Finch, 2015). Luego, la eficiencia general de la flotación se encuentra gobernada por la recuperación de partículas tanto en la pulpa como en la espuma (Wang y Peng, 2014).

2.2. Impacto de la calidad química del agua en flotación

Además de las distintas variables químicas y físicas mencionadas previamente, se han realizado investigaciones que demuestran que la calidad química del agua empleada también es un factor determinante en la eficiencia de la flotación (Boujounoui et al., 2018; Farrokhpay y Zanin, 2012; Mu y Peng, 2019; Muzenda, 2010; Liu et al., 1993; Ramos et al., 2013), lo cual puede presentar tanto efectos positivos como negativos en el sistema. Los principales factores que afectan la calidad química del agua se agrupan en dos clases, factores internos y factores externos, tales como el mineral procesado, el conjunto de reactivos, reutilización de agua y la fuente de la que proviene (Liu et al., 2013).

A medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y las demandas de la sociedad para reducir la extracción de agua fresca se han incrementado, las faenas mineras han aumentado la reutilización del agua y el acceso a múltiples fuentes en las etapas de procesamiento de minerales para ahorrar agua fresca (Liu et al., 2013). Es así entonces que se han desarrollado principalmente tres prácticas en la industria: uso de agua salina, agua desalada y agua recirculada de procesos.

A continuación, se entregan casos de estudio sobre el impacto que tiene la calidad química del agua en la eficiencia de la flotación de minerales, principalmente de sulfuros de cobre.

2.2.1. Agua salina

El agua de mar, a diferencia del agua fresca, presenta una alta concentración de electrolitos inorgánicos que incluye iones primarios tales como Na^+ y Cl^- , e iones secundarios como Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} , etc. (Kester et al., 1967). Este hecho puede tener repercusiones tanto positivas como negativas en la flotación de sulfuros de cobre.

Mu y Peng (2019) estudian el comportamiento de la flotación a escala de laboratorio de un mineral de calcopirita con pirita utilizando agua de mar, cuyos principales resultados se muestran en la Figura 2-8 y Figura 2-9. A partir de esto, concluyen que la recuperación de pirita aumenta considerablemente al emplear agua de mar, en comparación con agua fresca, debido a la activación por cobre en la superficie de la pirita. Esto se debe a que el agua de mar presenta una alta conductividad (alta concentración de iones), lo que promueve la oxidación y disolución de la calcopirita, generando una mayor concentración de iones cobre disueltos para la activación. Por otro lado, el bajo valor del potencial de oxidación E_h producto de una baja concentración de oxígeno disuelto facilita el proceso de activación.

Ramos et al. (2013) estudia la eficiencia de la flotación de minerales de calcopirita y molibdenita empleando agua de mar y agua fresca, por separado. La conclusión principal de este estudio es que, si bien la recuperación de calcopirita se ve ligeramente disminuida al usar agua de mar, la recuperación de molibdenita disminuye considerablemente, más aún cuando se trabaja a valores de pH sobre 9,5 correspondiente al rango empleado industrialmente para deprimir la pirita (Figura 2-10). La razón de esto radica en que en el agua de mar se encuentran iones Mg^{2+} disueltos. Luego, en un ambiente alcalino, se dan las condiciones para que este ion precipite como hidróxido de magnesio, adsorbiéndose en la superficie de la molibdenita y generando la depresión del mineral.

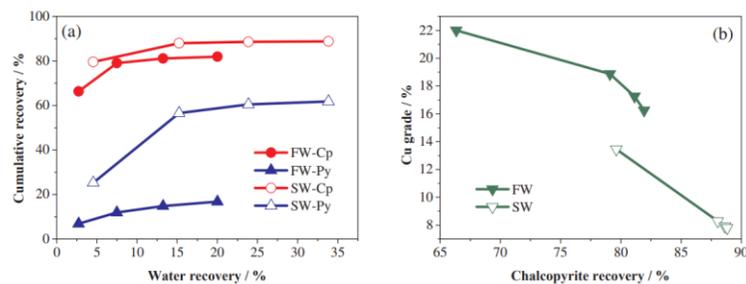


Figura 2-8: Gráficos de a) recuperación de calcopirita y pirita en función de la recuperación de agua y b) ley de Cu en el concentrado en función de la recuperación de calcopirita, usando agua de mar y agua fresca ($J_g = 1$ [cm/s]; pH = 8,5; MX-7017 = 60 [g/T]; TX15216 = 60 [g/T]; MIBC = 30 [g/T]; velocidad impeler = 700 [RPM] (Mu y Peng, 2019)

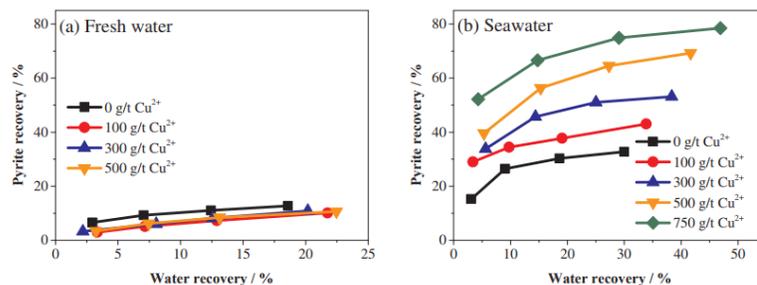


Figura 2-9: Gráficos de recuperación de pirita en función de la recuperación de agua para distintas concentraciones de Cu^{2+} usando a) agua fresca y b) agua de mar ($J_g = 1$ [cm/s]; pH = 8,5; MX-7017 = 60 [g/T]; TX15216 = 60 [g/T]; MIBC = 30 [g/T]; velocidad impeler = 700 [RPM] (Mu y Peng, 2019)

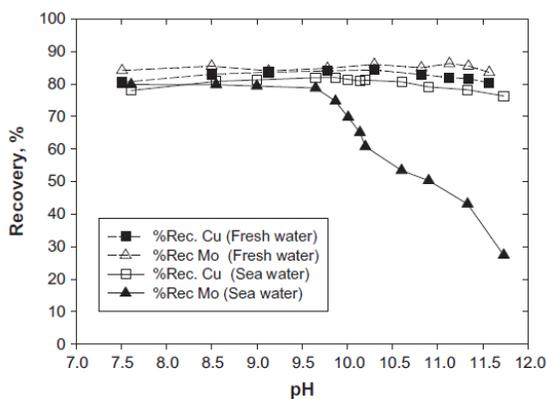


Figura 2-10: Gráfico de recuperación de calcopirita y molibdenita en función del pH empleando agua de mar y agua fresca ($C_p = 35\%$; $J_g = 10$ [L/min]; Matcol TC-123 = 22 [g/T]; Sascol-95 = 11 [g/T]; Diesel = 10 [g/T]; Matfroth-355 10 [g/T]; velocidad impeler = 900 [RPM]) (Ramos et al., 2013)

2.2.2. Agua recirculada

Análogamente al agua de mar, el agua recirculada posee una composición diferente a la del agua fresca, ya que contiene contaminantes provenientes de otros procesos, tales como materiales coloidales (silicatos, arcillas, hidróxidos de metal precipitados, etc.), iones de metales base, tiosales, sulfuros, sulfitos, sulfatos, cloruros, magnesio, calcio, sodio y potasio, y también residuos de reactivos como espumantes, colectores y depresantes (Biçak et al., 2012). Cabe destacar que con el paso del tiempo el agua se encuentra cada vez más contaminada, tanto por la constante oxidación/disolución de los minerales como por la adición recurrente de reactivos. Estos compuestos, al igual que los iones en el agua de mar, pueden presentar o bien repercusiones positivas o bien negativas en el sistema.

Boujounoui et al. (2018) estudia el impacto y la interacción de distintos componentes (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , y PAX) en la recuperación de galena y la selectividad con respecto a calcopirita, esfalerita y pirrotina, a modo de simular el uso de agua proveniente de relaves de la operación *Complex Draa Sfar Sulphide Ore*. La conclusión principal que se obtiene es la factibilidad del reemplazo de agua fresca por agua de relaves para la flotación de galena. En particular, los resultados muestran que para altas concentraciones de Zn^{2+} , Cu^{2+} y SO_4^{2-} , y bajas concentraciones de PAX, Ca^{2+} y Mg^{2+} , es posible asegurar una buena flotabilidad de la galena.

Biçak et al. (2012) realiza pruebas de flotación en laboratorio para un mineral sulfurado de Cu-Zn empleando simulaciones de agua recirculada. Se explica que la acumulación de iones SO_4^{2-} y $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ varían la estabilidad de la espuma y la química de la superficie de los minerales sulfurados, hecho que aumenta la recuperación tanto real como por arrastre de las especies. En el caso de la piritita se observa una activación para concentraciones intermedias de los iones. En la Figura 2-11 se muestran las recuperaciones observadas para cada tipo de mineral y agua. En orden creciente de cantidad de iones disueltos se tiene: *tap water*, *water 1*, *water 2*, *water 3* y *water 4*.

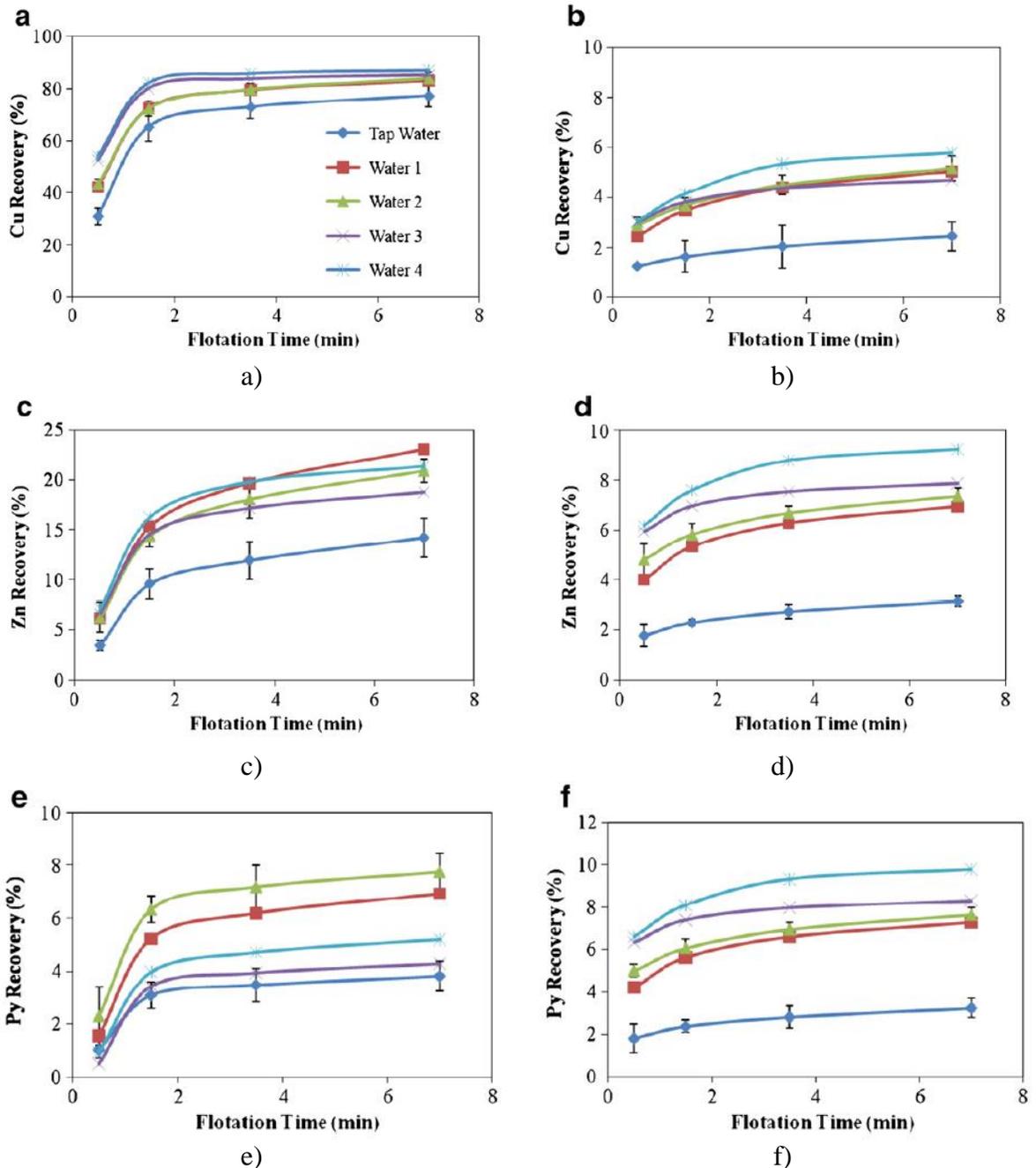


Figura 2-11: Gráficos de recuperación real de a) Cu, c) Zn y d) Py, y recuperación por arrastre de b) Cu, d) Zn y f) Py para aguas con distinta concentración de iones ($C_p = 30\%$; $J_g = 3$ [L/min]; $pH = 11,5$; Cytec3418A = 30 [g/T]; MIBC = 15 [g/T]; velocidad impeler = 1200 [RPM]) (Biçak et al., 2012)

Finalmente, Liu et al. (1993) estudia la flotación de un mineral de cobre utilizando agua destilada y agua recirculada. De esto, se obtiene que la selectividad por parte del agua recirculada es mayor, observándose una disminución en la recuperación de pirita (Figura 2-12). Esto se debe a que en esta agua se encuentran iones disueltos que deprimen la pirita, tales como Ca^{2+} proveniente de la cal, y de tiosales.

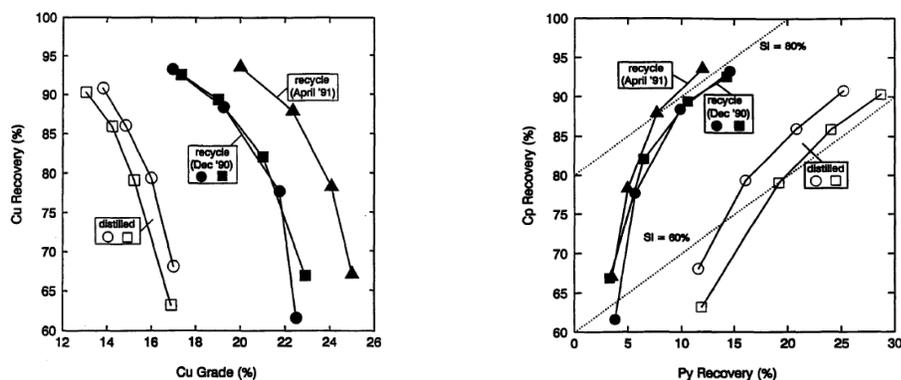


Figura 2-12: Gráficos de a) recuperación de Cu en función de la ley de Cu, y b) recuperación de Cu en función de la recuperación de Py, para flotación en condiciones rougher (Liu et al., 1993)

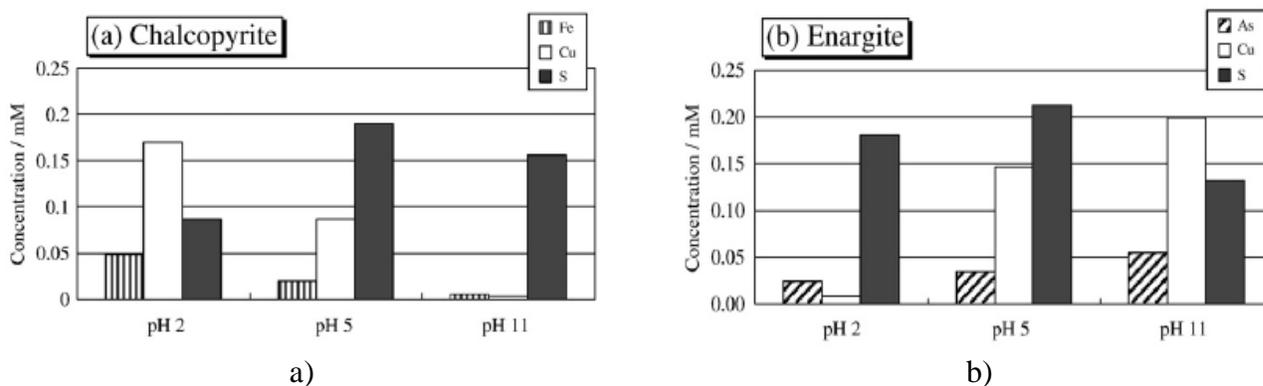
En síntesis, se ha mostrado que la calidad del agua tiene un impacto importante en la eficiencia de la flotación, y si bien en algunos casos se presenta una mejoría en los niveles de recuperación del mineral de interés, también es posible observar la activación y recuperación de otras especies que contaminan el concentrado. Para comprender de mejor manera los factores que gobiernan estos fenómenos, se pasa a detallar algunos parámetros y procesos que definen la calidad química del agua, como afectan la flotación de minerales, y como se relacionan entre ellos.

2.3. Procesos y parámetros que definen la calidad del agua

2.3.1. Procesos

A. Solubilidad de iones y sales

En la recopilación efectuada por Liu et al. (2013) se indica que en el caso del agua recirculada la principal fuente de los iones que se encuentran disueltos proviene del mineral procesado debido a la oxidación y disolución de las especies tratadas, producto de las condiciones de E_h y pH del sistema. Es por esta razón que en la flotación de sulfuros de cobre es probable encontrar iones Cu^{2+} disueltos, acompañado de Fe^{3+} o Ca^{2+} . Sasaki et al. (2010) estudia la oxidación de calcopirita, enargita y tenanita para valores de pH de 2, 5 y 11. La oxidación se realiza durante una hora mediante 0,013% H_2O_2 , obteniéndose los resultados observados en los gráficos de la Figura 2-13. Se aprecia que la concentración de las especies disueltas depende tanto del pH como del E_h del ambiente de reacción. Más aún, es posible observar que la disolución de Cu^{2+} se presenta para un amplio rango de pH.



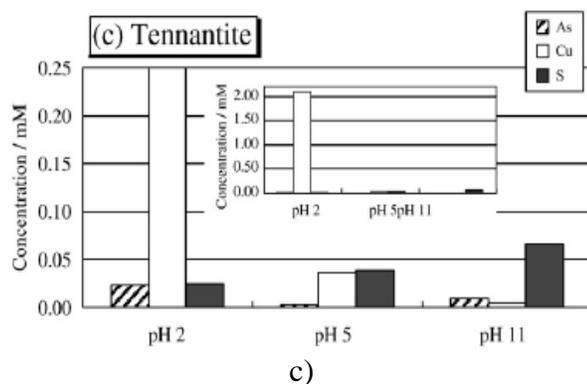


Figura 2-13: Gráficos de concentración de Cu, S y Fe disueltos para a) calcopirita, b) enargita y c) tenantita después de una hora de oxidación mediante 0,013% H₂O₂ a pH 2, 5 y 11 (Sasaki et al., 2010)

Las reacciones de oxidación-reducción (redox) se consideran procesos en donde ocurre una transferencia de electrones entre las especies. En específico, las reacciones de oxidación (o anódica) son aquellas semirreacciones que implican una pérdida de electrones, mientras que las reacciones de reducción (o catódica) son aquellas que implican ganancia de electrones (Chang, 2002). Luego, es posible identificar un agente reductor, el cual libera electrones, y un agente oxidante que acepta los electrones liberados.

Un ejemplo de este tipo de reacción es la oxidación de calcopirita, presentada en la Ecuación 2-8. Es posible observar que el oxígeno actúa como agente oxidante del mineral, promoviendo la oxidación del ion ferroso y la formación de ion férrico, junto con la liberación de Cu²⁺ a la solución.



Ecuación 2-8: Oxidación de calcopirita

Este ion cúprico puede permanecer disuelto, o precipitar y adsorberse en la superficie de los minerales como un sulfato, hidróxido o carbonato, lo cual depende principalmente de la solubilidad de las especies. La solubilidad es un parámetro utilizado para evaluar cuánto puede permanecer una sustancia en una solución sin precipitar y se define como la máxima cantidad de soluto que se puede disolver en una cantidad dada de disolvente bajo ciertas condiciones físicas de presión, temperatura, pH, entre otras (Guo et al., 2017). El producto de solubilidad K_{ps} de un compuesto es el producto de las concentraciones molares de los iones constituyentes, cada una elevada a la potencia de su coeficiente estequiométrico en la ecuación de equilibrio (Chang, 2002), y es una medida de la solubilidad de un compuesto. Mientras menor sea el valor del producto de solubilidad, entonces el compuesto es menos soluble. En la Ecuación 2-9 se define el producto de solubilidad para una reacción general del tipo: $aAB_{(s)} \rightarrow bA^{+}_{(ac)} + cB^{-}_{(ac)}$, donde $AB_{(s)}$ es una especie sólida, con $A^{+}_{(ac)}$ y $B^{-}_{(ac)}$ los iones que la componen y se encuentran disueltos.

$$K_{ps} = [A^{+}]^b [B^{-}]^c \quad (2.9)$$

Ecuación 2-9: Definición del producto de solubilidad

Cabe destacar que la definición previa corresponde a una situación de equilibrio. En caso contrario, se define el producto iónico Q , similar matemáticamente a la definición del producto de solubilidad, pero las concentraciones no corresponden a las de equilibrio. Luego, es posible predecir la precipitación de una especie mediante las siguientes relaciones:

- $Q < K_{ps}$ Disolución insaturada
- $Q = K_{ps}$ Disolución saturada (equilibrio)
- $Q > K_{ps}$ Disolución sobresaturada. Ocurre la precipitación de iones hasta que la solución se encuentre saturada.

Otro modo de predecir si una sustancia se encontrará disuelta es mediante el índice de saturación SI , cuya definición se presenta en la Ecuación 2-10:

$$SI = \log_{10}(SR) \quad (2.10)$$

Ecuación 2-10: Definición del índice de saturación

en donde SR corresponde a la razón de saturación, definida como la razón entre el producto de la concentración de los iones en la muestra y el producto de la concentración de los iones en una solución saturada. Luego, se tiene:

- $SI < 0$ Disolución insaturada
- $SI = 0$ Disolución saturada (equilibrio)
- $SI > 0$ Disolución sobresaturada. Ocurre precipitación

De la Figura 2-13 es posible observar para los casos de calcopirita y tennantita que la concentración de Cu^{2+} disuelto disminuye con un aumento del pH. Esto se debe a la precipitación de especies como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$, tal como se indica en la Tabla 2-2. Se aprecia que el índice de saturación para las pruebas con pH 11 es positivo, lo cual indica la precipitación de los hidróxidos de cobre(II) y hierro(III). Esto se corrobora con la disminución del pH debido al consumo de los iones OH^- .

Tabla 2-2: Producto de actividad iónica para $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ basado en $[\text{Cu}^{2+}]$ disuelto y pH después de la oxidación de calcopirita, enargita y tennantita (Sasaki et al., 2010)

Mineral	Initial pH	Final pH	Final $[\text{Cu}^{2+}] / \text{mmol L}^{-1}$	Final $[\text{Fe}^{3+}] / \text{mmol L}^{-1}$	IAP for $[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^2$ (SI)	IAP for $[\text{Fe}^{3+}][\text{OH}^-]^3$ (SI)
chalcopirite	2.07	2.08	0.17	0.049	2.45×10^{-28} (-)	8.51×10^{-41} (-)
enargite	2.07	2.02	0.024	-	2.63×10^{-29} (-)	-
tennantite	2.07	2.08	2.1	-	3.03×10^{-27} (-)	-
chalcopirite	5.01	4.08	0.0868	0.022	1.25×10^{-24} (-)	3.80×10^{-31} (+)
enargite	5.01	5.98	0.1465	-	1.33×10^{-20} (-)	-
tennantite	5.01	6.01	0.0362	-	3.79×10^{-21} (-)	-
chalcopirite	10.81	10.77	0.0196	0.009	6.80×10^{-12} (+)	5.38×10^{-9} (+)
enargite	10.81	10.40	0.2133	-	1.35×10^{-11} (+)	-
tennantite	10.81	10.82	0.0028	-	1.22×10^{-12} (+)	-

IAP, ionic activity product.
saturation index (SI) = $\log \text{IAP}/K_{sp}$.

Se ha visto que la disminución de la solubilidad de los iones conlleva a la precipitación de especies en la superficie de los valiosos. Como consecuencia, resulta la formación de una barrera hidrofílica que evita la adsorción de los colectores en la superficie del mineral, y por ende disminuye la flotabilidad y la recuperación del mineral de interés.

Otro problema presentado en la sección 2.2.1 en el estudio desarrollado por Mu y Peng (2019) es la activación de especies como la pirita a causa de iones disueltos. Producto de la oxidación de los minerales y consecuente aumento en la concentración de los iones liberados, es más probable que ocurra la activación de ganga y aumente su recuperación por flotación real, contaminando el concentrado y disminuyendo la eficiencia de la flotación.

B. Slime y clay coating

Tanto en operaciones industriales como en estudios de laboratorio se ha informado que las arcillas presentan un efecto negativo en la eficiencia de la flotación. En la Figura 2-14 se presentan los resultados del estudio llevado a cabo por Wang et al. (2015), en donde se examina la flotación para un mineral de calcopirita en presencia de bentonita y caolinita. En ambos gráficos se aprecia que mientras mayor es la concentración de estas arcillas, menor es la eficiencia de la flotación, disminuyendo tanto la ley como la recuperación de cobre en el concentrado. Este hecho puede ocurrir a causa de dos procesos definidos en la literatura: un aumento en la viscosidad de la pulpa y/o el fenómeno de *slime coating*. En la recopilación efectuada por Yu et al. (2017) se define el fenómeno de *slime coating* como la generación de una capa hidrofílica de partículas finas en la superficie del mineral valioso, evitando el contacto directo con colectores y/o las burbujas de aire. A lo largo de esta sección se referirá a *slimes* como a partículas muy finas.

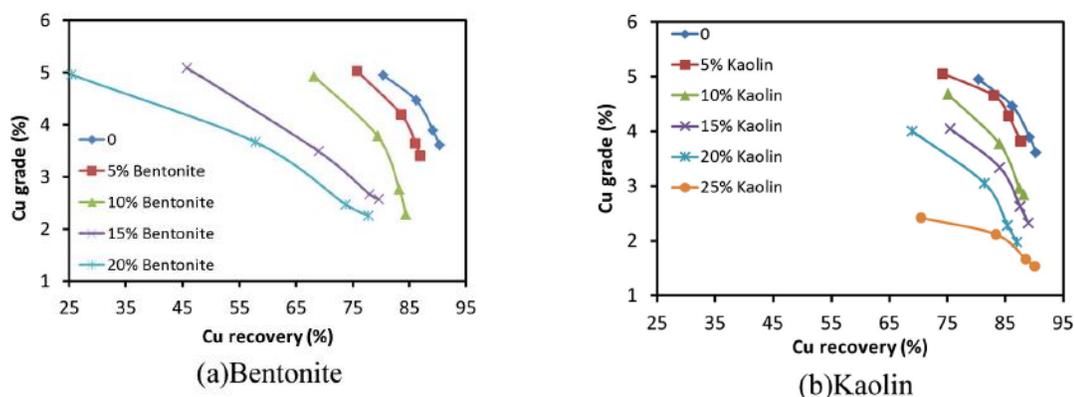


Figura 2-14: Gráficos de ley de Cu en función de la recuperación de Cu para distintas concentraciones de a) bentonita y b) caolinita ($J_g = 3$ [L/min]; $pH = 9$; $PAX = 30$ [g/T] (3 [min]) y 15 g[T] (2 [min]); $DSF004 = 15$ [g/T] (3 [min]) y 8 [g/T] (2 [min]); velocidad impeler = 1000 [RPM]) (Wang et al., 2015)

El particulado fino puede tener un origen natural, a partir de la ganga acompañando al valioso como arcillas, o bien de compuestos coloidales formados durante el proceso de molienda, por la oxidación de la superficie del mineral y por precipitación química. Dentro de la categoría *slimes* es posible encontrar diversas especies, en general material arcilloso, tales como la caolinita, montmorillonita, illita, serpentita, cuarzo, dolomita, entre otras.

Entre los mecanismos principales que explican el fenómeno de *slime coating* se encuentran la precipitación química, la deposición de compuestos coloidales formados durante la molienda, y la teoría DLVO. Esta última es la explicación clásica de los coloides en suspensión. Desarrollada por Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek, esta teoría explica la interacción entre partículas coloidales al asumir que la energía o potencial de interacción total entre estas dos se encuentra determinada por la suma de las repulsiones eléctricas de la doble capa y las atracciones de van der Waals (Baalousha, 2016).

Una manera de utilizar la teoría DLVO para determinar el efecto del *slime coating* en la flotación es mediante la medición del potencial zeta de las especies interactuando. El potencial zeta es un potencial electrocinético presente en el plano de corte o límite entre la capa compacta (capa de Stern) y la capa difusa, cerca de una interfaz sólido-líquido (Figura 2-15) en donde la velocidad del líquido es cero (Li, 2004). Este es un parámetro clave para determinar la energía de interacción

entre partículas y, por lo tanto, para determinar la estabilidad de los sistemas de suspensión de coloides.

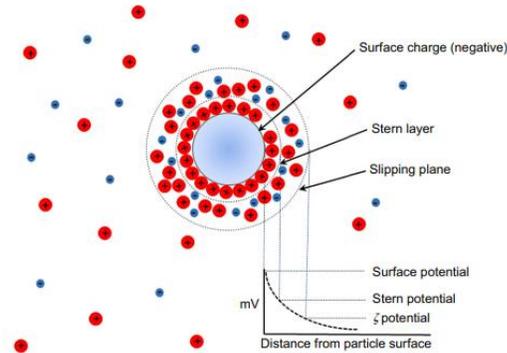


Figura 2-15: Representación esquemática de la capa doble y el potencial zeta (Pate y Safier, 2016)

Se debe mencionar que el valor del potencial zeta de las especies no es constante, dependiendo, entre otros factores, del pH de la solución en que se encuentran inmersas. En la Figura 2-16 se muestra una representación esquemática general de la variación del potencial zeta en función del pH.

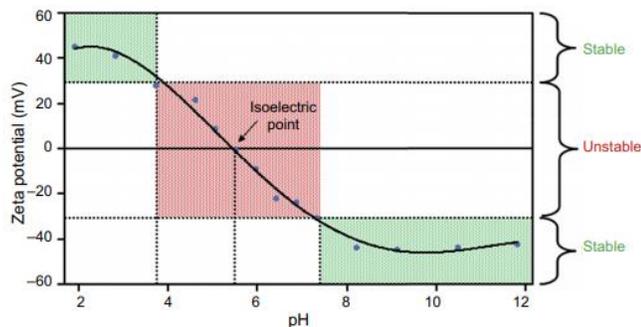


Figura 2-16: Representación esquemática de la variación del potencial zeta con respecto al pH (Pate y Safier, 2016)

Peng y Zhao (2011) estudian el impacto de la bentonita en la flotación de calcopirita y calcosina, junto con el efecto que conlleva una oxidación superficial de estos minerales. Cabe destacar que las pruebas se efectúan para un pH de 9. Se observa que la oxidación por molienda convencional de la calcosina propicia el fenómeno de *slime coating* con la bentonita debido a una atracción electrostática entre las especies, lo cual se traduce en una disminución de la flotación del sulfuro de cobre. Por el contrario, se obtiene que en ausencia de oxidación superficial la interacción entre la calcosina y la bentonita disminuye a causa de una repulsión electrostática. En la Figura 2-17 y Figura 2-18 se aprecian los resultados obtenidos del estudio. Se puede concluir que tanto el pH de la pulpa como la oxidación superficial de los minerales sulfurados de cobre (asociado con el E_h o potencial de oxidación de la pulpa) propician el fenómeno de *slime coating*.

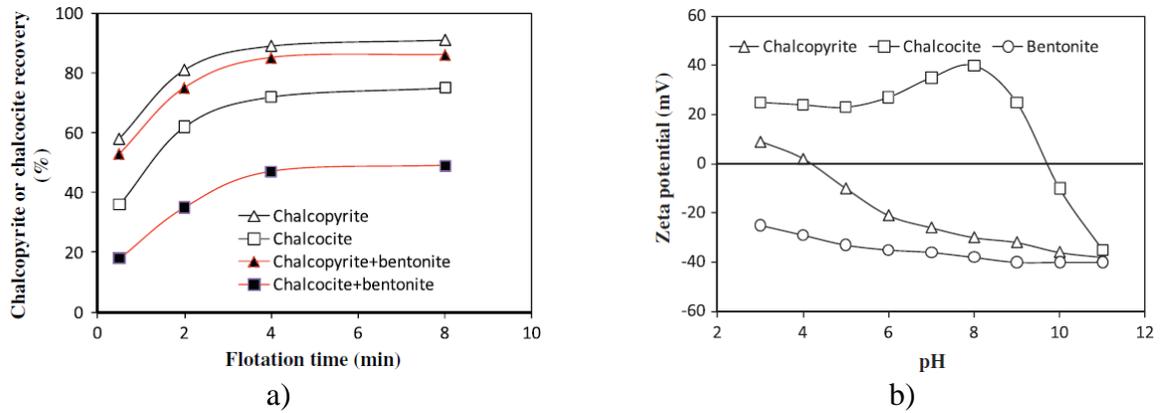


Figura 2-17: Gráficos de a) recuperación de calcopirita ($E_h = 310$ [mV]) y calcosina ($E_h = 260$ [mV]), con y sin bentonita, en función del tiempo ($pH = 9$; $PAX = 100$ [g/T], $IF56 = 150$ [g/T]; velocidad impeler = 500 [RPM]) y b) potencial zeta de calcopirita, calcosina y bentonita en función del pH (Peng y Zhao, 2011).

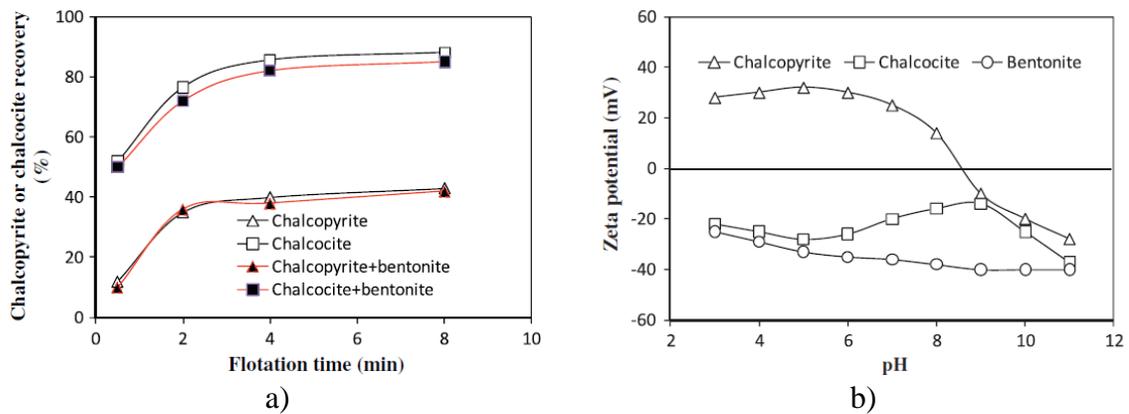


Figura 2-18: Gráficos de a) recuperación de calcopirita ($E_h = 500$ [mV]) y calcosina ($E_h = -300$ [mV]), con y sin bentonita, en función del tiempo ($pH = 9$; $PAX = 100$ [g/T], $IF56 = 150$ [g/T]; velocidad impeler = 500 [RPM]) y b) potencial zeta de calcopirita, calcosina y bentonita en función del pH (Peng y Zhao, 2011).

C. Aglomeración de partículas

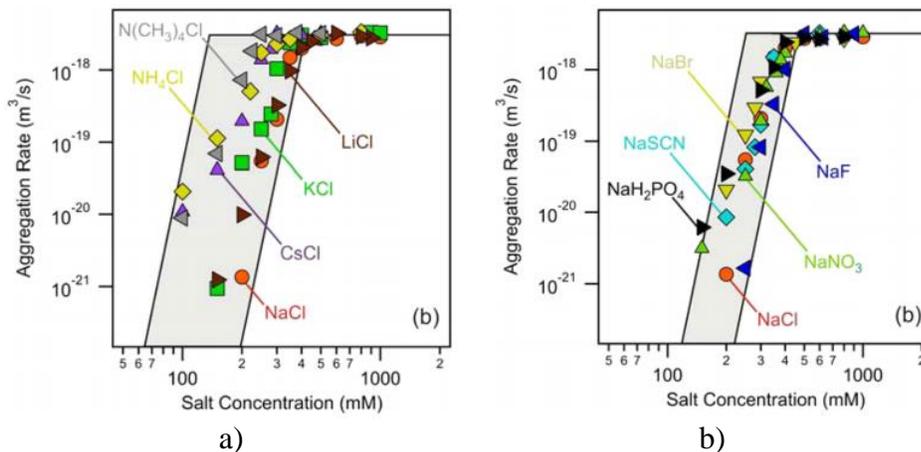
En la sección anterior se explica que ciertas variaciones en las condiciones químicas de un fluido determinan que las partículas dispersas puedan adsorberse en la superficie de los minerales afectando sus propiedades. Otro fenómeno que es posible de ocurrir es que estas condiciones alteren el comportamiento de las partículas promoviendo la formación de agregados, lo cual finalmente depende de la estabilidad coloidal de las partículas. Dentro de los procesos conocidos en que las partículas finas forman agregados se tiene la coagulación, floculación, aglomeración y aglutinación.

Para que ocurra la formación de agregados es necesario considerar dos factores: la interacción entre partículas y el movimiento de éstas. El movimiento de las partículas debe ser tal para que éstas colisionen efectivamente. Algunos de los mecanismos que conllevan a la aglomeración son: difusión Browniana, que ocurre cuando las partículas colisionan y se unen como resultado de su movimiento browniano; o por un mecanismo gravitacional o de sedimentación, que depende del tamaño de las partículas y de su velocidad terminal, en donde las partículas con velocidad de sedimentación más lenta son atrapadas por aquellas con velocidad más rápida, conllevando a la formación de *clusters*.

Por otro lado, las interacciones entre partículas en colisión deben ser tal que ocurra un contacto permanente. Por esto, aquellas partículas que se repelen entre sí se dice que son estables, puesto que no forman agregados. Usualmente, la interacción puede ser de carácter atractivo (van der Waals) o repulsivo (repulsión electrostática). Entonces, este mecanismo es similar a lo ocurrido en el fenómeno de *slime coating* relacionado con la teoría DLVO. En la sección 2.3.2 se señala el estudio realizado por Farrokhpay y Zanin (2012), en donde se indica que el potencial zeta expresa el grado de repulsión entre partículas adyacentes cargadas similarmente en suspensión. Luego, los coloides con un alto potencial zeta son eléctricamente estables, mientras que los coloides con un bajo potencial zeta tienden a agregarse, resultando en un aumento de la viscosidad de la pulpa. Por lo tanto, la aglomeración de partículas se ve influenciada por factores como el pH y el E_h de la pulpa (Levay et al., 2001).

Otro factor que influye la aglomeración de partículas es la concentración de iones disueltos. Oncsik et al. (2015) señala que en la agregación de partículas se pueden considerar una etapa de agregación lenta y una etapa rápida, las cuales dependen de la concentración de sales o iones, y de las cargas de las partículas. Específicamente, se menciona que ocurre una agregación rápida en presencia de una alta concentración de iones o cuando las partículas tienen una carga débil. En caso contrario, la agregación de las partículas es lenta. La transición entre estas dos fases se denomina concentración de coagulación crítica (CCC). De acuerdo con la regla de Schulze-Hardy, el valor de CCC disminuye de manera importante con un aumento en la valencia de los contraiones. Es decir, los cationes multivalentes son relevantes para partículas con carga negativa, mientras que los aniones multivalentes son importantes para partículas con carga positiva.

En los gráficos de la Figura 2-19 se muestra el efecto de distintas sales en la tasa de agregación de partículas para un mineral con carga superficial positiva (gráficos superiores) y con carga superficial negativa (gráficos inferiores). Las sales empleadas corresponden a sales de sodio (gráficos de la derecha) y sales de cloruro (gráficos de la izquierda). Los resultados reflejan lo descrito en el párrafo previo.



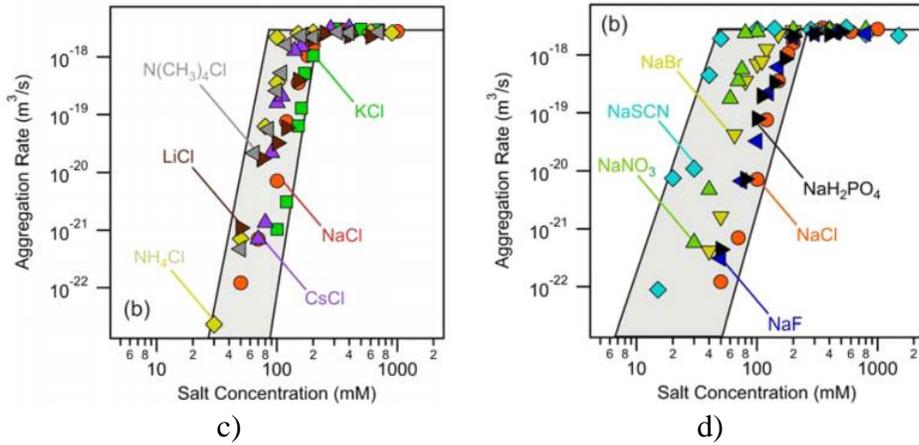


Figura 2-19: Gráficos de tasa de agregación de partículas con a) carga superficial positiva en función de la concentración de sales de cloruro, b) carga superficial positiva en función de la concentración de sales de sodio, c) carga superficial negativa en función de la concentración de sales de cloruro y d) carga superficial negativa en función de la concentración de sales de sodio (Oncsik et al., 2015)

2.3.2. Parámetros

A. Fuerza iónica

La fuerza iónica es una medida de la concentración de los iones en solución, y refleja el efecto de las cargas y las interacciones entre los iones en las actividades iónicas, y por lo tanto en los coeficientes de actividad iónica. Matemáticamente, la fuerza iónica se puede definir de acuerdo con la Ecuación 2-11:

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (2.11)$$

Ecuación 2-11: Definición de fuerza iónica

En donde c_i corresponde a la concentración iónica en unidades de molaridad [mol L^{-1}], y z_i es el número de carga del ion. Luego, la fuerza iónica tiene unidades de molaridad.

Como se menciona en la sección 2.2.2, el agua recirculada de procesos presenta una gran concentración de iones disueltos, provenientes ya sea de la oxidación y disolución del mineral o bien de los reactivos que se agregan al sistema. Es esperable entonces que la fuerza iónica de una muestra de agua sea mayor cuanto más tiempo ha estado en contacto con mineral.

Uno de los efectos principales que tiene un aumento en la fuerza iónica de la solución es el aumento en la recuperación de agua en el concentrado, lo cual a su vez tiene como consecuencia una mayor recuperación de ganga mineral causada por flotación por arrastre. Por otro lado, un aumento en la fuerza iónica también se traduce en una disminución del tamaño de las burbujas a causa de que se evita la coalescencia de éstas, y por ende se genera una espuma más estable.

Los efectos anteriormente expuestos son estudiados por Corin y Wiese (2014) al realizar pruebas de flotación en laboratorio en donde se emplean cuatro tipos de agua con distinta concentración de iones o fuerza iónica. En los gráficos de la Figura 2-20 se muestran los principales resultados enunciados previamente. En el ejercicio, 1PW, 3PW, 5PW y 10PW corresponden a aguas con distinta fuerza iónica (Tabla 2-3), mientras que F, C y G representa el espumante y los depresantes

añadidos, respectivamente. En particular, en la Figura 2-20.c se señala la consecuencia de una mayor fuerza iónica en la ley del concentrado. Si bien la recuperación de cobre no se ve afectada considerablemente, debido al arrastre de ganga el concentrado se ensucia, por lo cual se observa una disminución notable en la ley.

Tabla 2-3: Fuerza iónica I de las aguas preparadas (Corin y Wiese, 2014)

Water type	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	CO ₃ ²⁻ (ppm)	TDS (mg/L)	I (M)
1PW	80	70	153	287	240	176	-	17	1023	0.0213
3PW	240	210	459	861	720	528	-	51	3069	0.0620
5PW	400	350	765	1435	1200	880	-	85	5115	0.0977
10PW	800	700	1530	2870	2400	1760	-	850	10230	0.1860

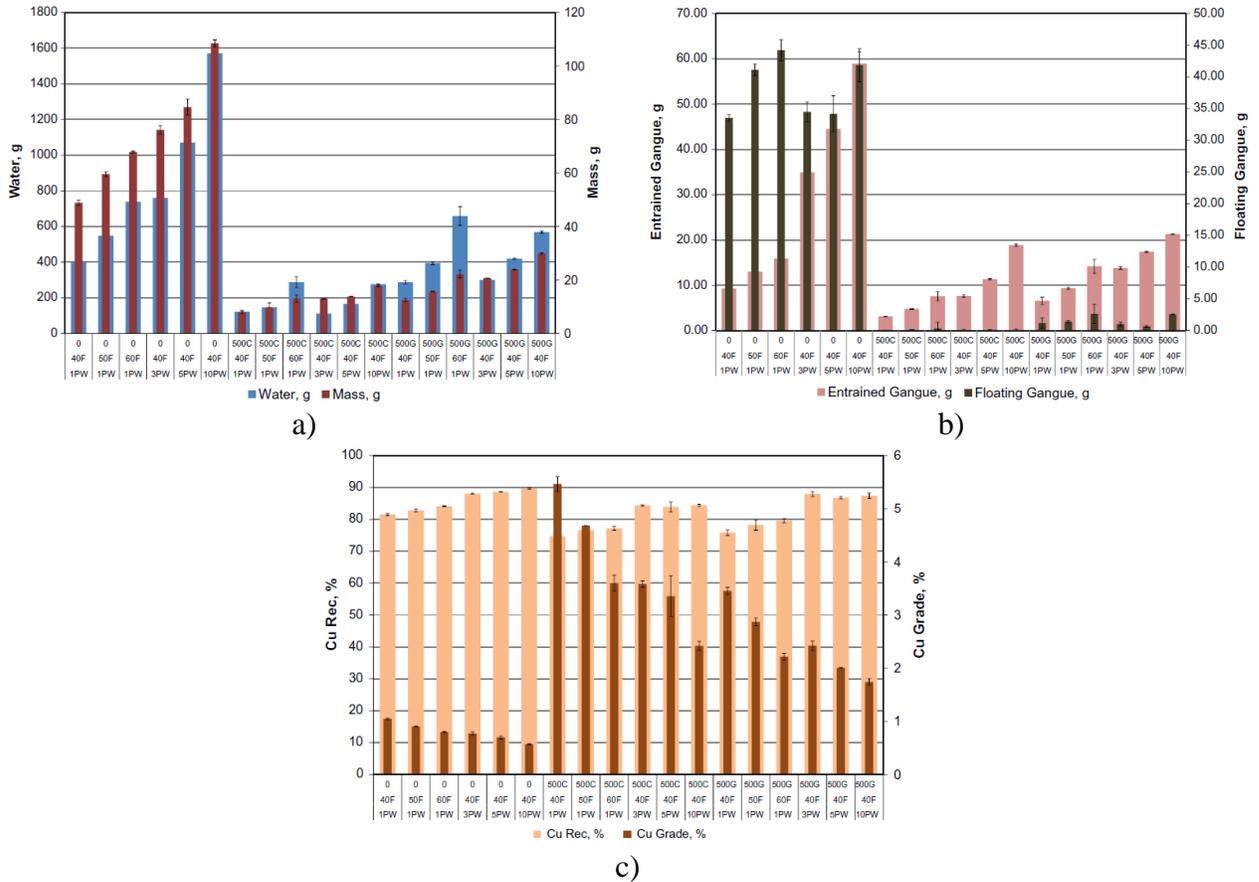


Figura 2-20: Gráficos de a) recuperación de agua y de masa, b) recuperación de ganga por mecanismo de arrastre y real, y c) recuperación y ley de cobre en función de la fuerza iónica del agua ($C_p = 35\%$; $J_g = 7 [L/min]$; $SIBX = 150 [g/T]$; $DOW200 = 40-50-60 [g/T]$; $Stypres 504 = 0-500 [g/T]$; $Depramin 267 = 0-500 [g/T]$; velocidad impeler = $1200 [RPM]$) (Corin y Wiese, 2014)

B. pH

El pH es una medida de la concentración de iones H^+ en una solución, y permite determinar el nivel de acidez-alcalinidad de una solución acuosa. En la Ecuación 2-12 se presenta la definición matemática del pH, en donde αH^+ corresponde a la actividad del ion:

$$pH = -\log(\alpha H^+) \quad (2.12)$$

Ecuación 2-12: Definición de pH

Esta escala se encuentra acotada entre un valor mínimo y máximo de 0 y 14, respectivamente, en que 0 corresponde a una solución extremadamente ácida y 14 corresponde a una solución extremadamente alcalina.

En la flotación de sulfuros de cobre se trabaja en condiciones alcalinas puesto que es posible deprimir la pirita en este ambiente, y como consecuencia de ello mejorar la calidad del concentrado. Además, se debe mencionar que la mayoría de los colectores son estables en este ambiente. Para modificar el pH a escala industrial generalmente se agrega cal al reactor (Yianatos, 2005).

Producto de un cambio en el pH de una solución pueden ocurrir procesos de precipitación y adsorción que modifican la composición química de los minerales y de las velocidades de reacción (Trick et al., 2008), similar a lo presentado en la sección 2.3.1 en el fenómeno de *slime coating*. No obstante, este no es el único problema que presenta una variación de pH en el ambiente de reacción.

En flotación, la estabilidad de la espuma es un factor determinante en los niveles de recuperación y ley del concentrado, la cual depende entre otros parámetros del espumante utilizado, la concentración de iones, y el pH de la pulpa. Farrokhpay y Zanin (2012) estudian el efecto de este último en la altura de la espuma, el potencial zeta de las partículas y la densidad de la pulpa para un mineral sulfurado de zinc. Se aprecia de la Tabla 2-4 que el espesor de la espuma es mayor a medida que disminuye el pH de la pulpa. Además, se tiene que la estabilidad de la espuma aumenta para valores bajos de pH, lo cual se observa a partir de la vida media de la espuma $t_{1/2}$, que se define como el tiempo necesario para que la espuma colapse un 50% de su altura de equilibrio inicial.

Tabla 2-4: Efecto de pH en estabilidad de la espuma (Farrokhpay y Zanin, 2012)

pH	Froth height, H_f (mm)	Froth half-life, $t_{1/2}$ (s)
11	400	13
9	450	15
7	550	18
6	750	18
4	>900* (overflow)	N/A

Por otro lado, se observa que tanto el potencial zeta como la viscosidad de la pulpa son dependientes del pH (Figura 2-21.a y Figura 2-21.b). Se llega a la conclusión de que para bajos valores de potencial zeta, las partículas tienden a agregarse, razón por la cual resulta una pulpa de mayor viscosidad, mientras que, para altos valores de pH, el potencial zeta aumenta resultando en una disolución de las especies precipitadas y una disminución de la viscosidad de la pulpa.

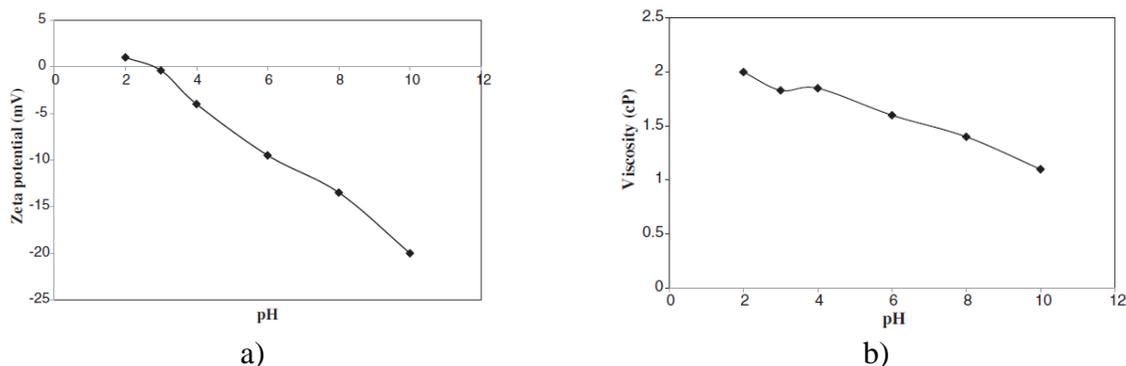


Figura 2-21: Gráficos de a) potencial zeta y b) viscosidad de la pulpa en función del pH ($C_p = 33\%$; $J_g = 7$ [L/min]; velocidad impeler = 500 [RPM]) (Farrokhpay y Zanin, 2012)

En el estudio presentado en la sección 2.2.1 de Ramos et al. (2013) se aprecia que el pH afecta la recuperación de molibdenita al emplear agua de mar en el proceso de flotación. Para explicar este hecho, se investiga el efecto del pH en el espesor de la espuma, observando que este depende tanto del pH como de la fuerza iónica del agua (Figura 2-22). De esto se concluye que la recuperación de molibdenita se ve afectada al emplear agua de mar puesto que la espuma es menos estable en estas condiciones, lo cual se intensifica al aumentar el pH, observándose una disminución en la altura de espuma. Cabe mencionar que en este estudio no se observa una similitud con los resultados obtenidos por Farrokhpay y Zanin (2012), en donde el pH afecta de manera directa la estabilidad de la espuma.

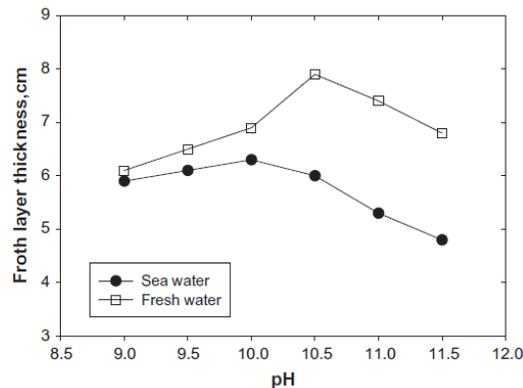
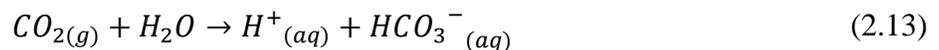
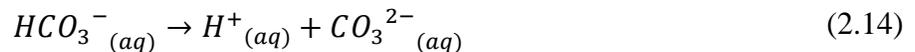


Figura 2-22: Gráfico de la altura de espuma en función del pH y tipo de agua ($C_p = 35\%$; $J_g = 10$ [L/min]; Matcol TC-123 = 22 [g/T]; Sascol-95 = 11 [g/T], Diesel = 10 [g/T]; Matfroth-355 10 [g/T]; velocidad impeler = 900 [RPM]) (Ramos et al., 2013)

Otro proceso que puede modificar el pH de un fluido es la disolución de dióxido de carbono. Tal como se muestra en la Ecuación 2-13, al disolverse este gas en agua se propicia la liberación de iones bicarbonato y de protones. De manera similar, el ion bicarbonato puede disociarse en sus dos componentes, tal como se señala en la Ecuación 2-14. De esto es posible observar que la concentración de H^+ aumenta con una mayor disolución de dióxido de carbono en la solución. Luego, es esperable que el pH disminuya, promoviendo una acidificación del agua.



Ecuación 2-13: Liberación de protón e ion bicarbonato



Ecuación 2-14: Disociación del ion bicarbonato



Ecuación 2-15: Reacción de la carbonación del agua

C. E_h

El potencial redox o potencial de oxidación es una medida de la facilidad con que una molécula acepta electrones, lo que significa que mientras más positivo es el potencial redox, más fácilmente una molécula es reducida. Cada especie tiene su propio potencial de reducción. La unidad de medida de este potencial son los volts [V] o milivolts [mV].

Dentro de los factores que pueden afectar el potencial de una pulpa se tiene: las condiciones de molienda (como los medios de molienda, que pueden aumentar o reducir las interacciones galvánicas), los niveles de oxígeno disuelto (revisado más adelante en esta sección), el pH, entre otros (Sheni et al., 2018).

Para medir el potencial redox comúnmente se utilizan tres tipos de electrodos: de metales nobles, electrodos selectivos de iones, y electrodos preparados a partir de minerales naturales. Tradicionalmente, el E_h se mide con un electrodo de metal noble, usualmente platino y a veces oro, y se hace con respecto a un electrodo de referencia de calomel (Hg/Hg_2Cl_2) o de plata/cloruro de plata ($Ag/AgCl$) (Chander, 2003).

En la revisión realizada por Chander (2003) se señalan varias investigaciones que demuestran que el potencial de una pulpa en la flotación de minerales sulfurados puede alterar la eficiencia del proceso. Nagaraj et al. (1983) investiga el efecto del potencial en la separación de calcopirita y molibdenita usando un electrodo de platino. En la Figura 2-23.a se señalan los resultados obtenidos, en donde se observa que la recuperación de cobre es alta cuando el potencial es mayor a 0.1 [V].

Análogamente, Sepalveda-Suarez y Castro (1996) también estudian la separación de estos minerales, obteniendo las leyes de concentrado observadas en la Figura 2-23.b, de donde es posible apreciar que éstas disminuyen para potenciales mayores a -0.2 [V]. Esto puede ser consistente con el estudio de Nagaraj et al. (1983), debido a que la recuperación y la ley de concentrado tienen una relación inversa. Chander (2003) indica que la depresión de la calcopirita es causada producto de que el colector es incapaz de oxidarse bajo condiciones reductoras.

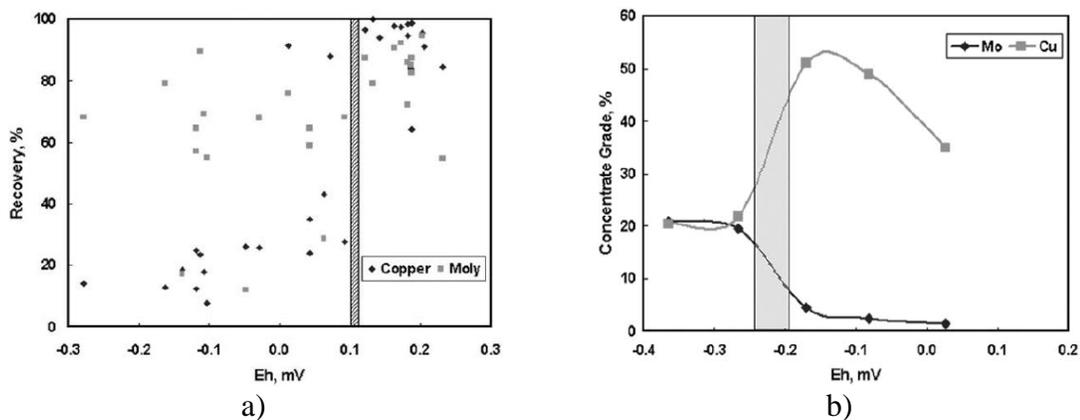


Figura 2-23: Gráficos de a) recuperación de cobre y molibdeno ($pH = 10-11$) (Nagaraj et al., 1983) y b) ley de cobre y molibdeno en el concentrado (Sepalveda-Suarez y Castro, 1996) en función del potencial

Kalegowda et al. (2015) realiza pruebas de flotación a diferentes potenciales de pulpa para observar el efecto de éste en la recuperación de calcopirita. En la Figura 2-24 se observa que para un pH 9, al disminuir el valor del E_h de la pulpa la recuperación de calcopirita disminuye. Se nota además que al pasar de un ambiente oxidante ($E_h = 385$ [mV]) a un ambiente reductor (-97 [mV]) la eficiencia del proceso se ve afectada de manera importante, en donde la recuperación disminuye desde un 97% a un 41%. Para explicar esto, realiza una medición del espectro UV-visible de donde obtiene el gráfico de la Figura 2-25. Se observa que la curva 1 correspondiente a una solución de NaEX presenta *peaks* en 260 [nm] y 301 [nm], los cuales desaparecen en la curva 2 de $E_h = 370$ [mV] y pH 4, indicando la adsorción del xantato en la superficie de la calcopirita. Adicionalmente, cuando el potencial disminuye a -100 [mV] y -200 [mV] se observan *peaks* en 301 [nm] y 346

[nm], correspondiente el xantato y perxantato, respectivamente. Esto muestra que el xantato no se adsorbe en la superficie de la calcopirita en un ambiente reductor, lo cual tiene repercusiones en la recuperación del mineral.

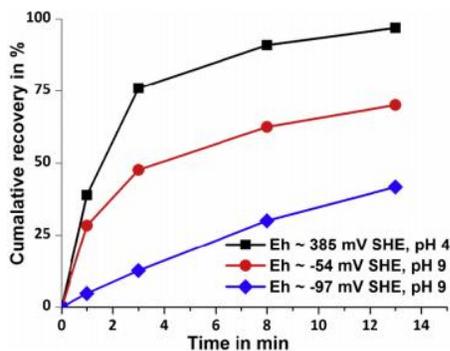


Figura 2-24: Gráfico de recuperación de calcopirita en función del tiempo para distintos potenciales y pH de pulpa ($J_g = 3$ [L/min]; NaEX = 250 [g/T]) (Kalegowda et al., 2015)

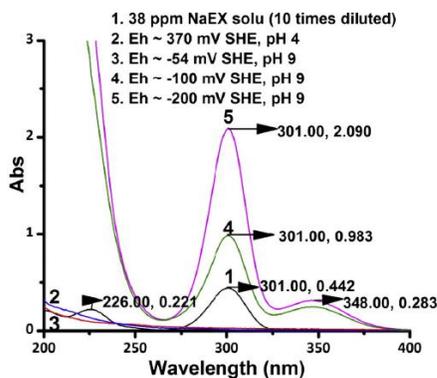


Figura 2-25: Gráfico de espectro UV-Visible de la adsorción y desorción de xantato sobre calcopirita a diferentes potenciales de pulpa ($J_g = 3$ [L/min]; NaEX = 250 [g/T]) (Kalegowda et al., 2015)

D. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto o DO (*Dissolved Oxygen*) se refiere a los niveles de oxígeno libre, no compuesto, que se encuentra presentes en el agua u otros líquidos. El término no compuesto denomina a aquel oxígeno que no se encuentra unido o formando enlace con otro elemento, es decir, se refiere al oxígeno molecular O_2 disuelto en un fluido. Se reporta en unidades de miligramos por litro [mg/L], partes por millón [ppm] o micromoles [μmol].

En general, el oxígeno disuelto tiende a alcanzar un estado de saturación en el fluido. Sin embargo, la solubilidad de éste puede variar dependiendo de la temperatura, presión y salinidad del fluido. En la Figura 2-26 se aprecia lo mencionado anteriormente. Más aún, se debe notar que a medida que aumenta la temperatura, menor es la solubilidad del oxígeno.

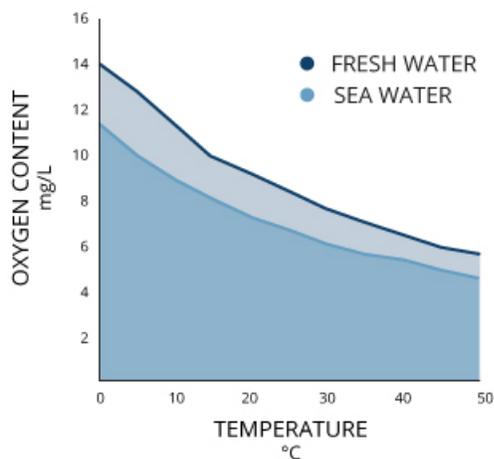


Figura 2-26: Variación de la solubilidad de oxígeno con respecto a la temperatura y salinidad del fluido

En flotación de minerales, el oxígeno disuelto tiene un impacto en el proceso puesto que influencia de manera directa el potencial de la pulpa. En el trabajo desarrollado por Kuopanportti et al. (1997) se muestra que el oxígeno disuelto en una pulpa afecta al potencial y como consecuencia la tasa de adsorción del xantato en la superficie de pirita y calcopirita (Figura 2-27 y Figura 2-28). De los gráficos es posible observar que para mayor concentración de oxígeno disuelto la tasa de adsorción de xantato aumenta, para cualquier valor de pH estudiado. Esto se debe a que el potencial de la pulpa es dependiente de la concentración de oxígeno, en donde valores más altos de E_h se asocian con altas concentraciones de oxígeno. Concluye que el E_h es la fuerza motriz para la adsorción del colector en la superficie de los minerales.

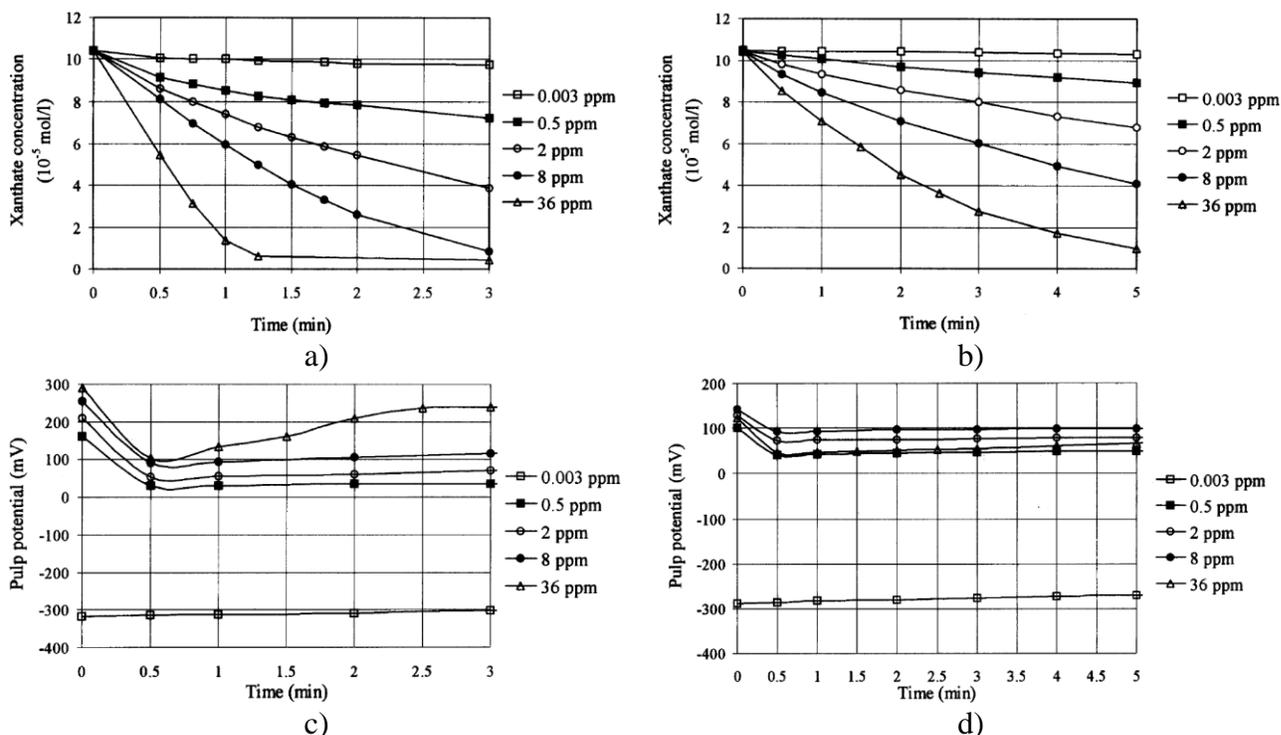


Figura 2-27: Gráficos de a) tasa de adsorción de xantato y c) potencial de pulpa para pirita (pH = 6), y b) tasa de adsorción de xantato y d) potencial de pulpa para pirita (pH = 9) (Kuopanportti et al., 1997)

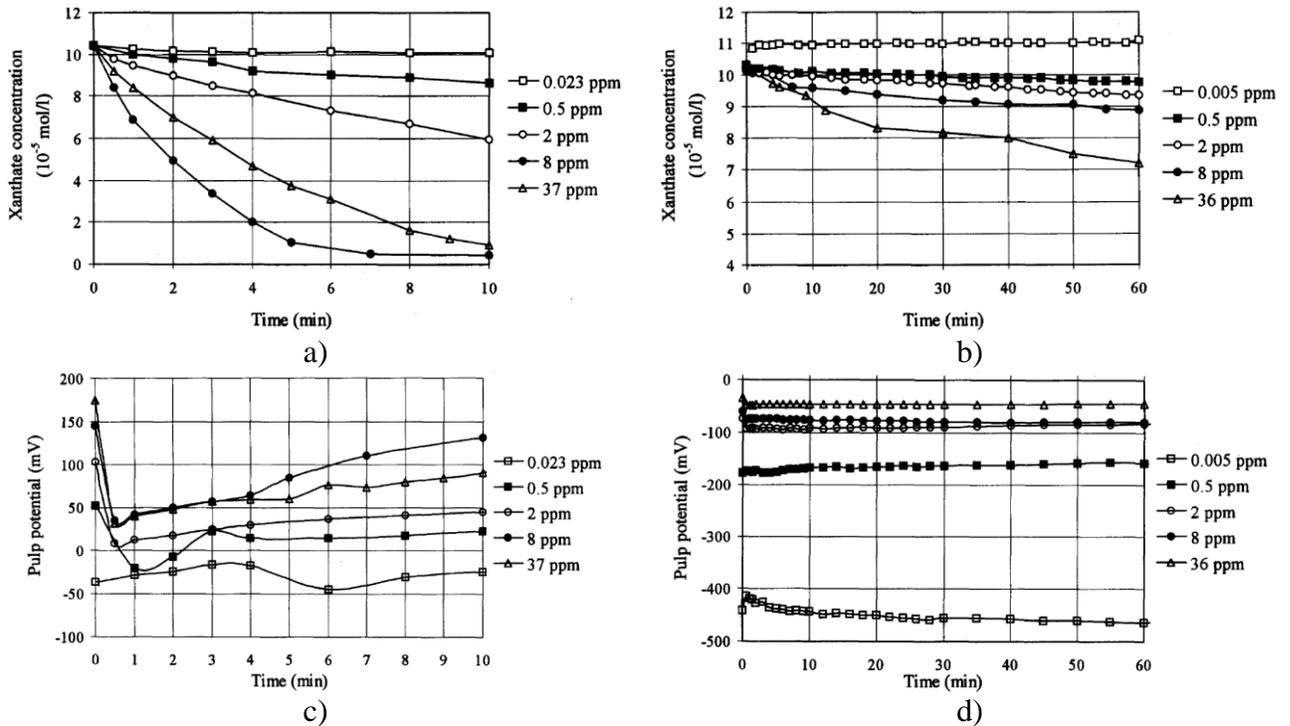


Figura 2-28: Gráficos de a) tasa de adsorción de xantato y c) potencial de pulpa para calcopirita (pH = 6), y b) tasa de adsorción de xantato y d) potencial de pulpa para calcopirita (pH = 11,5) (Kuopanportti et al., 1997)

E. Conductividad

La conductividad es una medida de la capacidad que posee un medio u objeto para transportar una corriente eléctrica, y tiene unidades de medida de milisiemens por centímetro [mS/cm]. En una solución acuosa, la conductividad está directamente relacionada con la concentración de iones, provenientes de la disolución de sales y de materiales inorgánicos (Fondriest, 2014). Como regla general, mientras mayor es la concentración de iones presentes en la solución, mayor es la conductividad del agua.

Se ha visto que la recirculación de agua en los procesos de flotación conlleva a una mayor concentración de iones disueltos. Por esta razón, se espera que la conductividad sea mayor para una muestra de agua que ha estado en contacto con mineral en comparación con la conductividad del agua fresca. Muzenda (2010) investiga el efecto que tienen distintas calidades químicas de agua en la eficiencia de la flotación de Metales del Grupo del Planito (PGM's). Las fuentes de agua utilizadas corresponden a espesadores, aguas recirculadas, aguas residuales y agua potable. A causa de ello, presentan diferencias en los valores de pH, sólidos totales disueltos (TDS), sólidos totales suspendidos (TSS) y en la conductividad. En la Tabla 2-5 se señalan los valores de los parámetros mencionados para cada tipo de agua utilizada.

En la Figura 2-29 se aprecian los resultados obtenidos de las pruebas de flotación realizadas. Es posible observar que el agua con menor conductividad (agua potable) presenta el concentrado con mayor recuperación, mientras que la menor recuperación se asocia al agua UG2 #1. El autor atribuye esta baja recuperación a la presencia de iones de metales alcalinotérreos, en particular de Ca^{2+} y Mg^{2+} , los cuales pueden propiciar la activación de ganga, generando la disminución en la recuperación.

Tabla 2-5: Calidad química de las aguas empleadas en el estudio (Muzenda, 2010)

Type of Water Sample	PH	TDS (ppm)	Conductivity ($\mu\text{S} / \text{cm}$)	TSS (ppm)
Portable water	7.1	0	100	0
High rate thickener	9.91	2200	3200	70
Thickener #2	7.16	2200	3200	62
UG2 #1 Thickener	7.15	200	2700	59.5
Merensky Thickener	7.17	1900	2800	129
Cloudt dam	7.5	2300	2700	44.5
Thickener #1	7.08	2400	2900	13
Return water	7.82	2400	3400	30
Sewage effluent	7.34	1200	1600	23

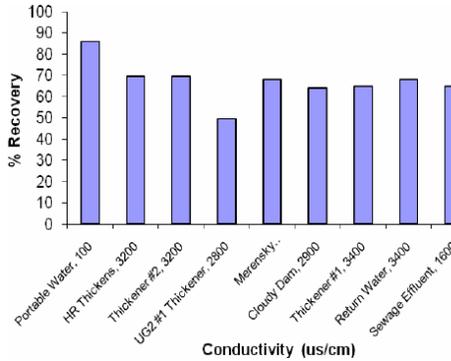


Figura 2-29: Gráfico de recuperación de PGM's en función de la conductividad de distintos tipos de agua (SIBX = 8 [mL]; $\text{CuSO}_4 = 2,3$ [mL]; Sendep 30E = 1 [mL]; espumante = 1 [mL]) (Muzenda, 2010)

Otro factor que puede variar la conductividad de una solución es la temperatura. Estos dos parámetros se relacionan de manera directa, por lo cual un aumento en la temperatura de la solución conlleva a un aumento en la conductividad de ésta. Este hecho se explica debido a una mayor movilidad de los iones. En la Tabla 2-6 se observan los dos factores mencionados que afectan la conductividad eléctrica. Es posible observar que tanto un aumento en la temperatura como en la concentración de iones en solución (en este caso NaCl) aumentan la conductividad de la solución.

Tabla 2-6: Conductividad del agua pura en función de la temperatura y la concentración de NaCl (ASTM D1125-95(1999))

Temperature, °C	Conductivity of Pure Water, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Conductivity Increase Due to 1 mg/L NaCl, $\mu\text{S}/\text{cm}$
0	0.011649	1.1463
5	0.016607	1.3311
10	0.02310	1.5261
15	0.03143	1.7297
20	0.04194	1.9435
25	0.05501	2.1642
30	0.07101	2.3935
35	0.09037	2.6296
40	0.11351	2.8760
45	0.14081	3.1257
50	0.17268	3.3841
55	0.2095	3.6476
60	0.2514	3.9179
65	0.2987	4.1882
70	0.3516	4.4773
75	0.4102	4.7648
80	0.4744	5.0556
85	0.5444	5.3550
90	0.6205	5.6527
95	0.7030	5.9264
100	0.7930	6.1933

F. Sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales o TDS (*Total Dissolved Solids*) comprende a todas las partículas iónicas con tamaños menor a 2 [μm]. Esto incluye tanto a los electrolitos disociados como a materia orgánica disuelta (Fondriest, 2014). La unidad de medida corresponde a [mg/L] de sólidos disueltos.

En general, los niveles de TDS en aguas recirculadas tiende a aumentar, lo cual resulta en un aumento del peso específico del agua que afecta a las pulpas (Muzenda, 2010). En el caso de la recuperación en función de los valores de TDS, del mismo estudio presentado en el apartado sobre conductividad, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 2-30. Se aprecia que la presencia de sólidos disueltos disminuye la recuperación del concentrado. El autor indica que los sólidos disueltos se encuentran como partículas coloidales en el agua recirculada, resultando en que éstas permanezcan dispersas o adheridas a partículas minerales como una capa superficial hidrofílica.

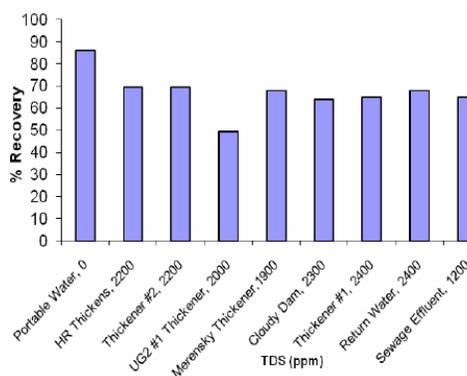


Figura 2-30: Gráficos de recuperación de PGM's en función de los TDS de distintos tipos de agua (SIBX = 8 [mL]; CuSO_4 = 2,3 [mL]; Sendep 30E = 1 [mL]; espumante = 1 [mL]) (Muzenda, 2010)

G. Turbidez y sólidos totales suspendidos

Los sólidos totales suspendidos o TSS (*Total Suspended Solids*) son aquellas partículas con tamaños mayor a 2 [μm] que se encuentran flotando en el agua. Este factor es importante en la calidad del agua, puesto que mientras mayor es la concentración de TSS en el agua, menor será la claridad de ésta. Este factor se mide en unidades similares a los TSD [mg/L]

Dentro de los TSS es posible encontrar partículas que se depositan en el fondo de un cuerpo de agua durante un período de tiempo, generalmente asociado con partículas pesadas. Por otro lado, también se identifican partículas finas que no se depositan, denominadas sólidos coloidales.

La turbidez corresponde a una determinación óptica de la claridad de un fluido. En específico, se basa en la cantidad de luz dispersada por las partículas que se encuentran suspendidas en el fluido. Mientras mayor sea la cantidad de partículas presentes, mayor será la dispersión de la luz, y por ende, la turbidez del fluido. Luego, se puede observar que la turbidez se relaciona de manera directa con los TSS. Sin embargo, se debe destacar que la turbidez no es una medida de los TSS, puesto que dentro de este último se encuentran las partículas que sedimentan, y que por lo tanto no afectan a la turbidez del agua. Luego, una medición de la turbidez no implica una medición exacta de los TSS. Un factor que afecta la turbidez de un fluido es la salinidad, tal como se vio para la sección

2.3.1 en el apartado de aglomeración de partículas. Debido a esto, el peso de los sólidos es mayor, haciendo más probable que las partículas disueltas se depositen y disminuya la turbidez del agua.

En términos de calidad del agua, altos niveles de sólidos totales suspendidos aumentan la temperatura del agua y disminuye los niveles de oxígeno disuelto. Esto ocurre debido a que las partículas suspendidas absorben más calor proveniente de la radiación solar que las moléculas del agua. Luego, este calor es transferido al agua mediante conducción, elevando la temperatura del fluido y disminuyendo la solubilidad del oxígeno como se indica anteriormente.

Los sólidos totales o TS (*Total Solids*) en un fluido corresponden a la cantidad de sólidos disueltos y suspendidos, cuya determinación se realiza a partir de un procedimiento experimental en que se hace evaporar el agua para recuperar el material sólido de la solución. En la Ecuación 2-16 se presenta el cálculo de sólidos totales TS [ppm], donde M_A es la masa del vaso con los restos de sólidos posterior a evaporar el agua de la muestra [g], M_B es la masa del vaso sin la muestra [g], y V es el volumen de la muestra [L].

$$TS \text{ [ppm]} = \frac{(M_A - M_B) \times 100}{V} \quad (2.16)$$

Ecuación 2-16: Cálculo de sólidos totales

2.4. Conclusión de la revisión

Se revisa algunos de los parámetros que definen la calidad química del agua, los cuales al presentar cambios conllevan a procesos que modifican las propiedades de los minerales y reactivos que se emplean en la flotación de sulfuros. En particular, se destacan la importancia del control del pH y E_h de una solución o pulpa, puesto que son estos los que mayor implicancia tienen en los procesos revisados, tales como el fenómeno de *slime coating*, la aglomeración de partículas o la disolución de iones. Por otro lado, este último proceso también tiene repercusiones en la calidad química del agua, debido a que ciertos iones en solución pueden activar especies no deseadas para la flotación de minerales, o incluso aumentar la fuerza iónica de la pulpa, con lo cual se ha señalado que prosiguen efectos indeseados, tales como una mayor recuperación de agua en el concentrado y por consiguiente un mayor arrastre de ganga.

Tal como indica Liu et al. (2013), los componentes del agua podrían interactuar y, por lo tanto, cambiar las propiedades de cualquiera de las tres fases involucradas en la flotación: partículas minerales, burbujas de aire y solución acuosa. Estos cambios podrían afectar la eficiencia de los tres subprocesos que ocurren secuencialmente en una celda de flotación.

Debido a lo anteriormente expuesto, y debido a que la calidad del agua varía al entrar el fluido en contacto con el mineral, la eficiencia de la flotación puede verse comprometida, presentando repercusiones que pueden ser tanto negativas como positivas al proceso. Luego, parece lógica la necesidad de que el tiempo en que el agua y el mineral están en contacto debe ser mínimo, de tal manera de controlar la composición química con respecto a los parámetros revisados, además de que es preferible trabajar con agua de calidad consistente o conocida con el fin de suministrar los reactivos adecuados al proceso. Sin embargo, a nivel industrial esto resulta difícil de controlar debido a las distancias que debe recorrer el agua desde la fuente hasta el lugar de formación de la pulpa, y luego la distancia que ésta recorre hasta la planta de concentración.

3. Capítulo III: Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo se consideran dos actividades principales: pruebas de flotación *batch* a escala de laboratorio y estudios de variación cíclica a la temperatura de distintas muestras de agua.

Mediante las pruebas de flotación se pretende identificar el impacto de la calidad química del agua y el envejecimiento del mineral en la eficiencia del proceso. Para esto se emplean muestras de mineral y agua con distinto tiempo de contacto entre estos, lo cual produce cambios tanto en las propiedades del agua como del mineral.

El estudio de las variaciones de temperatura se realiza con la finalidad de generar un cambio en las propiedades del agua al someter a cambios constantes y cíclicos la temperatura de la solución, y con ello deducir una comparación entre el envejecimiento en el tiempo del agua con un envejecimiento por cambios de temperatura con respecto a la calidad química de éstas. Con esto también se pretende identificar la posibilidad de un impacto en la eficiencia de la flotación producto de cambios en la temperatura del agua.

A continuación, se detalla la metodología empleada en cada estudio mencionado, lo que incluye la preparación de las muestras de agua y mineral, el procedimiento experimental para la flotación *batch* y para las pruebas de variación cíclica de la temperatura, y los análisis de los datos obtenidos.

3.1. Pruebas de flotación *batch*

3.1.1. Recepción de muestras y mediciones preliminares

Tanto las muestras de mineral como de agua empleadas fueron recibidas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias e Hidrometalurgia de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas el 06 de enero de 2021. Se consideran dos tipos de mineral y dos tipos de agua en que el tiempo de contacto entre ambas muestras es distinto. Por lo tanto, se tiene un mineral con bajo tiempo de residencia y uno con alto tiempo de residencia, identificados como *M-BTR* y *M-ATR*, respectivamente. Por otro lado, es posible identificar muestras de agua de baja fuerza iónica y alta fuerza iónica, *A-BFI* y *A-AFI*. En la Tabla 3-1 se señalan las 4 combinaciones de mineral y agua empleadas en las pruebas de flotación.

Tabla 3-1: Combinación de muestras a flotar

Combinaciones	<i>M-BTR</i>	<i>M-ATR</i>
<i>A-BFI</i>	M-BTR / A-BFI	M-ATR / A-BFI
<i>A-AFI</i>	M-BTR / A-AFI	M-ATR / A-AFI

El mineral utilizado en el estudio corresponde a un sulfuro de cobre, cuyas leyes promedio comprendidas en el período Febrero – Julio del año 2020 se presentan en la Tabla 3-2, de donde es posible apreciar que está compuesto principalmente de calcopirita y calcosina. Por otro lado, en la Tabla 3-3 se muestra la ley promedio de algunos minerales de ganga presentados durante el período indicado previamente. De esta última tabla se observa una cantidad importante de arcillas en la

composición mineralógica del mineral, principalmente pertenecientes al grupo de la clorita y moscovita. Adicionalmente, el mineral presentó durante el mes de Octubre una granulometría promedio de alimentación (P_{80}) de $226 \mu\text{m} \pm 28 \mu\text{m}$.

Tabla 3-2: Ley promedio de minerales de cobre durante año 2020

Mineral de cobre	Ley promedio [%]	Error relativo [%]
Calcosina / Digenita	0,34	11,05
Covelina	0,11	18,28
Calcopirita	1,17	14,13
Bornita	0,12	16,70
Otros	1,13	12,83

Tabla 3-3: Ley promedio de la ganga mineral durante el año 2020

Ganga mineral	Ley promedio [%]	Error relativo [%]
Pirita	2,14	18,48
Magnetita	0,41	19,27
Hematita	0,71	14,68
Cuarzo	35,65	12,94
Grupo de la Caolinita	0,41	27,91
Moscovita / Sericita	29,59	18,98
Illita	0,38	31,23
Grupo de la Esmectita	0,26	13,12
Grupo de la Clorita	3,56	9,13

En el caso del agua, mediante un análisis ICP a ambas muestras se logra determinar la concentración de especies disueltas en cada fluido. En la Figura 3-1 se presentan gráficos de concentración para las principales especies encontradas, mientras que en la Tabla 7-2 se muestran los valores de los iones presentes.

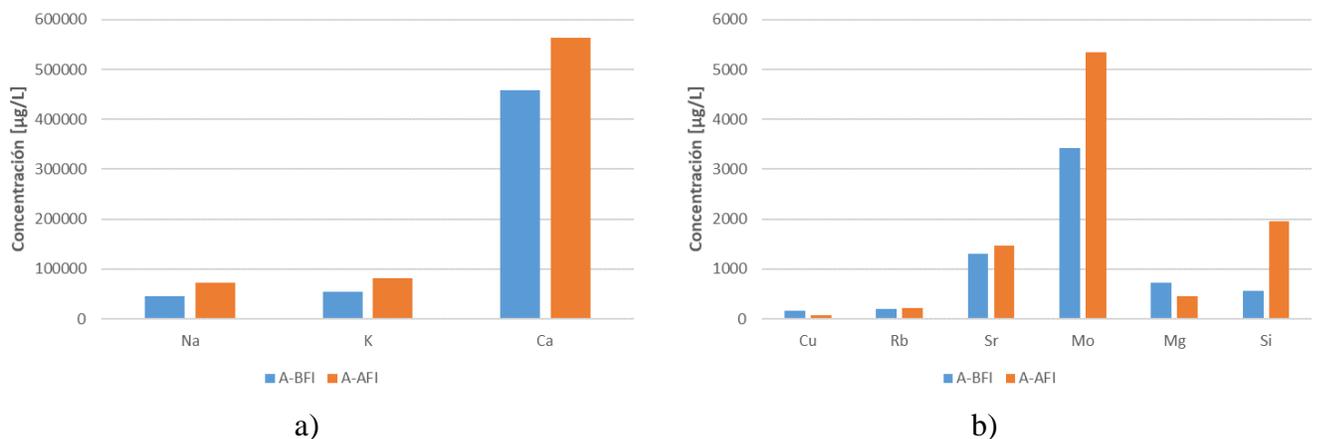


Figura 3-1: Gráficos de concentración de especies principales en muestras de agua obtenidos a partir de análisis ICP

Se aprecia que en general la concentración de especies disueltas es mayor para el agua *A-AFI*, lo cual indica una mayor disolución del mineral al estar mayor tiempo en contacto con el agua. Esto se evidencia principalmente en la concentración de calcio y silicio. Sin embargo, se debe notar que las concentraciones de cobre y magnesio presentan valores más altos para la muestra *A-BFI*. Adicionalmente, a partir de las concentraciones señaladas en la Tabla 7-2 se obtiene que la fuerza iónica es de 25,22 [mM] y 31,99 [mM] para las muestras de agua *A-BFI* y *A-AFI*, respectivamente, mostrando que la carga de iones es mayor cuanto más tiempo el agua está en contacto con el mineral.

La masa de mineral recibida para ambas muestras es de 24 [kg], por lo cual se realiza un corte a cada una con el fin de obtener submuestras de 1 [kg]. Para esto se emplea un cortador giratorio de 10 recipientes (Figura 3-2.a), con lo cual se obtienen 20 submuestras de cada tipo de mineral de aproximadamente 1,2 [kg]. Mediante análisis químico de espectroscopía de absorción atómica se determina que el contenido de cobre es de 0,776% y 0,656% para las muestras *M-BTR* y *M-ATR*, respectivamente.

En el caso de las muestras de agua, debido a que éstas se almacenan en baldes, se estudia el pH, E_h , conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales de cada una al momento de ser recibidas. Más aún, se toma nota de estas medidas por una semana de tal manera de observar la evolución de cada muestra de agua en el tiempo al estar almacenadas. El proceso de muestreo consta de una etapa previa de agitación del fluido, de tal manera que el sólido decantado se encuentre en suspensión, y de esta forma obtener muestras homogéneas. Los equipos utilizados en las mediciones se muestran en la Figura 3-2.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 3-2: Fotografías de a) cortador giratorio, b) medidor de pH, c) conductivímetro, d) turbidímetro, e) sensor de oxígeno disuelto y f) balanza analítica

La determinación de los sólidos totales se calcula a partir de la Ecuación 2-16 revisada en la sección 2.3.2. Para esto se realiza el siguiente procedimiento:

- Se pesa un vaso seco a temperatura ambiente con la balanza analítica (Figura 3-2.f).
- Se toma una muestra de agua de aproximadamente 50 [mL], la cual se almacena en el vaso previamente pesado.
- El vaso con la muestra de agua es enviado a un horno a 105 [°C] durante 3 a 4 [h], esto con la finalidad de evaporar el agua, pero evitar la fuga de sólidos volátiles.
- Una vez seco el vaso con los restos sólidos, se deja temperar a ambiente para ser pesado nuevamente con la balanza analítica.
- Ingresando las masas descritas en la Ecuación 2-16 se determina la concentración de sólidos totales en partes por millón [ppm].

3.1.2. Preparación de muestras, adición de reactivos y acondicionamiento

La celda EDEMET utilizada en las pruebas tiene un volumen de 2,7 [L] (Figura 3-3), por lo cual se decide preparar una pulpa con un volumen de 2,6 [L], a fin de evitar que ésta rebalse del equipo al generar la agitación y presentar pérdidas importantes de mineral. La masa de mineral y volumen de agua necesarios para la formación de la pulpa se estiman a partir de la Ecuación 7-4 y Ecuación 7-1, respectivamente, para un porcentaje de sólidos de 34% y el volumen de pulpa definido. De esto se obtiene que se precisan aproximadamente 2,2 [L] de agua y 1,12 [kg] de mineral. Además, se debe considerar un volumen extra de agua asociada a la reposición del fluido recuperado en el concentrado.

La muestra de mineral a flotar es escogida de manera aleatoria de entre las 20 submuestras descritas previamente, tanto para *M-BTR* como para *M-ATR*, la cual es pesada para contar con la masa de mineral requerida. En el caso del agua, el procedimiento de muestreo es similar al presentado anteriormente para las mediciones preliminares de las propiedades. Cabe destacar que estas mediciones se realizan a las muestras de agua antes de la formación de la pulpa para cada prueba.



Figura 3-3: Celda de flotación EDEMET

Como se ha mencionado, se requiere de un volumen extra de agua como reposición del agua recuperada, que en este caso de estudio corresponde a 500 [mL]. Esta muestra es llevada al pH de operación de 10,5, y adicionalmente se añade espumante de tal manera de mantener la espuma estable y constante a lo largo de la prueba. El pH de la pulpa es modificado al agregar cal en forma de lechada de cal, cuya preparación se indica más adelante en esta sección.

Posteriormente se procede a la formación de la pulpa, agregando la masa de mineral y agua dentro de la celda de flotación. Se añade la lechada de cal preparada con el agua correspondiente a aquella utilizada en la prueba hasta alcanzar el pH indicado, donde luego se adhieren los reactivos empleados por la planta de procesamiento. Estos reactivos comprenden colector, diesel y espumante, cuya dosificación se señala en la Tabla 3-4. Cabe destacar que estos se encuentran en estado líquido, por lo cual se añaden de manera directa a la pulpa, a diferencia de la cal que se debe preparar la lechada mencionada.

La lechada se prepara para un porcentaje de sólidos de 25% en peso, para lo cual se emplea la balanza analítica indicada anteriormente, de tal manera de conocer la masa de cal y agua agregada para alcanzar el porcentaje de sólidos requerido. La mezcla generada produce una reacción denominada apagado de cal, en la cual se produce hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o cal apagada, junto con la liberación de calor, razón por la cual aumenta la temperatura de la mezcla. Luego, para hacer uso de la lechada se espera a que ésta alcance la temperatura ambiente.

Tabla 3-4: Dosificación de reactivos

Reactivo	Dosificación [g/t]
Colector	36
Diesel	12
Espumante	25

Posterior a que se han añadido los reactivos y alcanzado el pH, la celda es dispuesta en el equipo para dar inicio al acondicionamiento de la pulpa, etapa en la cual los colectores reaccionan con los distintos minerales de interés para otorgar las propiedades hidrofóbicas a la superficie. El tiempo empleado para el acondicionamiento es de 5 [min], con una velocidad de rotación del impeler de 1100 [RPM].

3.1.3. Flotación y muestreo de concentrado

Culminado el tiempo de acondicionamiento, el equipo comienza a inyectar aire a la pulpa a través del impeler para propiciar la formación de la espuma y con ello la flotación del mineral. El flujo de aire administrado es de 8,1 [LPM] aproximadamente, de tal manera de tener una velocidad superficial de gas J_g de 0,6 [cm/s]. Este valor es calculado a partir de la Ecuación 7-5, teniendo presente que la celda de flotación tiene un área transversal de 225 [cm²] (15 [cm] × 15 [cm]). Análogamente a la etapa de acondicionamiento, la velocidad de rotación del impeler se mantiene en 1100 [RPM].

La recolección de concentrado considera dos factores principales, el tiempo de paleteo y el tiempo de muestreo. El tiempo de paleteo se refiere a los períodos en que se retira material desde la fase de espuma para obtener el concentrado, el cual en esta actividad corresponde a 10 [s]. Este paleteo es realizado de manera manual y procurando retirar solo el material contenido en la espuma. Por otro lado, el tiempo de muestreo se refiere al período en que se cambian los recipientes que contienen el concentrado obtenido de cada paleteo. En este trabajo los tiempos de muestreo empleado son 0,5 [min], 1 [min], 2 [min], 4 [min], 8 [min] y 16 [min]. Paralelamente a la recolección de concentrado, se debe agregar el agua de reposición preparada con la finalidad de mantener el nivel de la pulpa constante durante cada prueba de flotación.

Tanto los recipientes utilizados para la recepción del concentrado como la celda de flotación son pesados al inicio y término de las pruebas. En otras palabras, los recipientes son pesados secos y luego con el concentrado recuperado, y la celda es pesada con la alimentación y posteriormente con la cola de la flotación. Esto es ejecutado con la finalidad de determinar la masa de cada flujo obtenido en el proceso, de tal manera de generar el balance de masa y estimar las pérdidas del proceso.

3.1.4. Filtración, secado y almacenamiento de muestras

Con el objetivo de determinar la masa de sólido obtenido en los concentrados y remanente en la cola, y así también estimar la masa de agua recuperada, se efectúa un proceso de filtrado y secado de las muestras. La filtración se ejecuta empleando la configuración presentada en la Figura 3-4, donde se hace uso de papel filtro, embudos y vasos de vidrio. En este sistema, el papel filtro es depositado dentro del embudo de tal manera que, al verter las muestras de concentrado y cola en estos, el agua recuperada sea almacenada en los vasos y el sólido permanezca depositado en el papel. El agua recuperada de la cola de las pruebas se envía a los análisis de las propiedades de estudio de este trabajo.

Puesto que aun las muestras presentan un porcentaje importante de humedad posterior al proceso de filtrado, es necesario enviar éstas a un horno para su secado (60 [°C] durante 12 [h]). El objetivo de esto es eliminar el agua remanente y obtener el sólido seco, y con esto determinar la masa de sólido recuperado en el concentrado y remanente en la celda. Con estos datos y la masa de flujo obtenida en la sección anterior es posible conocer la masa de agua asociada a concentrado y cola, junto con las pérdidas asociadas.

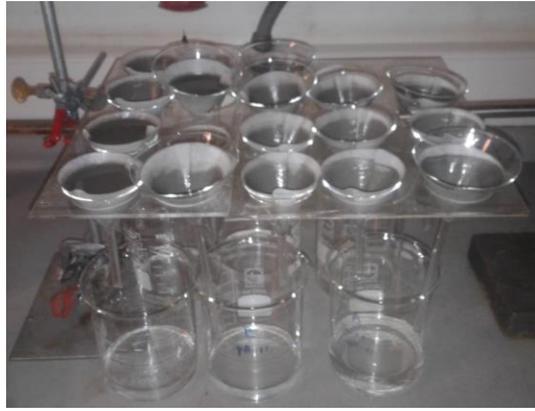


Figura 3-4: Fotografía de configuración del sistema de filtrado de las muestras de concentrado

Finalmente, cada muestra es dividida en dos empleando el microcortador giratorio presentado en la Figura 3-5. De manera aleatoria, se escoge una de estas dos muestras, la cual es enviada a análisis para determinar el contenido de cobre y con estos datos estudiar la eficiencia de cada prueba ejecutada para las combinaciones propuestas. El análisis realizado corresponde a una espectroscopía de absorción atómica, llevado a cabo por parte del Laboratorio Químico Metalúrgico MTQ Spa.



Figura 3-5: Fotografía de microcortador riffle giratorio

3.1.5. Análisis de datos

El análisis de los datos obtenidos en las pruebas de flotación es realizado mediante el software *Microsoft Excel*. Utilizando este programa se despliegan los gráficos a analizar para estudiar la eficiencia de las pruebas. En el caso de la evolución de las propiedades del agua se generan gráficos de pH, E_h , conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales en función del tiempo.

Con respecto a los parámetros relacionados con la eficiencia de las pruebas que no consideran las leyes de cobre obtenidas en el concentrado se cuenta con:

- Recuperación másica vs tiempo: la recuperación másica de cada concentrado es determinada mediante la Ecuación 2-4.
- Recuperación de agua vs tiempo: la recuperación de agua se estima a partir de la Ecuación 7-8.

A partir de las leyes de cobre obtenidas mediante el análisis de espectroscopía de absorción atómica es posible determinar la masa del metal en la alimentación, concentrados y cola, para lo cual se utiliza la Ecuación 7-6. A partir de estos datos es posible desplegar los siguientes gráficos:

- Ley acumulada en función del tiempo: determinada mediante la Ecuación 7-7.
- Razón de enriquecimiento en función del tiempo: este parámetro se calcula a partir de la relación mostrada en la Ecuación 2-5
- Ley acumulada en función de la recuperación másica y de agua.
- Razón de enriquecimiento en función de la recuperación másica y de agua.
- Recuperación metalúrgica en función del tiempo: la recuperación de cobre se determina con la Ecuación 2-3.
- Ley acumulada y razón de enriquecimiento en función de la recuperación metalúrgica.

En el caso de los distintos modelos considerados en este estudio (modelo AREV, modelos cinéticos y metodología de Smith et al. (1989) para la recuperación real de partículas hidrofóbicas) se emplea la herramienta *Solver* integrada en el programa, a partir de la cual se minimiza la raíz de la suma de diferencias cuadráticas (Ecuación 7-9) al cambiar los valores de los distintos parámetros que definen los modelos mencionados. Adicionalmente, para corroborar el buen ajuste de los modelos con los datos se hace uso del error relativo promedio entre los datos experimentales y aquellos obtenidos mediante los modelos.

El procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963) para la determinación de la fracción de componentes con distinta cinética de flotación se realiza a partir de la metodología de *splines* cúbicos, mediante la cual es posible generar distintos polinomios que se ajustan a los datos de mineral no recuperado. El procedimiento para la determinación de estos polinomios se describe en la sección 7.1.

3.2. Pruebas de cambios cíclicos de temperatura

3.2.1. Recepción y preparación de muestras de agua

Las muestras de agua utilizadas en las pruebas cíclicas de temperatura, a excepción del agua destilada, fueron otorgadas por parte de la División Andina de Codelco y recibidas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias e Hidrometalurgia de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas el 11 de noviembre de 2019.

Los tres tipos de agua utilizadas durante las pruebas corresponden a agua destilada, agua fresca y agua recuperada de procesos de la faena (Figura 3-6). El agua destilada es preparada en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile, mientras que el agua fresca proviene de la línea de agua fresca de la Cordillera utilizada por la División Andina, y el agua recuperada de los procesos de recuperación de agua, correspondiente a la línea del tranque Ovejería, espesadores de relave y de concentrado. Análogamente a las muestras de agua empleadas en las pruebas de flotación, se miden las propiedades de pH, E_h , conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales para cada una estas aguas al momento de ser recibidas en el laboratorio.



Figura 3-6: Fotografía de muestras de agua destilada, agua fresca y agua recuperada (de izquierda a derecha)

En esta prueba se consideran muestras de un volumen de 700 [mL] para cada tipo de agua, las cuales son muestreadas de manera similar al procedimiento descrito para el estudio anterior, en que es necesario la agitación de cada agua para que el sólido depositado, principalmente en el caso del agua recuperada, se encuentre en suspensión y se obtengan muestras homogéneas. Previo a comenzar los ciclos, es necesario llevar estas soluciones al pH de estudio, que en este caso corresponde a un pH de 11, lo cual se realiza mediante la adición de cal viva. Paralelamente se genera una curva de pH en función de la masa de cal agregada para los tres tipos de agua. Estas muestras son preparadas en vasos de 800 [mL], los cuales según su rotulación presentan distintos usos dentro del procedimiento:

- La solución del vaso A se mantiene a temperatura ambiente durante la totalidad de las pruebas.
- La solución del vaso B corresponde al agua en que se generan los cambios de temperatura.
- La solución del vaso C corresponde a agua de reposición para ambos vasos, producto de pérdidas por evaporación y de muestreo. Esta solución se debe mantener constantemente al pH indicado.

3.2.2. Variación de la temperatura

Antes de comenzar con las pruebas experimentales de cambio de temperatura, se realizan las mediciones a las propiedades de las soluciones de los vasos A y B, a excepción de las mediciones de oxígeno disuelto y sólidos totales, los cuales se realizan al término de cada ciclo. Posteriormente, se comienza con la variación de temperatura, para lo cual se considera el procedimiento detallado a continuación:

- Se posa el vaso B sobre el equipo *Hotplate Stirrer* (Figura 3-7.a), mediante el cual se eleva la temperatura hasta alcanzar los 70 [°C] con una agitación constante de la solución.
- Una vez alcanzado los 70 [°C], el agua se vierte en un recipiente plástico sumergido en hielo, de tal manera de disminuir de manera rauda la temperatura del agua hasta alcanzar 10 [°C].
- Al obtener la temperatura de 10 [°C], el agua es devuelta al vaso B.
- Se repite este proceso hasta realizar 2 ciclos.



a)



b)

Figura 3-7: Fotografía de a) Hotplate Stirrer y b) configuración de nitrógeno gaseoso

Al finalizar el procedimiento, se procede a medir nuevamente los parámetros mencionados. Es necesario destacar que en este estudio, debido a que las muestras son de menor volumen, ocurre una constante entrada y salida de oxígeno de la solución, por lo cual se inyecta nitrógeno gaseoso en la superficie de la muestra de tal manera de evitar esta dinámica (Figura 3-7.b). Finalmente, cada vaso es cubierto con papel *Parafilm* hasta su próxima utilización.

Previo a efectuar un nuevo ciclo de temperatura con un agua ya en estudio, se requiere alcanzar el volumen de agua definido como base. Para esto se considera el vaso C, el cual como se ha mencionado es mantenido a pH constante. De esta muestra se extrae la cantidad de agua necesaria para que las soluciones de los vasos A y B alcancen el volumen de 700 [mL].

Análogamente al estudio de flotación, para generar los gráficos de evolución de las propiedades en función del tiempo se emplea el software *Microsoft Excel*.

4. Capítulo IV: Resultados y discusión

4.1. Pruebas de flotación

4.1.1. Mediciones preliminares a muestras de agua

Puesto que las muestras de agua se almacenan en baldes cerrados a temperatura ambiente, se realiza un seguimiento de las propiedades de cada una para conocer la evolución de éstas en el tiempo. En los gráficos de la Figura 4-1 se presentan las curvas obtenidas de las propiedades a estudiar: pH, E_h , conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales.

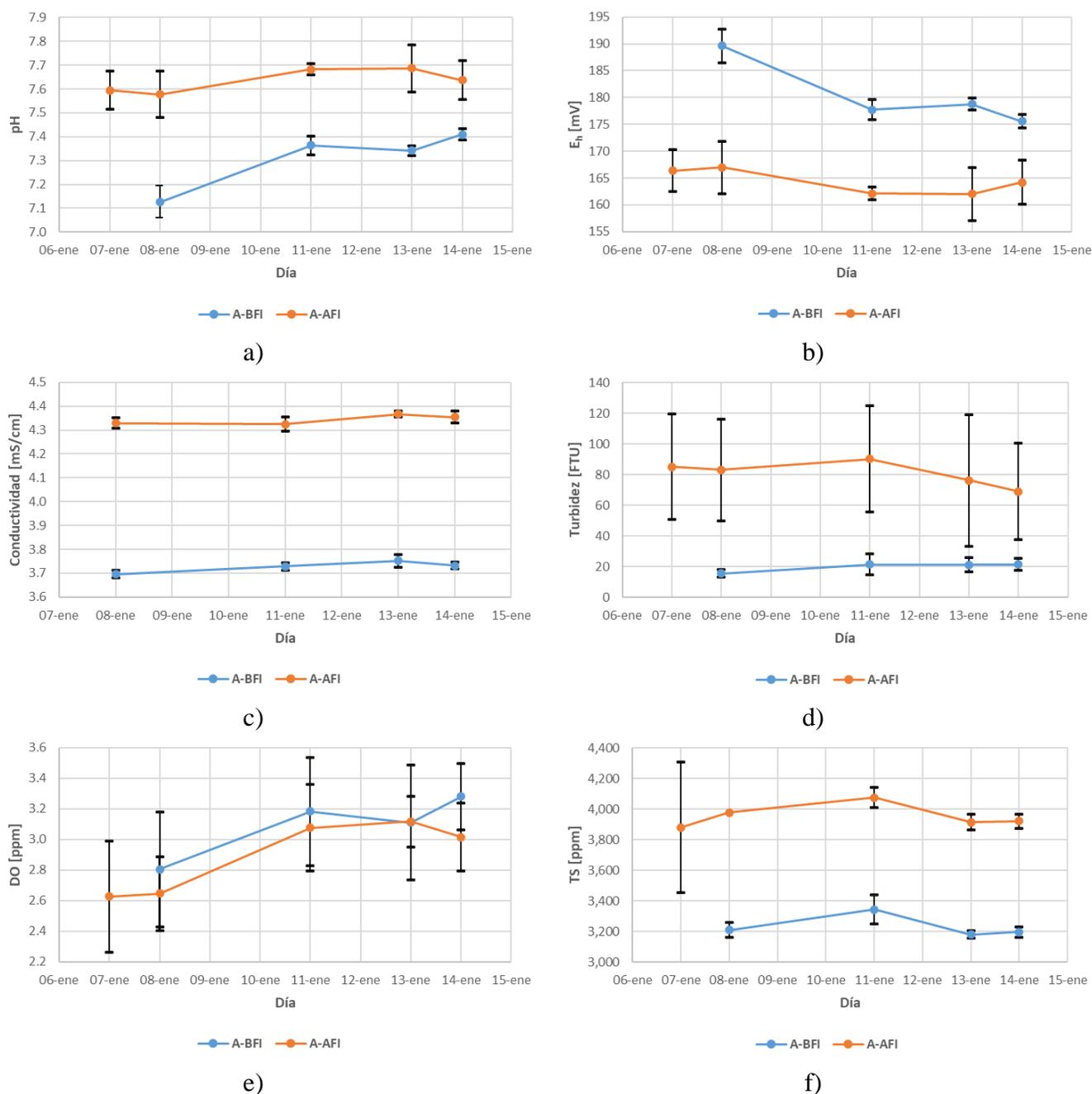


Figura 4-1: Evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad eléctrica, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales promedio en el tiempo a temperatura ambiente

Es evidente que las propiedades difieren entre los dos tipos de agua. Esto pone en manifiesto que la calidad química del agua evoluciona al entrar el fluido en contacto con el mineral. Es posible apreciar que el agua de alta fuerza iónica (*A-AFI*) presenta valores de pH más altos que el agua de baja fuerza iónica (*A-BFI*), probablemente producto de la cal adicionada para el control del pH de la pulpa y la mayor concentración de Ca^{2+} . Por consiguiente, a causa de la relación inversa entre el pH y el E_h , los valores para el potencial son superiores para la muestra de agua *A-BFI*. Adicionalmente, se debe notar una diferencia en la conductividad eléctrica entre 0,5 y 0,7 [mS/cm], siendo el agua *A-AFI* la muestra con los valores mayores. Esta diferencia en conductividad se condice con la concentración de especies disueltas (Figura 3-1) y fuerza iónica determinada en la sección previa para ambas muestras de agua causada por el distinto tiempo de contacto entre el mineral y el fluido. Paralelamente, esta liberación de iones conlleva a un aumento en la turbidez del fluido, puesto que aumenta la salinidad del agua, y una concentración de sólidos totales (disueltos y suspendidos) superior. Esto último se ve reflejado en los gráficos de oxígeno disuelto, en donde la curva para *A-BFI* se encuentra sobre la curva de *A-AFI*, es decir, la disolución de oxígeno es menor en este último tipo de agua producto de que la saturación de oxígeno disuelto disminuye con la salinidad. Esto además se condice con las diferencias de E_h , ya que a menor oxígeno disuelto, menor es el potencial de oxidación.

En la Tabla 4-1 se indican los valores iniciales de las mediciones (al momento de ser recibidas) y finales (antes de comenzar con las pruebas de flotación) del promedio de las muestras de agua *A-BFI* y *A-AFI*. Es posible notar que las mayores diferencias se observan en la turbidez y el oxígeno disuelto para ambas muestras de agua. Esto podría indicar un error al momento de muestrear los tipos de agua, por lo cual la cantidad de sólidos totales también debiese verse afectada. No obstante, se aprecia que la diferencia mayor es de 1,03% para el agua *A-AFI*, por lo cual no puede estar asociada a error de muestreo, sino más bien a un error de medición.

Tabla 4-1: Valores promedio inicial y final de aguas *A-BFI* y *A-AFI*

	<i>A-BFI</i>			<i>A-AFI</i>		
	08-ene	14-ene	Diferencia [%]	07-ene	14-ene	Diferencia [%]
<i>pH</i>	7,13	7,41	3,99	7,60	7,64	0,56
<i>E_h [mV]</i>	189,60	175,58	-7,39	166,33	164,20	-1,28
<i>Conductividad [mS/cm]</i>	3,70	3,73	0,97	4,33	4,36	0,58
<i>Turbidez [FTU]</i>	15,57	21,31	36,89	85,16	69,02	-18,94
<i>Oxígeno disuelto [ppm]</i>	2,80	3,28	17,05	2,63	3,02	14,75
<i>Sólidos totales [ppm]</i>	3208	3196	-0,37	3880	3920	1,03

A partir de estos resultados es posible inferir que las flotaciones realizadas con el agua *A-AFI* pueden presentar una eficiencia menor, en términos de ley de cobre, a aquellas efectuadas con *A-BFI*. Esto es esperable puesto que, de acuerdo con las distintas investigaciones indicadas en la sección 2.3, se sabe que a mayor fuerza iónica mayor es la recuperación de agua en el concentrado,

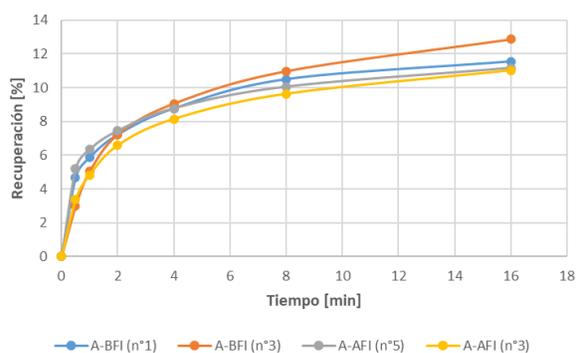
y por ende ocurre un mayor arrastre de especies, entre los cuales se considera la ganga mineral, lo que finalmente se traduce en una disminución de la ley del mineral valioso en el concentrado. Con respecto a la recuperación metalúrgica de cobre obtenida para el agua *A-AFI*, es posible esperar una mayor cinética de flotación, producto de que a mayor carga iónica se obtienen burbujas de menor tamaño debido a que se evita la coalescencia de éstas, lo cual aumenta la tasa de colisión entre partículas y burbujas, y por lo tanto aumenta la probabilidad de formación del agregado; o bien que sea menor, puesto que ocurra el fenómeno de *slime coating* por la cantidad de sólidos totales.

4.1.2. Recuperación másica y de agua

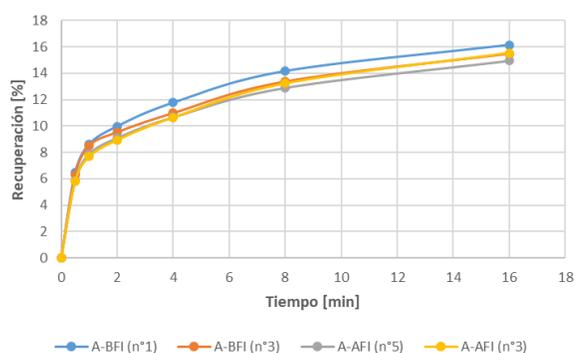
Cada combinación propuesta entre las muestras de mineral y agua se itera dos veces, de tal manera de observar resultados constantes. En primer lugar, se estudian los resultados de la recuperación másica de concentrado para cada flotación, cuyos valores se muestran en la Tabla 4-2, y de manera gráfica en la Figura 4-2.

Tabla 4-2: Recuperación másica de los concentrados

Tiempo [min]	M-BTR [%]				M-ATR [%]			
	A-BFI (n°1)	A-BFI (n°3)	A-AFI (n°5)	A-AFI (n°3)	A-BFI (n°1)	A-BFI (n°3)	A-AFI (n°5)	A-AFI (n°3)
0,5	4,69	2,99	5,21	3,36	6,48	6,31	5,88	5,84
1	5,87	5,05	6,35	4,84	8,63	8,52	7,89	7,68
2	7,22	7,24	7,45	6,59	9,98	9,54	9,10	8,94
4	8,77	9,06	8,78	8,14	11,77	10,98	10,66	10,64
8	10,50	10,98	10,06	9,63	14,16	13,37	12,90	13,23
16	11,55	12,86	11,17	11,02	16,14	15,48	14,94	15,53



a)



b)

Figura 4-2: Gráficos de recuperación másica del mineral a) *M-BTR* y b) *M-ATR* en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Se aprecia que las pruebas llevadas a cabo con las muestras del mineral de bajo tiempo de residencia (*M-BTR*) presentan recuperaciones másicas similares. De manera análoga ocurre para aquellas pruebas correspondientes al mineral de alto tiempo de residencia (*M-ATR*), siendo los valores ligeramente más constantes para las flotaciones realizadas con este tipo de mineral. En la Tabla 4-3

se presenta el error relativo para los valores de recuperación másica, en la cual se observa lo anteriormente indicado, en que la desviación estándar es mayor en el caso de las pruebas efectuadas con el mineral *M-BTR*, para ambas muestras de agua, siendo máximo en las muestras de concentrado recuperado en el primer minuto de la flotación (concentrado 1 y concentrado 2). Puesto que las condiciones de flotación son las mismas, este hecho puede indicar que la cantidad de mineral que flota rápidamente es más variable en este tipo de mineral.

Tabla 4-3: Error relativo de la recuperación másica

Concentrado n°	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
1	22,23	21,51	1,26	0,33
2	7,54	13,55	0,62	1,34
3	0,11	6,14	2,28	0,89
4	1,67	3,77	3,46	0,12
5	2,25	2,18	2,87	1,27
6	5,40	0,69	2,09	1,92

De la Figura 4-3.a es posible notar dos conjuntos de curvas asociadas a los dos tipos de muestras de mineral, en donde las curvas superiores (curvas segmentadas) corresponden a la recuperación másica del mineral *M-ATR*, mientras que las inferiores (curvas continuas) pertenecen a los resultados del mineral *M-BTR*. Se evidencia que las muestras de mineral y agua con menos tiempo de contacto presentan recuperaciones másicas menores a aquellas combinaciones de muestras con mayor tiempo de contacto. Posiblemente el factor causante de esto es la fuerza iónica del agua *A-AFI* que, como ha sido mencionado, al ser más alta es probable que presente una recuperación por arrastre mayor de especies que el agua *A-BFI*. En consecuencia, es de esperar que la recuperación de agua en el concentrado de *A-AFI* sea mayor que la de *A-BFI*, junto con leyes menores de cobre.

Al analizar el promedio de las recuperaciones másicas (Figura 4-3.b), cabe notar que la recuperación es menor para la combinación de muestras con menos tiempo de contacto que para la combinación de muestras con más tiempo de contacto, resultado planteado anteriormente. Sin embargo, es posible observar que la prueba *M-BTR / A-AFI* presenta una recuperación másica ligeramente menor, mientras que la recuperación de la prueba *M-ATR / A-BFI* es ligeramente mayor. En otras palabras, para cada tipo de mineral, la recuperación es mayor al emplear el agua con menor tiempo de contacto, es decir el agua con menor concentración de iones. Esto contradice a lo indicado para la relación entre fuerza iónica y recuperación másica, por lo cual se intuye que el mineral puede ser responsable de este comportamiento.

Un aspecto importante a notar es que al momento de comenzar la flotación se observa que la altura de la espuma es mayor para las muestras de mineral *M-ATR*, lo que incluso conlleva a que ésta rebalse rápidamente, traduciéndose en los altos valores de recuperación másica. Para explicar este hecho se puede tener en consideración la viscosidad de la pulpa. En la sección 2.3.2 se muestra que al aumentar la viscosidad de la pulpa, la altura de la espuma también aumenta. Esto puede indicar que, debido al contenido de material fino que presenta el mineral *M-ATR*, en las condiciones operacionales de pH y E_h empleadas, se produce una agregación de partículas que se traducen en

una pulpa más viscosa en comparación con la obtenida para las combinaciones con mineral *M-BTR*.

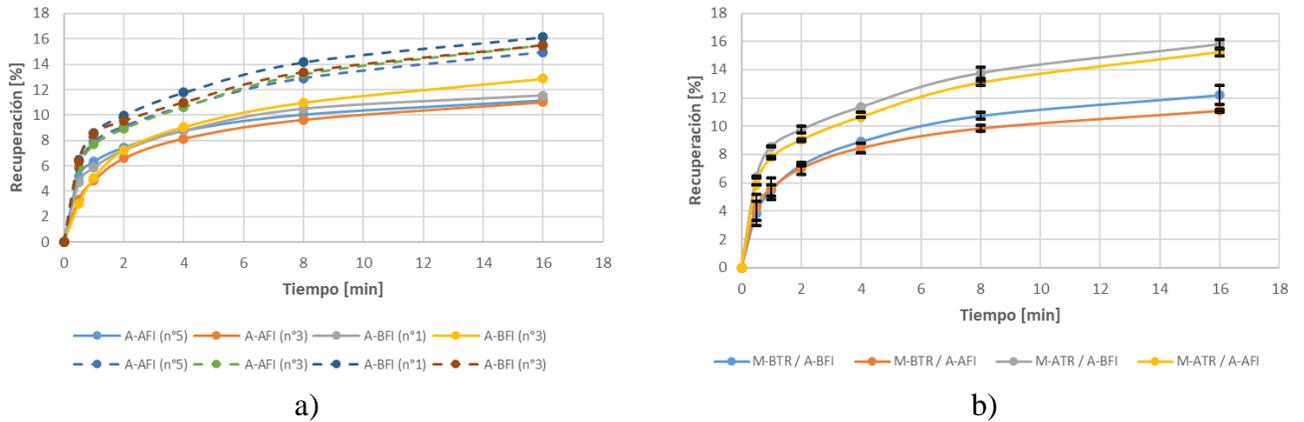


Figura 4-3: Gráficos de recuperación másica de a) cada combinación y b) promedio en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Para verificar que la recuperación de agua es superior al flotar con *A-AFI* se tienen los datos de la Tabla 4-4, los cuales se visualizan de manera gráfica en la Figura 4-4.a, donde las curvas segmentadas corresponden a la recuperación de *A-BFI*, mientras que el resto corresponden a la recuperación de *A-AFI*.

Tabla 4-4: Recuperación de agua en los concentrados

Tiempo [min]	<i>M-BTR</i> [%]				<i>M-ATR</i> [%]			
	<i>A-BFI</i> (n°1)	<i>A-BFI</i> (n°3)	<i>A-AFI</i> (n°5)	<i>A-AFI</i> (n°3)	<i>A-BFI</i> (n°1)	<i>A-BFI</i> (n°3)	<i>A-AFI</i> (n°5)	<i>A-AFI</i> (n°3)
0,5	7,14	2,88	7,46	3,19	10,16	9,43	9,24	9,00
1	9,23	6,07	9,34	5,24	14,33	13,48	13,02	12,38
2	12,95	10,60	12,22	8,58	18,25	16,01	16,80	16,07
4	19,57	16,89	17,81	15,19	24,80	20,79	22,67	21,88
8	29,39	29,90	25,69	27,37	34,92	30,56	32,44	33,19
16	36,18	44,40	33,37	39,56	43,58	40,92	41,53	43,74

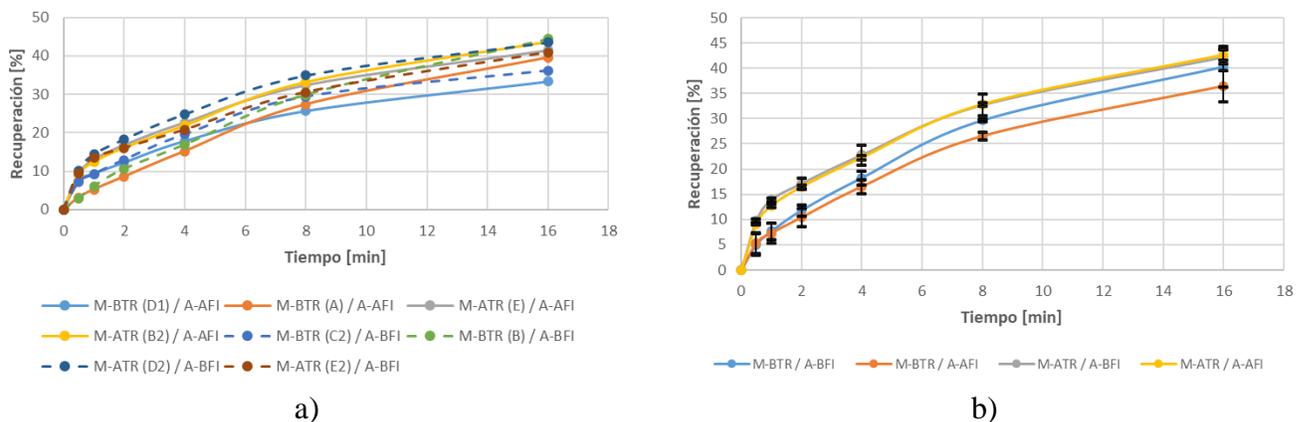


Figura 4-4: Gráficos de recuperación de agua de a) cada combinación y b) promedio en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

A simple vista no se observa una tendencia clara como en el caso de los gráficos de recuperación másica. No obstante, al graficar el promedio de las iteraciones de cada combinación, cuyas curvas se presentan en la Figura 4-4.b, es posible apreciar que la combinación de muestras de mineral y agua con menos tiempo de contacto presenta una menor recuperación de agua que la combinación de muestras con más tiempo de contacto, por lo que se corrobora lo planteado. Sin embargo, es necesario notar que la recuperación de agua mínima está asociada a las pruebas *M-BTR / A-AFI*, combinación que también presenta la menor recuperación másica, contradiciendo nuevamente a lo planteado para el agua con mayor fuerza iónica. Se aprecia además que la recuperación de agua para la combinación con mineral *M-ATR* parece no estar controlada por el tipo de agua, siendo similar tanto para la muestra *A-BFI* y *A-AFI*. Estos dos aspectos parecen indicar que la recuperación de agua no depende de la conductividad o fuerza iónica del fluido, sino de otras causas que se siguen estableciendo.

En el gráfico de la Figura 4-5 se presenta la relación de la recuperación másica con respecto a la recuperación de agua. Se aprecia que a medida que aumenta la recuperación del fluido en el concentrado, la recuperación másica también aumenta, comportamiento esperado del proceso. Comparando las combinaciones *M-BTR / A-BFI* y *M-ATR / A-AFI* se observa que, para un mismo valor de recuperación de agua, la recuperación másica es mayor para la combinación con mayor tiempo de contacto. En general, se debe notar que la recuperación másica es mayor para las pruebas realizadas con el mineral *M-ATR*.

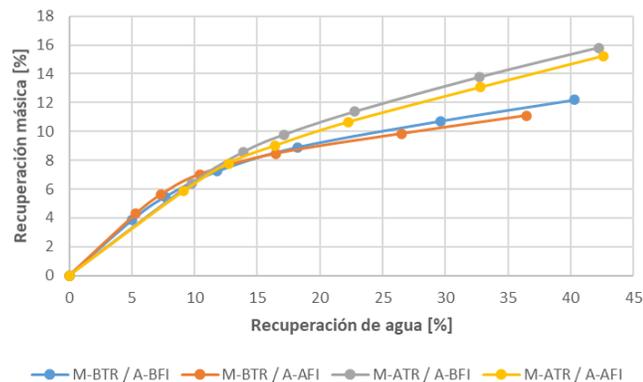


Figura 4-5: Gráfico de recuperación másica promedio en función de la recuperación de agua promedio ($C_p = 34\%$; $J_g = 0,6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En la Tabla 4-5 se presentan los valores de conductividad inicial de cada muestra de agua empleada en las combinaciones, mientras que en la Figura 4-6 se presenta la recuperación másica y de agua obtenida para cada prueba en función de la conductividad correspondiente. Se nota que tanto la recuperación másica como la recuperación de agua mayores ocurren para las conductividades de 3,77 [mS/cm] y 4,36 [mS/cm], con la excepción de que el agua recuperada presenta un máximo para una conductividad de 3,75 [mS/cm] perteneciente al agua utilizada en la combinación *M-ATR / A-BFI*. Además, los valores mínimos obtenidos para la recuperación másica y de agua están asociados con la muestra de agua *A-AFI*, con una conductividad de 4,31 [mS/cm], resultado contrario a lo esperado con respecto a la fuerza iónica de la solución.

Tabla 4-5: Valores de conductividad inicial de las muestras de agua

Muestra	M-BTR				M-ATR			
	A-BFI (n°1)	A-BFI (n°3)	A-AFI (n°5)	A-AFI (n°3)	A-BFI (n°1)	A-BFI (n°3)	A-AFI (n°5)	A-AFI (n°3)
Conductividad [mS/cm]	3,82	3,75	4,31	4,34	3,77	3,75	4,32	4,36

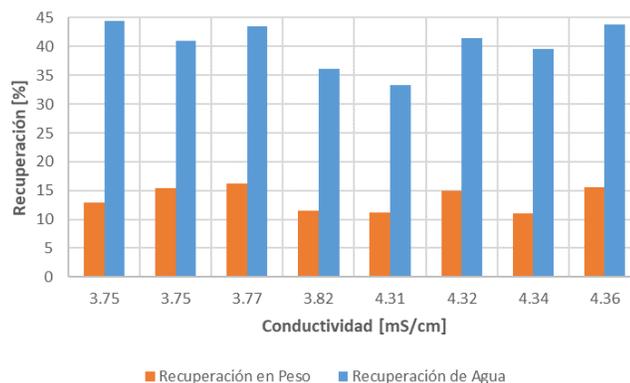


Figura 4-6: Gráfico de recuperación másica y recuperación de agua en función de la conductividad del agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

De cada combinación se escoge una muestra de manera aleatoria para ser enviadas a análisis químico y determinar el contenido de cobre. Las combinaciones escogidas corresponden a *M-BTR / A-BFI (n°1)*, *M-BTR / A-AFI (n°5)*, *M-ATR / A-BFI (n°3)* y *M-ATR / A-AFI (n°3)*. La recuperación másica y de agua para cada muestra se presentan en los gráficos de la Figura 4-7, junto con el gráfico de recuperación másica en función de la recuperación de agua en la Figura 4-8. De estos gráficos es posible apreciar comportamientos similares a los descritos anteriormente.

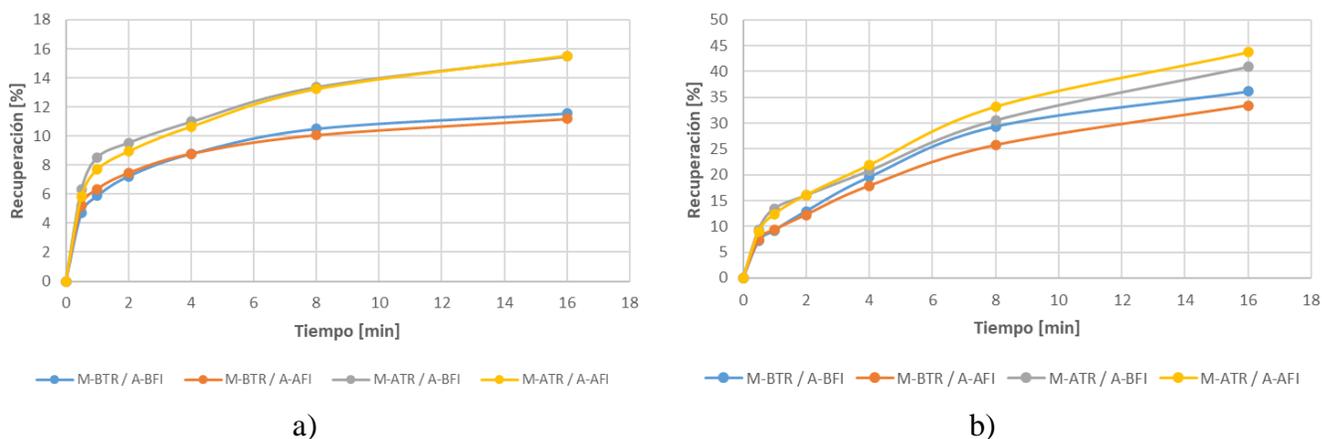


Figura 4-7: Gráficos de a) recuperación másica y b) recuperación de agua de las muestras escogidas en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

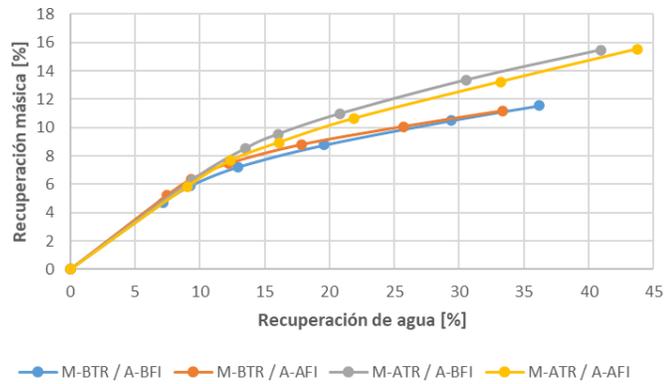


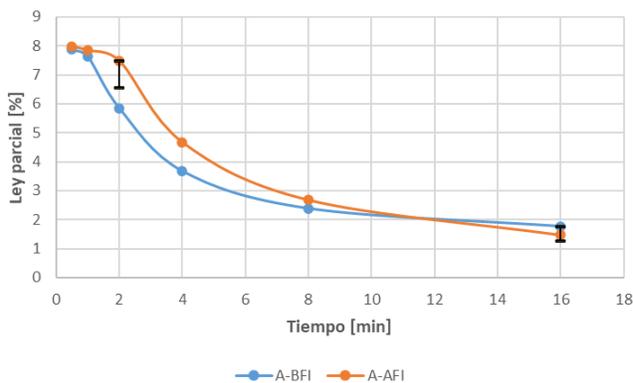
Figura 4-8: Gráfico de recuperación másica en función de la recuperación de agua de las muestras escogidas ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

4.1.3. Ley de cobre y razón de enriquecimiento

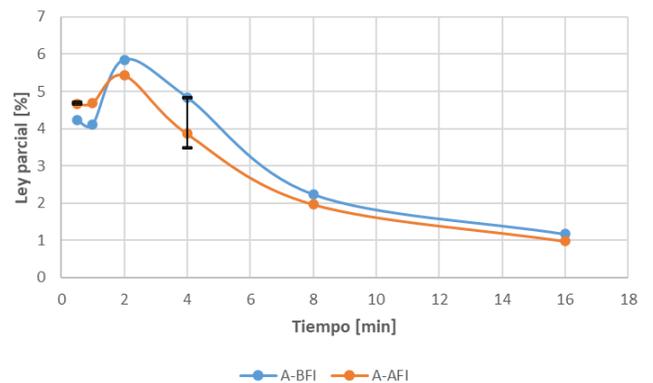
En la Figura 4-9 se muestra de manera gráfica el contenido parcial de cobre en los concentrados de las muestras escogidas. Se aprecia que la desviación de estos datos aumenta a medida que se desarrolla la flotación del mineral. En la Tabla 4-6 se señalan los valores del error relativo de las leyes parciales, en donde se nota lo enunciado anteriormente.

Tabla 4-6: Error relativo de las leyes parciales de cobre en concentrado

Tiempo [min]	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
0,5	-	-	-	0,43
2	-	6,70	-	-
4	-	-	16,35	-
16	16,56	-	-	-



a)



b)

Figura 4-9: Gráficos de ley parcial de cobre en concentrado del mineral a) M-BTR y b) M-ATR en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En la Tabla 4-7 se señalan los valores para la ley acumulada de cobre. Es posible notar que el contenido de cobre es máximo en el primer concentrado correspondiente a las pruebas desarrolladas con las muestras de mineral *M-BTR*, a diferencia del mineral *M-ATR* en que la ley máxima se obtiene a los 4 [min] para la combinación con agua *A-BFI* y a los 2 [min] para la combinación con agua *A-AFI*.

Tabla 4-7: Ley acumulada de cobre de las pruebas

Tiempo [min]	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
0,5	7,87	7,99	4,24	4,67
1	7,82	7,96	4,20	4,68
2	7,45	7,89	4,38	4,78
4	6,79	7,41	4,44	4,64
8	6,06	6,81	4,05	4,12
16	5,67	6,28	3,65	3,65

La razón de enriquecimiento de cada concentrado se presenta en la Tabla 4-8. De manera similar a lo expuesto anteriormente, la razón de enriquecimiento es mayor en el primer concentrado (0,5 [min]) en el caso de las combinaciones con mineral *M-BTR*, y máximo a los 4 [min] y 2 [min] para las combinaciones *M-ATR / A-BFI* y *M-ATR / A-AFI*, respectivamente.

Tabla 4-8: Razón de enriquecimiento de las pruebas

Tiempo [min]	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
0,5	10,39	10,02	6,56	7,20
1	10,33	9,99	6,50	7,21
2	9,84	9,90	6,77	7,38
4	8,96	9,29	6,87	7,15
8	8,00	8,54	6,26	6,35
16	7,48	7,88	5,65	5,63

De los gráficos presentados en la Figura 4-10 se aprecia lo planteado anteriormente, en que a medida que transcurre el tiempo tanto la ley acumulada como la razón de enriquecimiento disminuyen independiente de la combinación de muestras de mineral y agua utilizada, siendo máxima en el primer minuto de la flotación para el mineral *M-BTR*, y máxima entre los minutos 2 y 4 para el mineral *M-ATR*. Cabe notar además que para ambas muestras de mineral, la razón de enriquecimiento es mayor en las pruebas realizadas con agua *A-AFI*, salvo en el primer minuto de flotación del mineral *M-BTR*, en que la razón es mayor para el agua con menos tiempo de contacto. Esto se debe a que la ley de alimentación de la muestra de mineral empleada en la combinación *M-BTR / A-AFI* es ligeramente superior a la de la muestra empleada en la combinación *M-BTR / A-BFI*, por lo que se observa una razón de enriquecimiento relativamente menor.

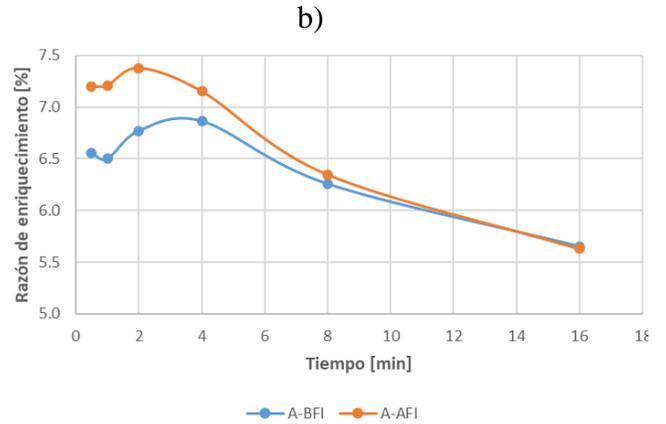
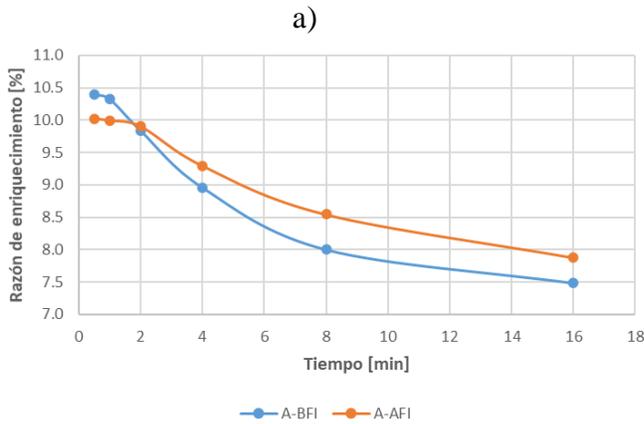
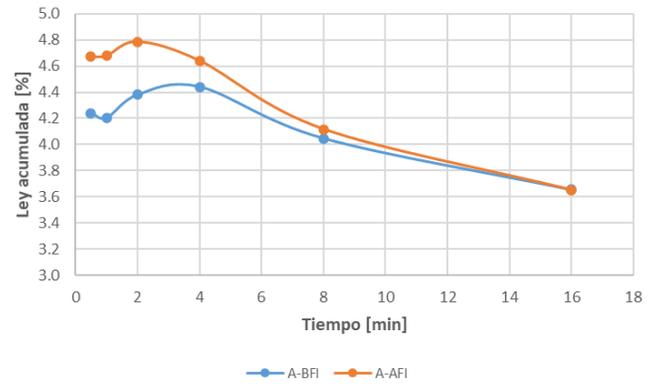
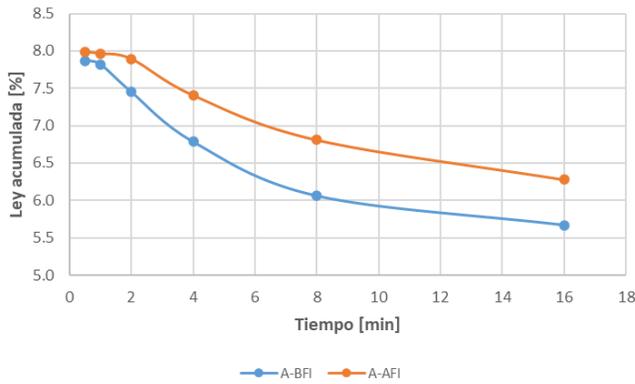


Figura 4-10: Gráficos de a) ley acumulada del mineral M-BTR, b) ley acumulada del mineral M-ATR, c) razón de enriquecimiento del mineral M-BTR y d) razón de enriquecimiento del mineral M-ATR en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Por otro lado, de los gráficos de la Figura 4-11 y Figura 4-12 se corrobora el resultado propuesto en que las pruebas de flotación con mayor recuperación másica y de agua presentan los concentrados con menor ley de cobre, asociada a la posible recuperación de ganga.

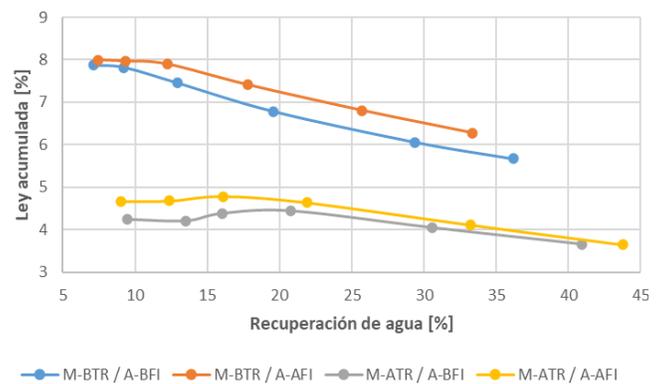
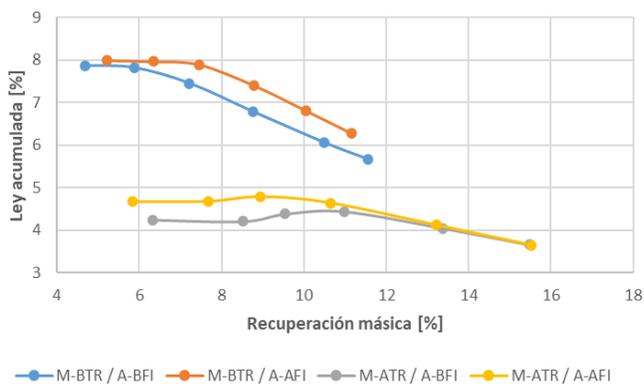


Figura 4-11: Gráficos de ley acumulada en función de a) recuperación másica y b) recuperación de agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

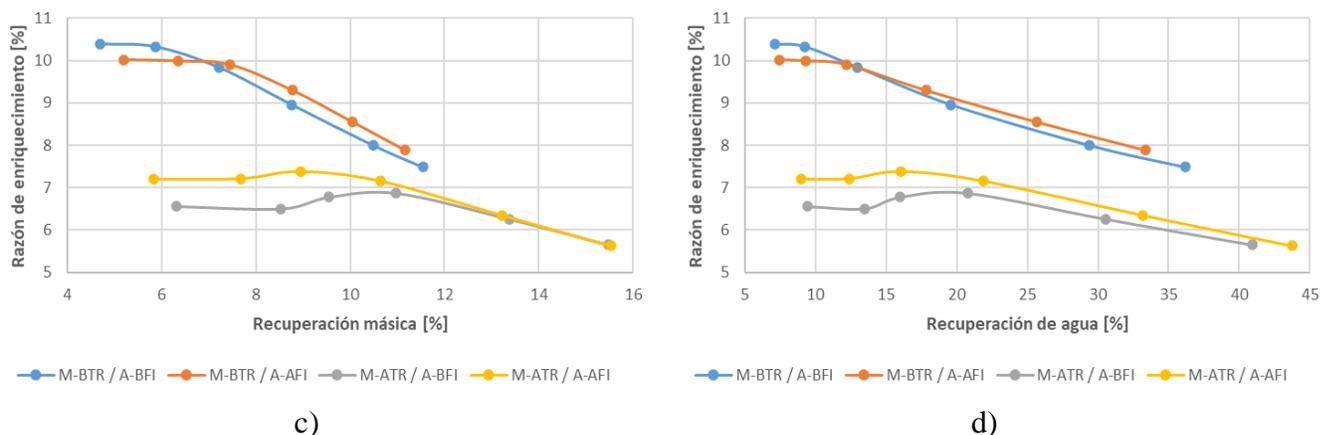


Figura 4-12: Gráficos de razón de enriquecimiento en función de a) recuperación másica y b) recuperación de agua ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

El hecho de que la ley de cobre obtenido en las pruebas con muestras *M-ATR* no sea estrictamente decreciente puede ocurrir debido a un mayor arrastre de ganga en los tiempos iniciales de las pruebas. En particular, puesto que la espuma rebalsa inmediatamente al comenzar la flotación, una alta cantidad de ganga se recupera en el concentrado, haciendo que la ley en el primer minuto sea menor a la esperada. Luego, al estabilizarse la espuma en los minutos siguientes, la recuperación de ganga en el concentrado es relativamente menor, razón por la cual se observa un aumento de la ley y posteriormente el comportamiento esperado de este parámetro en el tiempo. Como este fenómeno de rebalse de espuma no se observa en el caso de las flotaciones con mineral *M-BTR*, se intuye que la recuperación de ganga por arrastre es menor, obteniéndose leyes más altas en los primeros minutos y el comportamiento decreciente esperado de la ley.

En síntesis, la combinación de muestras de mineral y agua con menor tiempo de contacto presenta leyes de cobre mayor en comparación a las muestras con mayor tiempo de contacto, resultado postulado en este trabajo. Sin embargo, se debe tener en consideración de que para cada tipo de mineral, la ley acumulada mayor se encuentra asociada al agua *A-AFI*, lo cual difiere de los resultados esperados, ya que a mayor fuerza iónica mayor arrastre de especies al concentrado. Esto puede indicar que la mayor concentración de algunos iones, como Ca^{2+} , propician la depresión de la ganga mineral. Paralelamente, se debe tener en consideración el hecho de que las menores leyes se encuentran asociadas al mineral *M-ATR*. Es posible intuir que, producto del mayor tiempo de contacto entre el mineral y el agua, puede haber ocurrido la adsorción de otras especies en la superficie de éste, por ejemplo de partículas arcillosas. Sin embargo, en el caso de que el responsable sea material arcilloso o particulado fino, estos debiesen encontrarse en las muestras de agua *A-AFI*, por lo cual en el caso de ocurrir *slime coating*, las leyes obtenidas en las pruebas de flotación asociadas a esta muestra de agua debiesen ser menores, lo cual se contradice con los resultados observados en los gráficos estudiados previamente. Otra posible explicación a este fenómeno es que producto del mayor tiempo de contacto con el agua se produzca una oxidación superficial del mineral, haciendo que la cantidad de óxidos o hidróxidos del metal aumente en la superficie, impidiendo que el colector se adsorba sobre éste. Luego, la recuperación por flotación real del mineral hidrofóbico disminuye. Esto último, sumado a una mayor recuperación por arrastre de especies, tiene como resultado que las leyes del metal sean menores en comparación con el mineral de bajo tiempo de contacto, junto con una menor recuperación en el concentrado. En la sección a continuación se estudia la recuperación metalúrgica de las pruebas.

4.1.4. Recuperación metalúrgica

A partir de los datos de ley, se estima la recuperación metalúrgica de cobre de cada prueba de flotación, cuyas curvas se presentan en la Figura 4-13. Se aprecia que la recuperación presenta valores superiores para el mineral *M-BTR* en los primeros minutos de flotación, convergiendo cada combinación a aproximadamente 87% - 88% de recuperación al final de las pruebas. Luego, se confirma que tanto la ley como la recuperación metalúrgica de cobre son mayores para las muestras de mineral y agua con menor tiempo de contacto, para los primeros 4 [min] de flotación. Se debe notar que la recuperación para el mineral *M-ATR* parece ser indiferente al tipo de agua que se emplea. Sin embargo, de la Tabla 4-9 se aprecia que la recuperación es, generalmente, levemente mayor para la prueba realizada con agua *A-AFI*.

Tabla 4-9: Valores de recuperación metalúrgica

Tiempo [min]	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
0,5	48,77	52,19	41,40	42,03
1	60,63	63,47	55,39	55,38
2	71,05	73,81	64,60	65,96
4	78,54	81,61	75,38	76,09
8	83,98	85,92	83,66	83,94
16	86,42	87,98	87,47	87,41

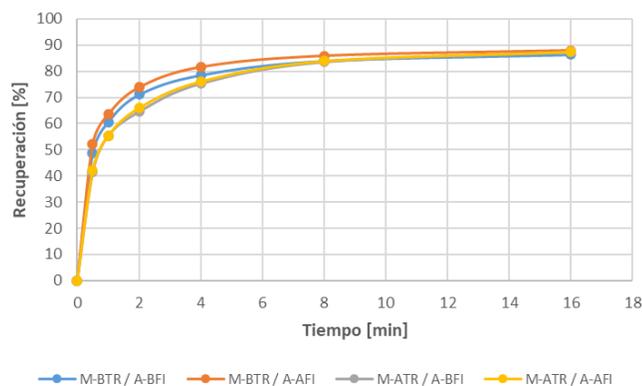


Figura 4-13: Gráficos de recuperación metalúrgica de cobre en función del tiempo ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Al observar tanto los valores mostrados en la tabla como en el gráfico, la recuperación metalúrgica es máxima para la combinación de mineral con menos tiempo de contacto y agua de mayor fuerza iónica. Luego, esta combinación presenta la mejor eficiencia del proceso, con leyes de cobre y recuperación superiores al resto de combinaciones. En los gráficos de ley acumulada y razón de enriquecimiento en función de la recuperación de cobre (Figura 4-14 y Figura 4-15, respectivamente), se presenta lo expuesto. Por lo tanto, se refuta la hipótesis planteada de que la recuperación es máxima para la combinación de muestras con menos tiempo de contacto.

En todos los gráficos es posible apreciar el comportamiento inverso que presentan la ley y la recuperación metalúrgica, en donde a medida que esta última aumenta, es decir hay mayor cantidad

de mineral que contiene cobre en el concentrado, la ley disminuye debido a que estos mismos minerales contienen otras especies que contaminan el concentrado. Se debe señalar que, al igual que en la sección anterior, el comportamiento de la ley en función de la recuperación metalúrgica para las combinaciones con mineral *M-ATR* no es estrictamente decreciente, presentando máximos para 75,38% en el caso de la flotación con agua *A-BFI* y para 65,96% para la muestra de agua *A-AFI*. Se debe destacar además que tanto en las pruebas en que se emplea *M-BTR* como con *M-ATR* se aprecia que, para los mismos valores de recuperación, la ley en el concentrado es mayor en los casos en que se realiza la flotación empleando *A-AFI*.

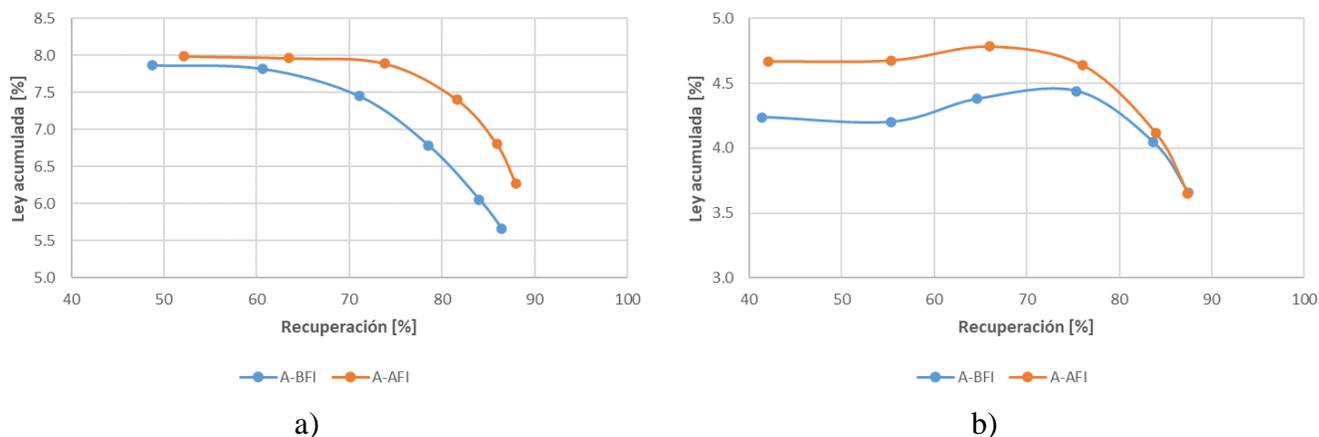


Figura 4-14: Gráficos de ley acumulada en función de la recuperación de cobre del mineral a) *M-BTR* y b) *M-ATR* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

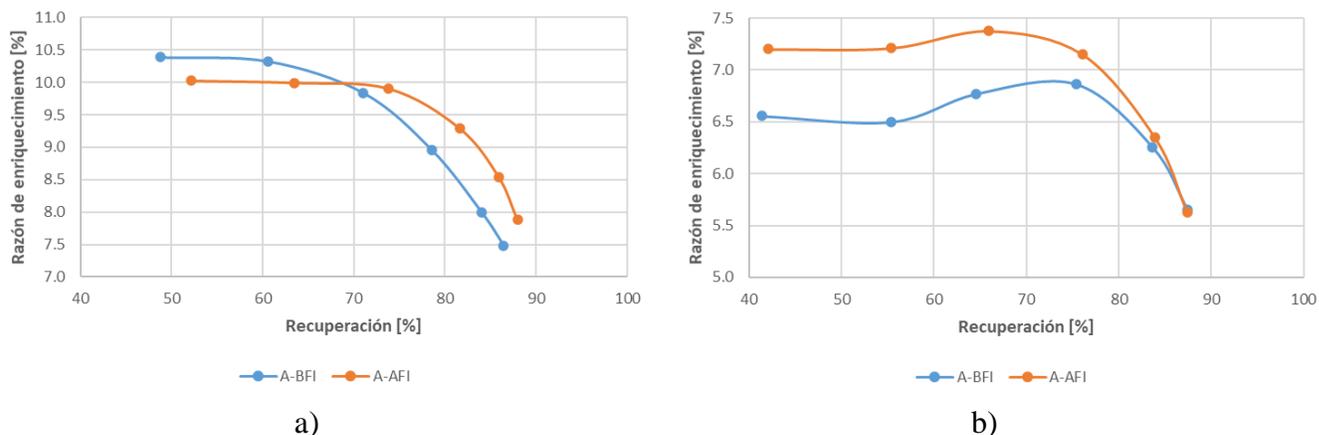


Figura 4-15: Gráficos de razón de enriquecimiento en función de la recuperación de cobre del mineral a) *M-BTR* y b) *M-ATR* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En la sección anterior se plantea que las leyes menores obtenidas en las pruebas de flotación realizadas con *M-ATR* se explican debido a la oxidación del mineral al estar mayor tiempo en contacto con el agua, lo que impide la adsorción de los colectores en la superficie mineral. Esto debiese tener como consecuencia que la recuperación metalúrgica se vea seriamente disminuida en comparación a las combinaciones con mineral *M-BTR*. No obstante, se ha observado que las recuperaciones, si bien en los primeros minutos de flotación son menores para el mineral de mayor tiempo de residencia, al final de las pruebas, es decir a los 16 [min], las recuperaciones son similares. En particular, de la Tabla 4-9 se aprecia que las recuperaciones tienen valores cercanos para los 8 [min] de flotación. Por lo tanto, en caso de existir oxidación, este efecto es importante

en los primeros minutos de flotación. Luego, se puede inferir que la explicación de este fenómeno es por la mayor recuperación de ganga por arrastre de las combinaciones con mineral *M-ATR*, principalmente en los primeros minutos producto del rebalse de la espuma.

Mediante el Modelo AREV (Figura 4-16) es posible observar el comportamiento decreciente de la razón de enriquecimiento con el aumento en la recuperación metalúrgica. En la Tabla 4-10 se presentan los valores obtenidos para los 4 parámetros que definen el modelo. Cabe notar que, tanto al visualizar las curvas junto con los puntos experimentales de los gráficos, como de los valores obtenidos para el error relativo promedio, el modelo no se ajusta de buena manera con los resultados de las pruebas realizadas con mineral *M-ATR*. Esto se aprecia aún más en los gráficos de la Figura 4-17, en donde se compara la recuperación calculada a partir de la razón de enriquecimiento según los parámetros obtenidos del modelo AREV con la recuperación experimental. Es evidente que la recuperación obtenida para las combinaciones con mineral *M-ATR* no puede ser modelada con este método, principalmente debido a que la ley de cobre en el concentrado, y por consiguiente la razón de enriquecimiento, no es estrictamente decreciente a lo largo del proceso, tal como se revisa en la sección anterior. Por otro lado, en el caso de las pruebas con mineral *M-BTR* se observa que el modelo ajusta mejor los datos, a pesar de que es posible notar ciertas desviaciones. En particular para la combinación *M-BTR / A-AFI* es posible notar que las recuperaciones calculadas se acercan más a las experimentales hacia el final del proceso, mientras que las recuperaciones iniciales presentan mayor desviación, en comparación con la combinación *M-BTR / A-BFI* en donde se aprecian puntos más cercanos a la recta.

A pesar de que el modelo no se ajusta a las combinaciones con mineral *M-ATR*, es interesante notar que el componente *b* es superior para la combinación con agua *A-AFI*, lo cual indica que con este tipo de agua la entrada de contaminantes al concentrado es mayor, observación esperada puesto que esta agua presenta una fuerza iónica mayor, con lo que el arrastre de material es superior. Por lo tanto, es de esperar leyes menores para esta combinación de mineral y agua, resultado planteado al inicio del estudio. Sin embargo, al analizar los gráficos de ley en función de la recuperación metalúrgica (Figura 4-14) se señala que las leyes son superiores para este tipo de agua.

Tabla 4-10: Valor de parámetros de Modelo AREV

Parámetros	M-BTR		M-ATR	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
<i>a</i>	1,05.E-04	1,60.E-08	2,88	6,89.E-01
<i>b</i>	1,42	2,44	0,57	0,76
<i>R*</i> [%]	85,26	87,99	100,00	100,00
<i>γ'</i> [%]	11,08	10,49	8,47	8,46
Error relativo promedio [%]	1,90	2,47	9,81	7,41

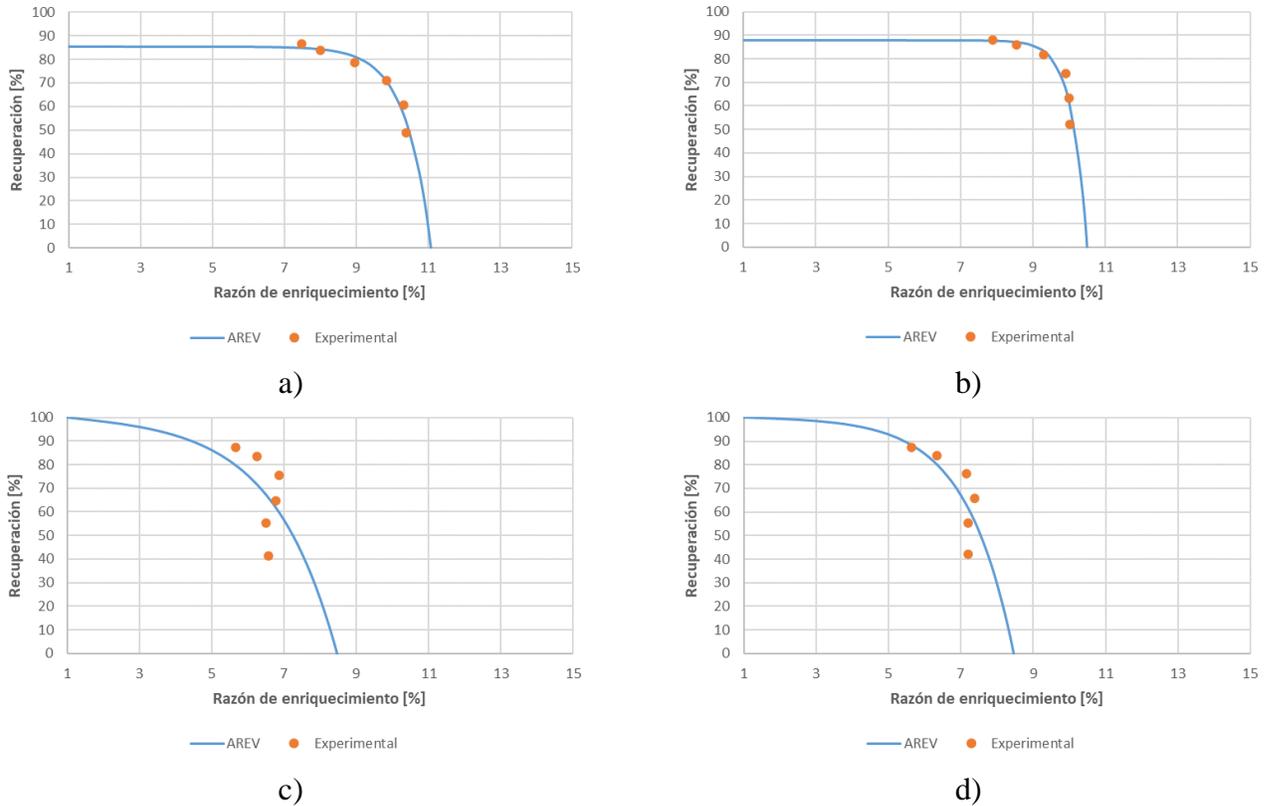


Figura 4-16: Gráficos del modelo AREV para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; $colector = 36$ [g/T]; $espumante = 25$ [g/T]; $diesel = 12$ [g/T]; $velocidad\ impeler = 1100$ [RPM])

En el caso de los resultados obtenidos para el mineral *M-BTR*, se aprecia que tanto los valores del parámetro b como R^* son mayores para la combinación con agua *A-AFI*, similar a lo indicado para el mineral con alto tiempo de residencia. Por otro lado, se observa que la razón de enriquecimiento máxima γ' y el factor a son superiores para la muestra de agua *A-BFI*. El parámetro R^* representa la cantidad de mineral flotable, lo cual indica que ésta es mayor en la combinación *M-BTR / A-AFI*, observación que se condice con los resultados mostrados anteriormente en la Tabla 4-9.

Como se mencionó, el parámetro b indica la entrada de contaminantes al aumentar la recuperación metalúrgica, lo cual puede indicar que la ley obtenida en la prueba *M-BTR / A-BFI* debiese ser mayor. Sin embargo, anteriormente se muestra que para una misma recuperación metalúrgica, la ley es superior en la flotación realizada con el agua de mayor fuerza iónica. Puesto que estos modelos se ajustan mejor para este mineral que para la combinación de mineral *M-ATR*, es posible intuir una relación de estos resultados. En particular, se plantea que la entrada de contaminantes corresponde a especies que también contienen cobre en su composición, por lo cual es posible observar que la ley se mantiene superior en el agua *A-AFI* que en el agua *A-BFI*. Un aspecto interesante a destacar es que en ambos minerales la entrada de contaminantes es mayor para el agua *A-AFI*, lo cual se puede explicar por el mayor arrastre de partículas a causa de la mayor fuerza iónica de este fluido, tal como se menciona al inicio de este análisis. Por consiguiente, lo propuesto para el mineral *M-BTR* sobre la entrada de contaminantes conteniendo cobre puede aplicarse al mineral *M-ATR*.

Con respecto a la razón de enriquecimiento máxima γ' , el resultado se condice con lo observado para los valores presentados en la Tabla 4-8, en donde estos son mayores para la combinación *M-BTR / A-BFI* durante el primer minuto de flotación en comparación con la combinación *M-BTR / A-AFI*. Esta afirmación no aplica al valor determinado del parámetro γ' para las combinaciones con mineral *M-ATR* ya que, si bien se tiene que este parámetro es ligeramente mayor en la prueba con agua *A-BFI*, los valores son prácticamente el mismo, hecho que no se observa en los resultados experimentales, en donde γ es superior para la prueba de flotación con agua *A-AFI*.

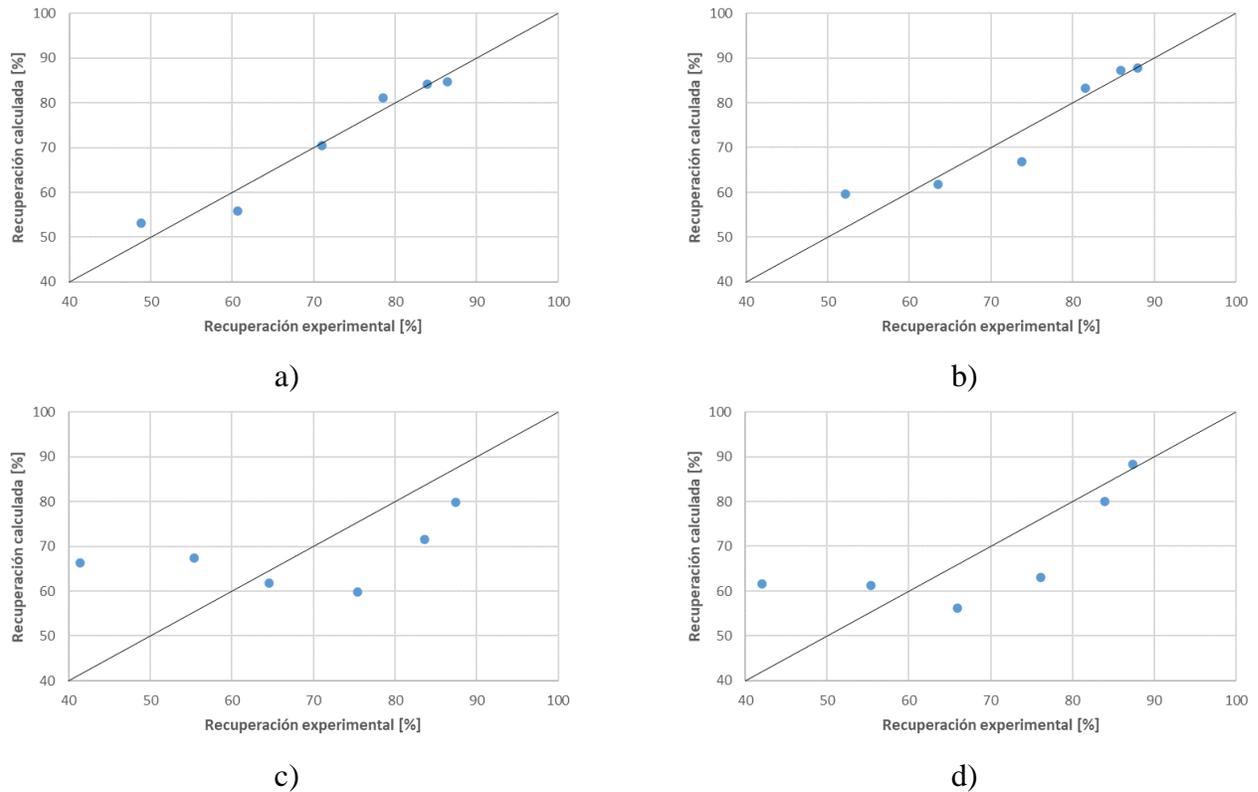


Figura 4-17: Gráficos de recuperación calculada mediante modelo AREV en función de la recuperación experimental para a) *M-BTR / A-BFI*, b) *M-BTR / A-AFI*, c) *M-ATR / A-BFI* y d) *M-ATR / A-AFI* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Siguiendo la metodología planteada por Smith et al. (1989) se logra estimar la recuperación del mineral hidrofóbico por flotación real y por arrastre al concentrado. En la Figura 4-18 se presentan los gráficos de recuperación metalúrgica en función de la recuperación de agua. El procedimiento consta en trazar rectas tangentes a la curva, las cuales al ser extrapoladas e intersectadas con el eje de las ordenadas (recuperación metalúrgica) señala la recuperación por flotación real de las partículas hidrófobas. En la Tabla 4-11 se indican los valores de los parámetros obtenidos, donde F_v es la flotación real y e_v corresponde a un factor de arrastre de partículas hidrofóbicas. De estos datos es posible apreciar que la combinación *M-BTR / A-AFI* presenta una flotación real mayor que el resto de combinaciones, lo que se condice con los resultados revisados. Adicionalmente, se observa una menor recuperación real para las pruebas de flotación realizadas con la combinación de mineral *M-ATR*. Por otro lado, se debe notar de la Tabla 4-9 que la recuperación al final del proceso es similar para todas las combinaciones. Sin embargo, al ser menor la fracción de mineral recuperado por flotación real para las combinaciones con mineral *M-ATR*, se puede inferir que la recuperación por arrastre es mayor para este tipo de mineral.

Tabla 4-11: Recuperación por flotación real y factor de arrastre de partículas hidrofóbicas

	M-BTR		M-ATR	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
F_v [%]	69,36	74,66	63,77	65,35
e_v	0,48	0,41	0,60	0,52

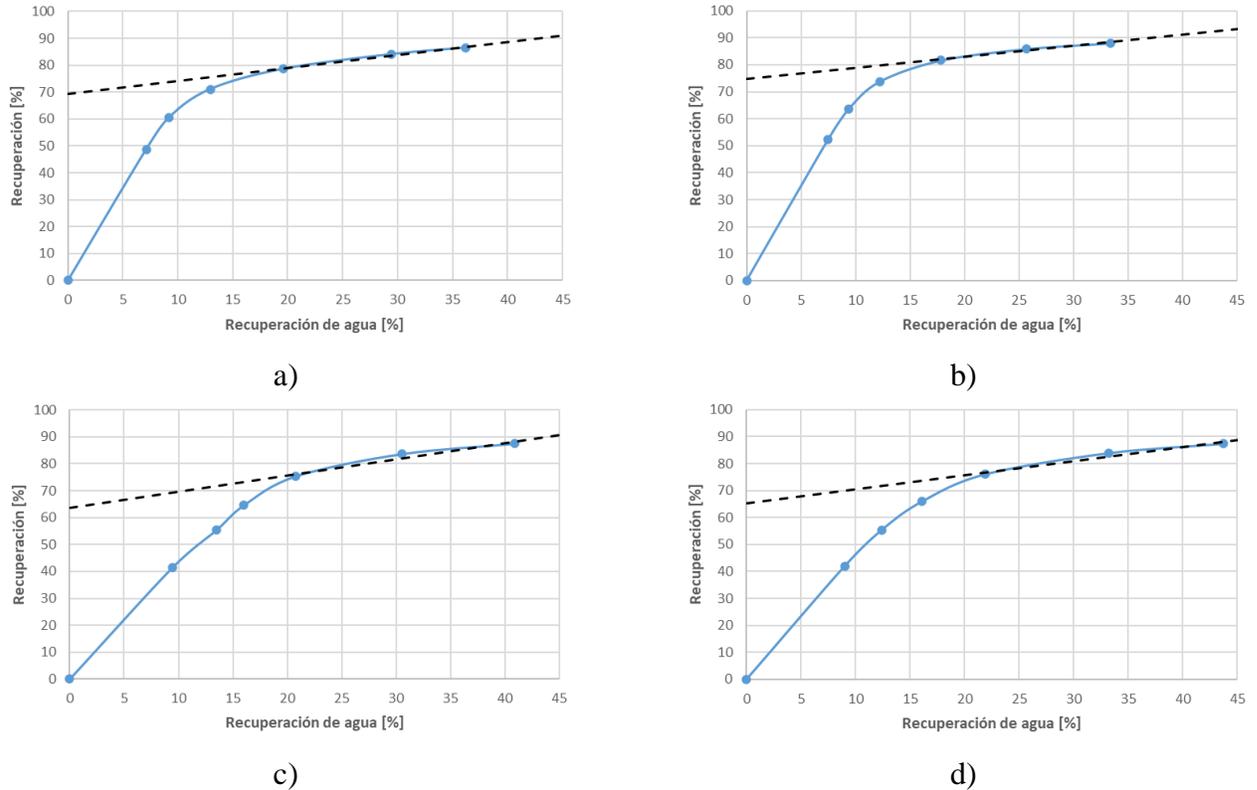


Figura 4-18: Gráficos de recuperación metalúrgica en función de la recuperación de agua para a) M-BTR / A-BFI, b) M-BTR / A-AFI, c) M-ATR / A-BFI y d) M-ATR / A-AFI ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Un aspecto importante a destacar es que el factor de arrastre es mayor para las dos combinaciones con agua *A-BFI*, lo cual es contrario a lo esperado puesto que este tipo de agua presenta una fuerza iónica menor a la del agua *A-AFI*, y por lo tanto el arrastre de partículas debiese ser inferior que en el agua con mayor conductividad. Sin embargo, al dividir la recuperación por arrastre de partículas hidrofóbicas (calculada a partir del factor de arrastre) con la recuperación total, se obtiene la fracción de partículas hidrofóbicas arrastradas al concentrado, cuyo resultado se presenta en la Tabla 4-12. Es posible observar que las combinaciones de mineral con mayor tiempo de residencia presentan una mayor fracción de partículas recuperadas por arrastre. Cabe notar además que, similar a lo expuesto sobre el factor de arrastre, para cada combinación de mineral la muestra de agua con mayor fracción de partículas arrastradas está asociada con el agua *A-BFI*.

Tabla 4-12: Fracción de recuperación por arrastre de la recuperación total

M-BTR [%]		M-ATR [%]	
A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
19,74	15,14	27,09	25,24

4.1.5. Modelos cinéticos

Del gráfico de recuperación metalúrgica en función del tiempo (Figura 4-13) es posible indicar un punto interesante relacionado con la velocidad de flotación, la cual parece ser mayor para el mineral *M-BTR*, esto debido a que la recuperación de cobre es superior para los primeros minutos de cada prueba. Luego, el mineral hidrofóbico flota más rápido en estas combinaciones, y como consecuencia la velocidad de flotación también disminuye de manera más veloz puesto que alcanza antes la cantidad máxima de cobre recuperable. Esto explica que al final de las pruebas la recuperación de cobre sea similar, ya que al tener una menor desaceleración, la recuperación de las combinaciones con mineral *M-ATR* pueden alcanzar los valores del mineral *M-BTR*. Para analizar la cinética del proceso se estudian los modelos señalados en la sección 2.1.3.

Los gráficos presentados en la Figura 4-19 corresponden a la recuperación metalúrgica de cobre calculada a partir de los datos experimentales, junto con los modelos cinéticos mencionados de García-Zúñiga, Klimpel, Kelsall, Kelsall Modificado, Gamma y Completamente Mezclado, para pruebas de flotación *batch*.

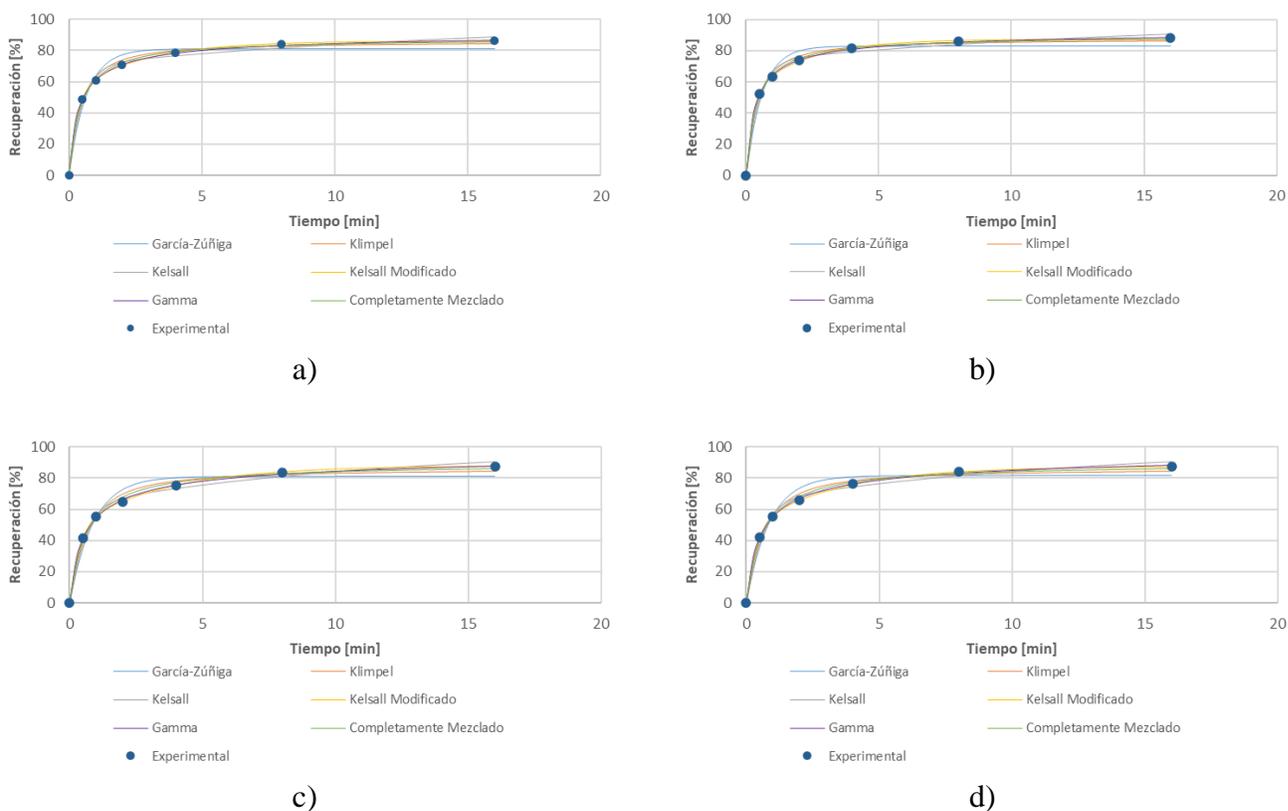


Figura 4-19: Gráficos de recuperación modelada y recuperación experimental en función del tiempo para a) *M-BTR / A-BFI*, b) *M-BTR / A-AFI*, c) *M-ATR / A-BFI* y d) *M-ATR / A-AFI* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En estos gráficos se aprecia que el modelo clásico de García-Zúñiga tiende a sobreestimar la recuperación metalúrgica para un rango de tiempo entre 2 [min] y 4 [min], y a subestimarla para los minutos finales de flotación en cada combinación de mineral y agua. En el caso del modelo cinético de Klimpel se observa algo similar, con una menor sobreestimación en los minutos indicados para las pruebas con mineral *M-BTR*, pero más acentuada en las combinaciones de

mineral *M-ATR*. En ambos casos se presenta una subestimación de la recuperación en el tiempo final de flotación. Más aún, a simple vista se observa que la mayoría de los modelos tiende a subestimar la recuperación al final del proceso, con la excepción del modelo cinético Gamma, el cual parece ser al que mejor se ajustan los datos experimentales.

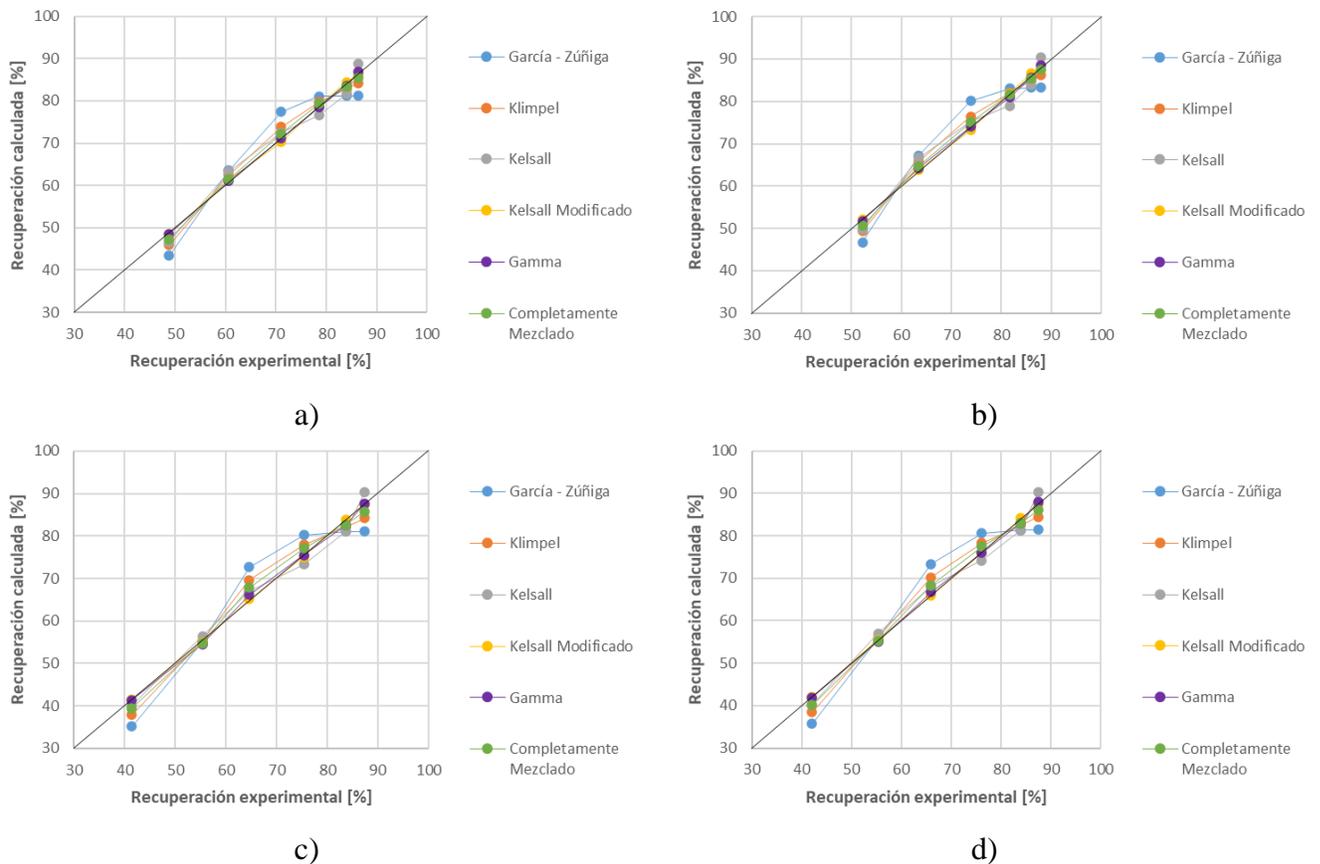


Figura 4-20: Gráficos de recuperación calculada mediante los modelos cinéticos en función de la recuperación experimental para a) *M-BTR / A-BFI*, b) *M-BTR / A-AFI*, c) *M-ATR / A-BFI* y d) *M-ATR / A-AFI* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En la Figura 4-20 se presentan gráficos de recuperación calculada a partir de los modelos cinéticos en función de la recuperación metalúrgica experimental. Estos gráficos permiten realizar una comparación entre cada modelo para las distintas combinaciones de mineral y agua con respecto a la desviación que presentan de los datos experimentales. Se aprecia lo indicado en el párrafo anterior, en donde los modelos de García-Zúñiga y de Klimpel sobrestiman la recuperación para los tiempos 1 [min] y 4 [min], siendo mayor la desviación para las combinaciones con mineral *M-ATR* en el caso del modelo de Klimpel. Adicionalmente, de estos gráficos es posible apreciar que otros modelos, como el de Kelsall o el modelo Completamente Mezclado, también presentan una sobrestimación en el rango de tiempo indicado, siendo más notoria para la combinación del mineral *M-ATR*. En el caso particular del modelo de Kelsall, el rango es más reducido, observándose la sobrestimación para el rango entre 1 [min] y 2 [min], mientras que en el modelo Completamente Mezclado se observa en este mismo rango para las pruebas con mineral *M-BTR*, y en el rango 1 [min] a 4 [min] para el mineral *M-ATR*. Otro aspecto a notar es que tanto en el primer tiempo de flotación como al final del proceso, algunos modelos cinéticos, en particular el modelo de García-Zúñiga y de Kelsall tienden a subestimar la recuperación metalúrgica. Análogamente, el modelo

Completamente Mezclado subestima la recuperación solo para el primer concentrado en el caso de las pruebas con mineral *M-BTR*, mientras que esta subestimación se presenta también al final del proceso para las combinaciones con mineral *M-ATR*. En el caso del modelo de Kelsall, se aprecia que el modelo subestima la recuperación para el primer tiempo de flotación, para los tiempos 4 [min] y 8 [min]. Luego, es posible indicar que los modelos que mejor ajustan los datos experimentales son los modelos Gamma y Kelsall Modificado. En la Tabla 4-13 se presentan los valores del error relativo promedio obtenido para los modelos cinéticos en cada combinación. A partir de esto se verifica que los modelos que mejor se ajustan a los datos corresponden al modelo de Kelsall Modificado y al modelo Gamma.

Tabla 4-13: Valor del error relativo promedio para cada modelo de las combinaciones

<i>Modelos</i>	<i>M-BTR [%]</i>		<i>M-ATR [%]</i>	
	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>
<i>García-Zúñiga</i>	3,14	2,96	3,81	3,63
<i>Klimpel</i>	1,54	1,38	2,13	2,04
<i>Kelsall</i>	1,58	1,65	1,50	1,61
<i>Kelsall Modificado</i>	0,33	0,28	0,21	0,10
<i>Gamma</i>	0,22	0,37	0,49	0,32
<i>Completamente Mezclado</i>	0,75	0,66	1,35	1,07

Tabla 4-14: Valores de los parámetros pertenecientes a modelos cinéticos

<i>Modelos</i>	<i>Parámetros</i>	<i>M-BTR</i>		<i>M-ATR</i>	
		<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>
<i>García-Zúñiga</i>	k [min^{-1}]	1,53	1,65	1,14	1,16
	R_{∞} [%]	81,23	83,19	81,02	81,37
<i>Klimpel</i>	k [min^{-1}]	3,60	3,95	2,58	2,63
	R_{∞} [%]	85,71	87,55	86,23	86,54
<i>Kelsall</i>	ϕ	0,30	0,27	0,37	0,36
	k_f [min^{-1}]	2,12	2,25	1,92	1,85
	k_s [min^{-1}]	0,06	0,07	0,09	0,08
<i>Kelsall Modificado</i>	ϕ	0,34	0,36	0,40	0,40
	k_f [min^{-1}]	3,36	4,05	2,84	2,86
	k_s [min^{-1}]	0,38	0,47	0,29	0,31
	R_{∞} [%]	86,10	87,42	87,86	87,56
<i>Gamma</i>	λ [min]	0,23	0,22	0,27	0,27
	P	0,63	0,68	0,51	0,52
	R_{∞} [%]	93,05	93,62	100,00	100,00
<i>Completamente Mezclado</i>	k [min]	0,43	0,38	0,63	0,61
	R_{∞} [%]	87,80	89,47	89,16	89,38

En la Tabla 4-14 se señalan los valores obtenidos para los parámetros cinéticos de los modelos en estudio. Estos parámetros dejan en evidencia lo mencionado anteriormente relacionado con la recuperación para cada combinación de mineral y agua. Es posible observar que en todos los modelos las constantes cinéticas son mayores para la combinación *M-BTR / A-BFI* en comparación con las obtenidas para *M-ATR / A-AFI*, resultado esperado de estas combinaciones (a excepción de las constantes cinéticas λ del modelo Gamma y k del modelo Completamente Mezclado). Sin embargo, y como se ha mencionado anteriormente, la combinación *M-BTR / A-AFI* presenta la mayor recuperación de cobre, de lo cual se aprecia en general parámetros superiores para cada modelo, salvo las constantes cinéticas λ del modelo Gamma y k del modelo Completamente Mezclado, y ϕ del modelo Kelsall Modificado, en que este último parámetro es mayor para las combinaciones con mineral *M-ATR*, indicando una fracción mayor de componentes con constante de velocidad lenta k_s . Adicionalmente, se debe notar que las constantes cinéticas son mayores para las muestras de agua *A-AFI*, hecho que se condice con la calidad química del fluido, puesto que al presentar una mayor fuerza iónica, se promueve la formación de burbujas más pequeñas y también disminuye la repulsión electrostática entre partícula y burbuja. Estos dos aspectos aumentan la probabilidad de colisión y formación del agregado, teniendo como consecuencia un aumento en la cinética de flotación del mineral.

Del modelo de García Zúñiga se aprecia que el parámetro R_∞ es mayor en la combinación *M-BTR / A-AFI*, lo cual indica que la cantidad máxima de cobre que se puede recuperar se asocia con esta combinación de mineral y agua, lo cual se condice con los resultados y observaciones realizadas, en que producto del agua con mayor fuerza iónica la recuperación es mayor, además debido a que el mineral es relativamente más fresco en comparación con el mineral *M-ATR*. Al comparar los valores de los parámetros correspondientes a las combinaciones de muestras de poco tiempo de contacto y de alto tiempo de contacto, se evidencia que la recuperación máxima alcanzable es superior para la combinación *M-ATR / A-AFI*, reiterando lo planteado anteriormente en que se refuta la hipótesis de que la recuperación es mayor para la combinación de menos tiempo de contacto. En el caso de la constante cinética los valores mayores se asocian con el mineral *M-BTR*, lo cual condice lo mencionado al inicio de esta sección, en que la velocidad de flotación es mayor para estas combinaciones, por lo cual se alcanza la cantidad máxima recuperable en menos tiempo.

En la Tabla 4-13 se observa que el modelo postulado por Klimpel se ajusta mejor que el planteado por García-Zúñiga. Una de las razones que explica esto es que la constante cinética del modelo de Klimpel presenta una distribución rectangular, lo cual otorga una mayor flexibilidad al modelo. Análogamente a lo indicado anteriormente, se aprecia que la cantidad máxima recuperable de cobre R_∞ es similar en todas las combinaciones, siendo mayor para la combinación *M-BTR / A-AFI*. Debe observarse que en este caso la combinación *M-BTR / A-BFI* presenta la menor recuperación máxima alcanzable, lo cual se condice con los resultados mostrados en la Tabla 4-9. Con respecto a las constantes cinéticas, es posible notar que en este modelo las velocidades de flotación son mayores en comparación con el modelo clásico, manteniéndose la tendencia de valores más altos para las combinaciones con mineral *M-BTR*, y para las pruebas con agua *A-AFI*. Al estudiar la diferencia entre las constantes cinéticas de las combinaciones *M-BTR / A-BFI* y *M-ATR / A-AFI* se obtienen valores de 0,37 [min^{-1}] y de 0,97 [min^{-1}] para el modelo de García-Zúñiga y Klimpel, respectivamente, lo cual refleja que la velocidad es relativamente mayor al emplear el último modelo mencionado.

En el modelo de Kelsall se consideran dos componentes respecto al material recuperado, uno que presenta una velocidad de flotación rápida y otro que flota lentamente, representados por k_f y k_s respectivamente. Además, incorpora la fracción de mineral que se recupera de manera lenta en el concentrado ϕ . Análogamente a lo indicado sobre las constantes cinéticas en los modelos anteriores, se observa que las constantes cinéticas correspondientes a la fracción de mineral que flota de manera rápida son mayores en las combinaciones con mineral de menor tiempo de contacto, aunque con una menor diferencia al comparar $M-BTR / A-BFI$ y $M-ATR / A-AFI$, donde se obtiene una diferencia de $0,27 \text{ [min}^{-1}\text{]}$. Es posible observar que para las pruebas con mineral $M-ATR$ la constante cinética rápida de mayor valor se asocia con el agua de menor fuerza iónica, hecho que difiere de lo señalado en los modelos previos. En el caso de la constante cinética del componente que flota lentamente, se aprecia que los valores mayores corresponden a las pruebas realizadas con el mineral de mayor tiempo de residencia, a diferencia de la constante rápida. Con respecto a la fracción de mineral de flotación lenta, este componente es mayor en el mineral $M-ATR$, al igual que la constante lenta. De esto se puede explicar que la recuperación al final del proceso sea similar en todas las combinaciones, puesto que como el componente que flota rápidamente se recupera antes en las pruebas con mineral $M-BTR$ que en aquellas con mineral $M-ATR$, se agota en menos tiempo. Luego, al tener menor porcentaje de mineral que flota lentamente, la recuperación aumenta en baja cantidad con el transcurrir del tiempo. Por otro lado, debido a que el mineral $M-ATR$ tiene mayor fracción del componente de flotación lenta, al estudiar la flotación para un tiempo alto, es posible observar que finalmente se alcance la recuperación del mineral $M-BTR$.

El modelo de Kelsall Modificado incorpora al modelo anterior el parámetro de máxima cantidad de cobre recuperable R_∞ , lo cual otorga una mayor correlación entre los datos calculados con los datos experimentales, obteniéndose errores relativos promedio menor que los obtenidos para el modelo Kelsall. Se mantiene la tendencia de que las constantes cinéticas de mayor valor pertenecen a las combinaciones de mineral $M-BTR$, tanto para la constante cinética rápida como para la de cinética lenta, siendo incluso mayores que las obtenidas para el modelo de Kelsall. De igual manera, la fracción de mineral que flota lentamente es mayor en las combinaciones con mineral $M-ATR$, por lo que puede intuirse una explicación similar a la presentada en el párrafo anterior con respecto a la convergencia de los valores de recuperación. Sin embargo, es posible observar una diferencia notable en comparación con los otros modelos revisados. En este caso la recuperación máxima de mayor valor se asocia con las combinaciones de mineral $M-ATR$, lo cual difiere tanto de las recuperaciones obtenidas para los modelos como de las recuperaciones experimentales observadas. Esta diferencia es producida puesto que al haber una mayor cantidad de parámetros que definen el modelo, se produce una dilución en los valores de estos parámetros.

El modelo Gamma es definido en base a una constante cinética λ que presenta una distribución gamma, en vez de rectangular como en los modelos anteriores. Al considerar el inverso de este parámetro, es decir $1/\lambda$, se obtiene que las velocidades mayores corresponden a las combinaciones de mineral $M-BTR$, y mayor para las pruebas con agua $A-AFI$. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-15, en donde se observa lo mencionado previamente. En el caso de la recuperación se debe notar que la recuperación máxima alcanza el 100% para las pruebas con mineral $M-ATR$. Esto es producto de que al minimizar la raíz de la suma de diferencias cuadradas el parámetro R_∞ alcanza valores superiores al 100%, resultado imposible desde el punto de vista fisicoquímico, por lo cual se restringe el valor de este parámetro para una recuperación total de las partículas. Cabe destacar

también el valor de las recuperaciones para las pruebas con *M-BTR*, las cuales superan el 90% de recuperación, resultado que difiere de los resultados experimentales. Luego, al igual que en el caso del modelo de Kelsall Modificado, si bien este modelo se ajusta de buena manera a los datos experimentales, los parámetros no explican lo que ocurre realmente en las pruebas de flotación.

Finalmente, en el modelo Completamente Mezclado se define una constante cinética con distribución exponencial k la cual tiene unidades de [min]. En la Tabla 4-15 se presentan los valores del inverso de la constante en donde, similar al caso de la constante del modelo Gamma, se tiene que estos son mayores para las pruebas con mineral *M-BTR*, resultado estudiado a lo largo de esta sección. En este modelo se vuelven a observar valores esperables para la recuperación máxima, en donde el valor superior corresponde a la combinación *M-BTR / A-AFI*.

Tabla 4-15: Valor del inverso de los parámetros λ del modelo Gamma y k del modelo Completamente Mezclado

	<i>M-BTR</i>		<i>M-ATR</i>	
	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>
$1/\lambda$ [min^{-1}]	4,39	4,57	3,68	3,73
$1/k$ [min^{-1}]	2,33	2,61	1,59	1,63

4.1.6. Fracción no flotable, de flotación lenta y flotación rápida

De acuerdo a lo revisado en la sección anterior, es posible definir componentes que flotan rápida y lentamente. Además, el parámetro de recuperación máxima establecido en los distintos modelos cinéticos indica que existe un porcentaje del mineral que no se logra recuperar en el concentrado, ya sea por flotación real o por arrastre de partículas. Imaizumi e Inoue (1963) desarrollan un procedimiento a partir del cual es posible determinar las fracciones de material no flotable, de flotación lenta y de flotación rápida, con las constantes cinéticas correspondientes a cada fracción, al analizar las curvas del mineral no recuperado en función del tiempo. Estas curvas se presentan en los gráficos de la Figura 4-21, junto con las curvas auxiliares trazadas de acuerdo al procedimiento descrito.

En la Tabla 4-16 se muestran las fracciones obtenidas para cada combinación estudiada. En general se aprecia que el mineral *M-ATR* presenta un porcentaje de mineral que no flota mayor al mineral *M-BTR*. Al comparar las combinaciones *M-BTR / A-BFI* y *M-ATR / A-AFI* es posible notar que el porcentaje de mineral no flotable es mayor para esta última combinación. Esto indica que la recuperación de ésta debiese ser menor que la primera combinación mencionada, no obstante se ha observado que la recuperación es ligeramente mayor para la combinación de muestras con mayor tiempo de contacto. Por otro lado, la combinación *M-BTR / A-AFI* presenta el menor porcentaje de mineral no flotable, lo cual se condice con los mayores valores de recuperación metalúrgica. Además, se repite el comportamiento observado en donde las fracciones de material no flotable son menores para las pruebas en que se emplea el agua con mayor tiempo de contacto, lo cual indica que es posible obtener una mayor recuperación de cobre con esta agua debido al efecto de la fuerza iónica.

En el caso de la porción que flota lentamente, no se aprecia una muestra de mineral en particular que presente la mayor fracción de este componente, como ocurre para la porción de mineral que no flota. Sin embargo, al observar las muestras de agua se evidencia que las combinaciones en que

se emplea agua *A-AFI* cuentan con un porcentaje más alto de material con flotación lenta que con el agua de menor tiempo de contacto. Al comparar estos valores con el parámetro ϕ de los modelos de Kelsall y Kelsall Modificado, se tiene que estos son mayores en los modelos, en donde la fracción de mineral de flotación lenta se encuentra en un rango de 0,27 hasta 0,40, mientras que mediante esta metodología se obtiene que esta fracción no supera el 17%. De igual manera, los valores de las constantes cinéticas obtenidas a partir de este procedimiento son menores que los determinados en los modelos.

Al observar los valores obtenidos para la porción de mineral con flotación rápida se nota que estos son mayores en las muestras de mineral *M-BTR*, mientras que las constantes cinéticas son similares para cada combinación salvo para la muestra *M-ATR / A-BFI*. Al comparar con los modelos de Kelsall y Kelsall Modificado se aprecia lo indicado en el párrafo anterior, en que los valores de las constantes cinéticas determinadas a partir de este procedimiento son considerablemente más bajos que los obtenidos en los modelos cinéticos.

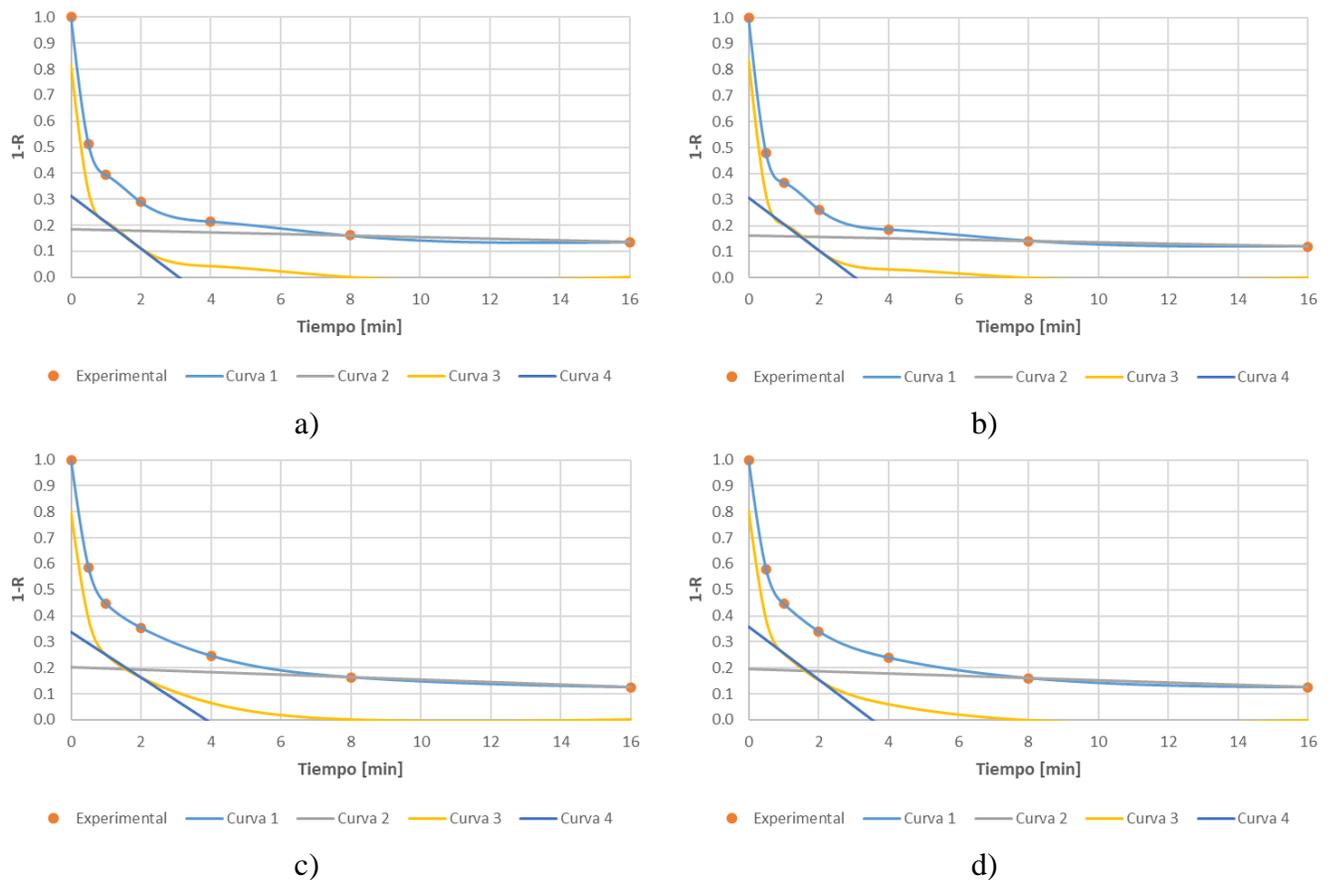


Figura 4-21: Gráficos de mineral no recuperado en función del tiempo y curvas auxiliares para el procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963) de a) *M-BTR / A-BFI*, b) *M-BTR / A-AFI*, c) *M-ATR / A-BFI* y d) *M-ATR / A-AFI* ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

Tabla 4-16: Fracción de mineral no flotable, de flotación lenta y flotación rápida

	M-BTR [%]		M-ATR [%]	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
No flotable	18,47	16,15	20,16	19,53
Flotación lenta	12,87	14,58	13,51	16,14
Flotación rápida	68,66	69,28	66,33	64,33

Tabla 4-17: Valor de constantes cinéticas de las porciones de flotación lenta y rápida

	M-BTR		M-ATR	
	A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
K_{slow}, [min^{-1}]	3,05.E-03	2,58.E-03	4,77.E-03	4,34.E-03
K_{fast}, [min^{-1}]	1,01.E-01	1,01.E-01	8,74.E-02	1,01.E-01

4.1.7. Evolución del agua

El contacto del agua con el mineral en la formación de la pulpa, la adición de reactivos y la inyección de aire son factores que cambian las propiedades originales de las muestras de agua revisadas al inicio de esta sección. En la Tabla 4-18 se indican los valores de las propiedades en estudio antes y después de las pruebas de flotación. En la Tabla 4-19 se señala el aumento o disminución (valores negativos) porcentual de los valores para cada propiedad.

Tabla 4-18: Valores de las propiedades del agua pre y post flotación

		M-BTR		M-ATR	
		A-BFI	A-AFI	A-BFI	A-AFI
Pre flotación	pH	7,52	7,80	7,62	7,92
	E_h [mV]	170,2	156,1	165,1	150,2
	Conductividad [mS/cm]	3,82	4,31	3,75	4,36
	Oxígeno disuelto [ppm]	3,11	3,12	3,15	2,4
	Sólidos totales [ppm]	3240	4000	3200	3920
Post flotación	pH	8,64	8,75	8,92	8,85
	E_h [mV]	115,6	109,2	101,8	105,3
	Conductividad [mS/cm]	4,04	4,54	4,17	4,48
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,99	2,68	2,93	3,02
	Sólidos totales [ppm]	3800	4060	3800	4060

Tabla 4-19: Aumento porcentual de las propiedades de las muestras de agua

	<i>M-BTR</i> [%]		<i>M-ATR</i> [%]	
	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>
<i>pH</i>	14,9	12,2	17,1	11,7
<i>E_h</i>	-32,1	-30,0	-38,3	-29,9
<i>Conductividad</i>	5,8	5,3	11,2	2,8
<i>Oxígeno disuelto</i>	-3,9	-14,1	-7,0	25,8
<i>Sólidos totales</i>	17,3	1,5	18,8	3,6

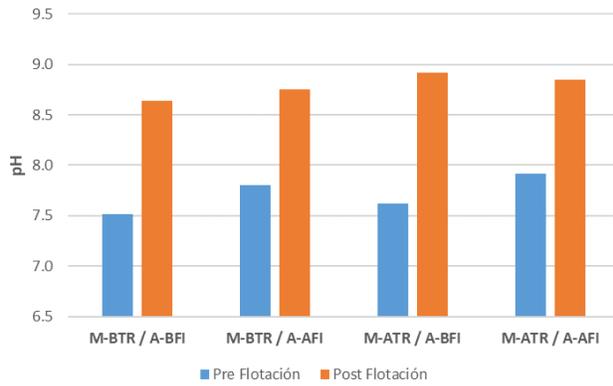
En la Figura 4-22 se muestra de manera gráfica la evolución de las propiedades de las muestras de agua para cada combinación. Con respecto al pH, es posible observar que la combinación *M-ATR / A-BFI* presenta el valor máximo, mientras que la combinación *M-BTR / A-BFI* el mínimo. Así mismo, ambas muestras mencionadas exhiben el mayor aumento porcentual de pH, lo cual indica que el agua *A-BFI* aumenta en mayor proporción el valor de su pH en comparación al agua *A-AFI*. De esto se puede intuir que el agua de mayor tiempo de contacto presenta una mayor resistencia a un cambio del pH, lo que tiene sentido puesto que esta agua ha pasado por procesos de aumento de pH en el tiempo que ha estado en contacto con el mineral.

Con respecto al E_h , debido al comportamiento proporcional que tiene con el pH, es posible apreciar situaciones similares a las indicadas para esta última propiedad. Es evidente que existe una mayor disminución porcentual en el caso de las muestras de agua *A-BFI*. Adicionalmente, el valor máximo y mínimo corresponden a *M-BTR / A-BFI* y *M-ATR / A-BFI*, respectivamente, correspondientes a los valores mínimos y máximos de pH.

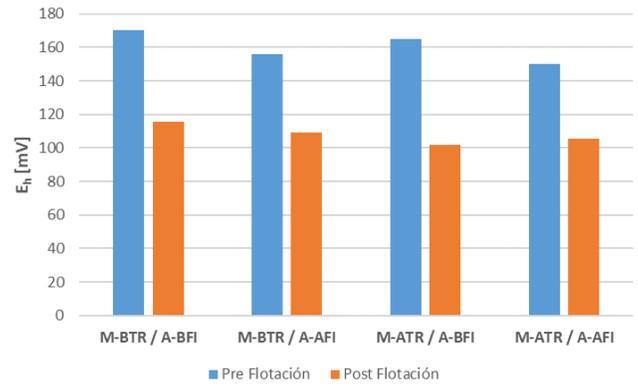
En el caso de la conductividad, las combinaciones con los valores más altos están asociadas a las pruebas realizadas con *A-AFI*. Sin embargo, las flotaciones efectuadas con *A-BFI* presentan un aumento porcentual mayor de conductividad. Esto puede indicar que, si bien antes y después de la flotación la cantidad de iones disueltos es mayor en *A-AFI*, la disolución de iones en el proceso de flotación es mayor en las muestras de *A-BFI*. En otras palabras, el agua podría encontrarse saturada en iones disueltos por el mayor tiempo de contacto con el mineral. Esto se corrobora con las mediciones a los sólidos totales de las muestras. Análogamente al caso de la conductividad, los sólidos totales son más en las muestras de agua *A-AFI* que en las muestras *A-BFI*, aunque el porcentaje de sólidos totales aumenta en mayor medida en las pruebas en que se emplea esta última agua, lo que indica la posible saturación del agua.

Finalmente, en el caso del oxígeno disuelto es posible notar que los valores disminuyen posterior a la flotación, lo cual es esperable por lo revisado anteriormente, tanto por el aumento de la conductividad como de los sólidos totales, y por la disminución del potencial de oxidación. Sin embargo, se debe apreciar una excepción correspondiente a la prueba *M-ATR / A-AFI*, en que el oxígeno disuelto aumenta en un 25,8%, resultado que contradice lo anteriormente expuesto con respecto a la relación con la concentración de iones disueltos que presenta la disolución de oxígeno. Luego, puesto que las medidas de esta propiedad en las combinaciones restantes no presentan una diferencia de este tipo, se puede suponer que el día en que se realiza esta prueba de flotación el

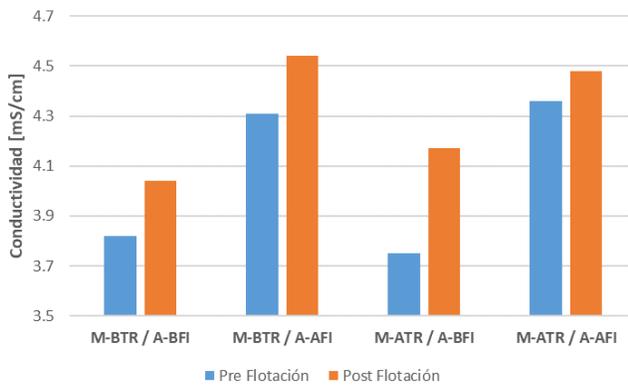
equipo no estaba calibrado de la manera correcta, por lo cual este resultado es producto de un error de medición.



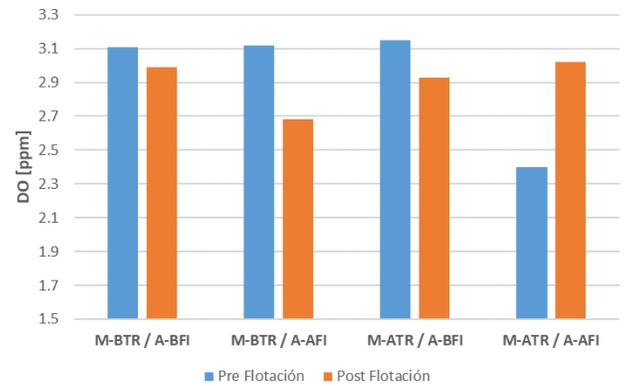
a)



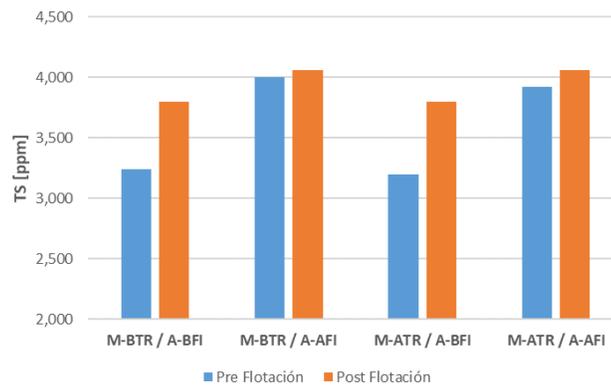
b)



c)



d)



e)

Figura 4-22: Gráficos de comparación de las propiedades a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) oxígeno disuelto y e) sólidos totales del agua antes y después de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

4.1.8. Efecto del tipo de agua en la eficiencia de la flotación

Mediante un ajuste polinomial a los datos experimentales de recuperación metalúrgica y ley se busca identificar el efecto de distintas variables y combinaciones entre éstas en la eficiencia del proceso. En particular, se utilizan los iones de mayor concentración inicial en ambas muestras de agua (Na^+ , K^+ y Ca^{2+}) lo cual representa la fuerza iónica de cada fluido. Adicionalmente, de las seis propiedades con las que se ha caracterizado la calidad química del agua, se escogen el pH, E_h , conductividad eléctrica y sólidos totales obtenidos en las aguas posterior al proceso de flotación como variables. La razón para no incluir la turbidez en el análisis se debe a que, tal como se señala en la Tabla 4-1, esta propiedad presenta una gran variabilidad en la semana de estudio de la evolución. Esto expresa poca confiabilidad al momento de emplear tal medida en el estudio del efecto en la flotación. Respecto al oxígeno disuelto, anteriormente se menciona el error de medición observado en la prueba *M-ATR/A-AFI*, por lo cual se decide excluir este parámetro para el análisis.

En el caso de la recuperación metalúrgica, de la Tabla 7-9 es posible apreciar que, de manera independiente, la conductividad y el pH son las variables que mayor efecto tienen sobre la recuperación de cobre, siendo este último el parámetro más relevante. Esto hace sentido puesto que es sabido que se requiere de un buen control de pH para que los reactivos puedan reaccionar con el mineral, junto con la formación de una espuma estable. Sin embargo, se nota que entre ambos parámetros no existe una interacción que defina la recuperación observada. Más aún, el pH parece no tener correlación con las otras variables, aunque se debe destacar que puede existir una interacción con el E_h debido a la relación inversa entre ambos factores. Sumado a esto, parece ser que el potencial no tiene influencia en la recuperación metalúrgica. Por otra parte, se presentan buenas correlaciones entre los sólidos totales, la conductividad y los iones, esto a causa de que posterior al proceso de filtración, los sólidos totales son en mayor proporción iones disueltos.

De la Tabla 7-10, se aprecia que la conductividad presenta el efecto superior en las leyes de cobre obtenidas en el concentrado, sumado a una alta correlación con los iones disueltos y los sólidos totales, similar a lo observado en el caso de la recuperación metalúrgica. Por otro lado, se observa un bajo impacto del pH en la ley, lo cual puede ocurrir puesto que cada combinación es llevada a un pH de 10,5. En particular, se obtiene un pH promedio de $10,65 \pm 0,13$, diferencia no considerable para tener un efecto en el proceso.

En síntesis, la conductividad eléctrica y los sólidos totales tienen un mayor impacto en la eficiencia del proceso. En los gráficos de la Figura 4-23 y la Figura 4-24 se aprecian la recuperación de agua, recuperación másica, recuperación metalúrgica y ley para las combinaciones en función de la conductividad y los sólidos totales iniciales de las muestras de agua, respectivamente.

Tal como se ha comentado a lo largo de este estudio, no se ha observado que la ley de cobre disminuya con un aumento en la fuerza iónica del agua. Es más, es posible apreciar que la ley aumenta con un aumento de la conductividad hasta alcanzar un valor máximo para una conductividad de 4,31 [mS/cm], y luego disminuye, observando lo indicado en la literatura. Debe notarse además la relación inversa que presenta la ley con la recuperación de agua y la recuperación másica. Se muestra que las conductividades en que estas recuperaciones son mayores, la ley de cobre obtenida es menor, mientras que en aquellos casos en que las recuperaciones son menores, la ley es mayor. Esto demuestra que una mayor recuperación de agua está relacionada con una mayor recuperación de ganga, por lo cual las leyes de cobre en el concentrado disminuyen. Sin

embargo, no se logra observar que con el aumento de la fuerza iónica aumenta la recuperación de agua. Por otro lado, se ha visto de la literatura que en general la recuperación metalúrgica de cobre aumenta con un aumento de la fuerza iónica. No obstante, en este estudio se aprecia que, si bien la recuperación varía con cambios en la conductividad, esta propiedad parece no relacionarse de manera directa.

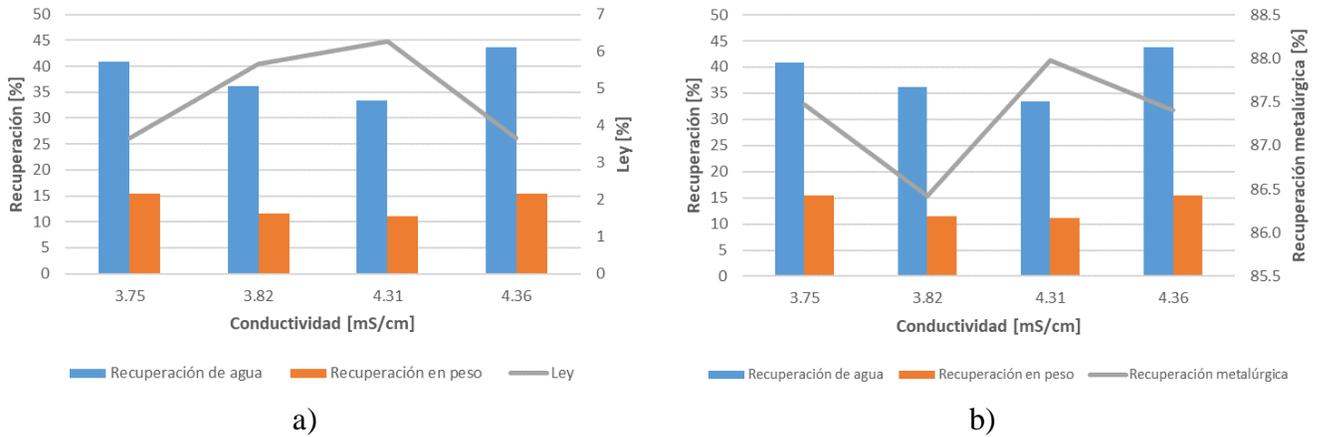


Figura 4-23: Gráficos de a) ley y b) recuperación metalúrgica en función de la conductividad del agua antes de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

En el caso de los sólidos totales iniciales, es posible notar que la ley parece presentar un comportamiento errático al haber variaciones de esta propiedad. Es decir, en ocasiones al aumentar la concentración de sólidos totales la ley disminuye, mientras que en otros casos aumenta con un aumento de los sólidos. Por otro lado, en el gráfico de recuperación metalúrgica se aprecia un comportamiento parabólico, en donde existe un valor mínimo de recuperación para una concentración de sólidos totales de 3240 [ppm].

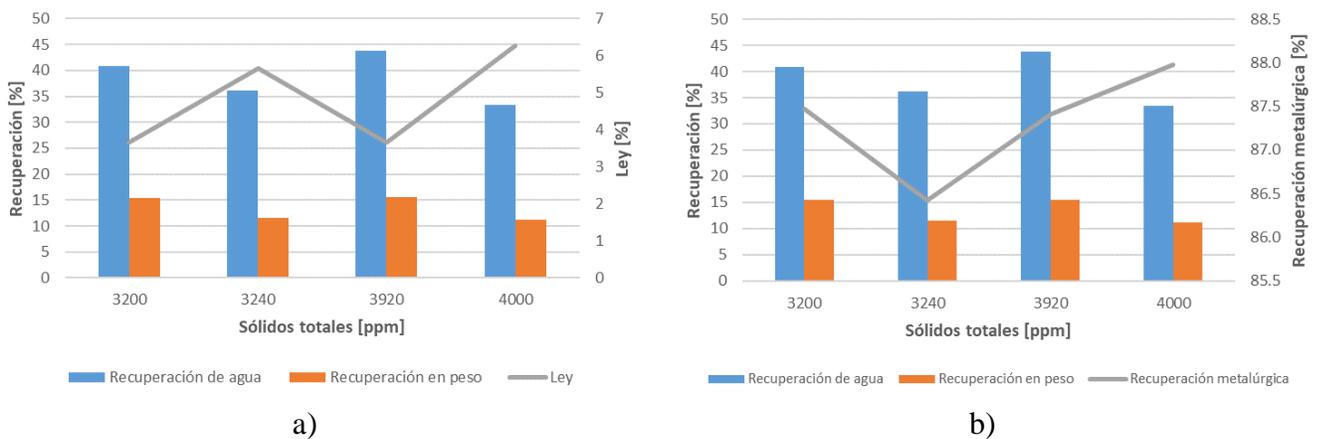


Figura 4-24: Gráficos de a) ley y b) recuperación metalúrgica en función de los sólidos totales del agua antes de la flotación ($C_p = 34\%$; $J_g = 0.6$ [cm/s]; $pH = 10,5$; colector = 36 [g/T]; espumante = 25 [g/T]; diesel = 12 [g/T]; velocidad impeler = 1100 [RPM])

4.2. Estudio de variación cíclica de temperatura

4.2.1. Mediciones preliminares a muestras de agua

Tal como se ha mencionado, al momento de recibir las muestras de agua se realizan mediciones iniciales de los parámetros para cada tipo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20: Valores originales de las muestras de agua para pruebas de cambio de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h [mV]</i>	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	<i>Turbidez [FTU]</i>	<i>Oxígeno disuelto [ppm]</i>	<i>Sólidos totales [ppm]</i>
<i>Agua destilada</i>	5,93	255,9	8,72	0,00	1,62	20
<i>Agua fresca</i>	7,06	190,9	115,6	0,87	1,12	94
<i>Agua recuperada</i>	11,59	-49,9	2680,0	298,00	0,66	2670

Es posible apreciar que el pH del agua recuperada presenta el valor más alto de los tres tipos de agua, esto es producto de que algunos reactivos añadidos para llevar a cabo la flotación del mineral, principalmente cal para la depresión de pirita, aún se puede encontrar en las aguas recuperadas del concentrado y el relave. Es intuitivo pensar que este hecho puede tener un impacto positivo desde un punto de vista económico en la operación, puesto que se espera inyectar menos cantidad de reactivo para un mismo tonelaje de mineral en comparación con los otros tipos de agua. Por otro lado, los resultados observados de pH para el agua destilada y fresca son los esperados para agua con pH neutro sin uso previo.

Adicionalmente, es posible observar la relación inversa entre pH y E_h , en donde el potencial de mayor valor lo presenta el agua destilada, mientras que el de menor valor corresponde al agua recuperada, situación opuesta a lo observado para el pH. De esto es posible considerar al agua destilada como un ambiente oxidante, y al agua recuperada como un ambiente ligeramente reductor.

En el caso de conductividad y turbidez se nota una gran diferencia, aunque esperable, para los tres tipos de agua. Que la conductividad y la turbidez sean mayor en el agua recirculada es un claro indicio de la reutilización de estas aguas, presentando una mayor cantidad de iones disueltos y de sólidos suspendidos, en comparación con el agua destilada y fresca, en que la concentración de iones es menor y presentan baja cantidad de sólidos suspendidos. Esto se aprecia de igual manera en los valores respectivos para los sólidos totales, con un alto valor para el agua recuperada, y bajo para el agua destilada y fresca.

Finalmente, el oxígeno disuelto muestra niveles más altos para el agua destilada disminuyendo en el agua fresca y siendo menor en el agua recuperada. Esto se condice con lo revisado en la literatura, debido a que el oxígeno disuelto disminuye al aumentar la salinidad de la solución, lo cual explica el hecho de que estas aguas de mayor conductividad y turbidez presenten menor oxígeno disuelto. Adicionalmente, es posible apreciar la relación entre el potencial del agua y la concentración de

oxígeno disuelto, es decir, en el agua con mayor oxígeno disuelto, el ambiente es más oxidante, mientras que en el agua con menor oxígeno disuelto, el ambiente es ligeramente reductor.

4.2.2. Evolución de las propiedades

En la Tabla 4-21 se muestra la masa de cal añadida a las muestras para llevar a pH 11, junto con el pH inicial y final alcanzado. Además, en el gráfico de la Figura 4-25 se señala la cantidad de cal agregada al Vaso C, que contiene el agua de reposición, hasta alcanzar el pH mencionado, esto con el fin de determinar la masa necesaria de cal.

Tabla 4-21: Masa de cal y pH por tipo de agua

	Vaso	Masa de cal [mg]	pH inicial	pH final
Agua destilada	Vaso A	21	5,99	11,03
	Vaso B	21	5,98	11,03
	Vaso C	22	5,99	11,01
Agua fresca	Vaso A	30	7,54	11,02
	Vaso B	30	7,53	11,05
	Vaso C	32	7,34	10,99
Agua recuperada	Vaso A	21	10,11	11,05
	Vaso B	22	10,11	11,07
	Vaso C	22	10,18	11,02

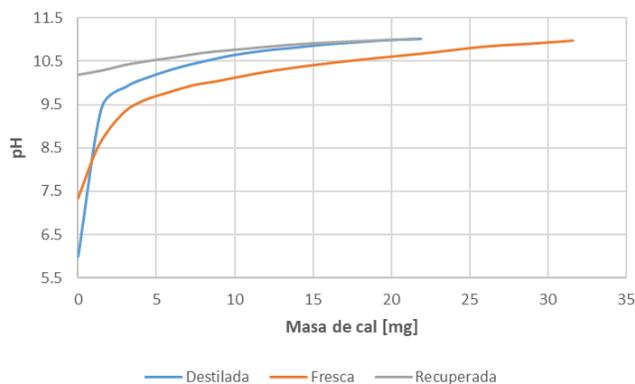


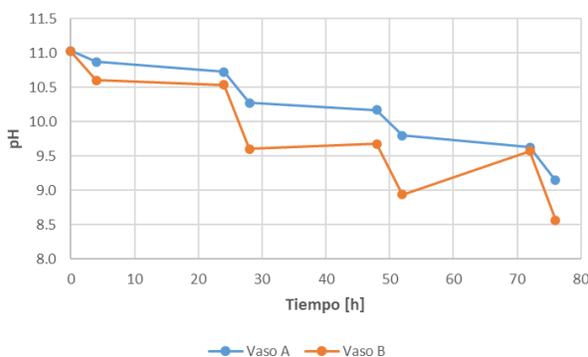
Figura 4-25: Gráfico de pH del agua en función de la masa de cal añadida (Vaso C)

De este gráfico es posible apreciar que el pH del agua recuperada es mayor que el de los otros tipos de agua, debido a que contiene residuos de reactivos. Esto conlleva a que se requiera una menor cantidad de cal en comparación con el tipo de agua fresca para alcanzar un pH 11. No obstante, debe tenerse en consideración que la cantidad de cal añadida no es menor a la utilizada en el agua destilada. Este hecho puede ocurrir puesto que, al no existir componentes en el agua destilada, es relativamente más sencillo aumentar el pH de la solución en comparación con el agua fresca, haciendo que sea similar al caso en que ya se ha añadido este reactivo al sistema. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de variar la temperatura para los tres tipos de agua.

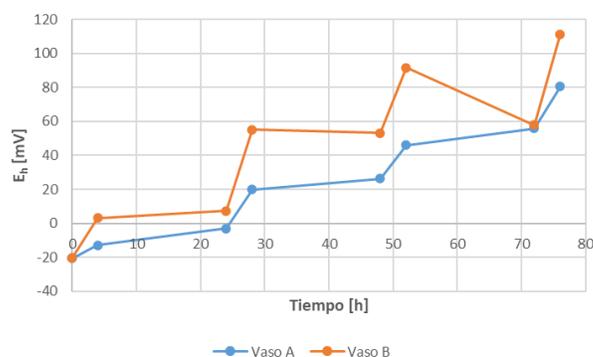
I. Agua destilada

De los gráficos de la Figura 4-26 se observan los siguientes aspectos:

- i. El pH de la solución tiende a disminuir con el transcurso del tiempo para ambos casos, en donde la disminución es mayor para la situación con cambios cíclicos de temperatura. Por otro lado, es posible apreciar un aumento en el pH, el cual se asocia con la cal extra añadida al Vaso C para mantener el valor de pH establecido. Una posible explicación para el comportamiento decreciente del pH es la carbonación del agua, cuya reacción se presenta en la Ecuación 2-15 de donde se observa que la disolución de dióxido de carbono en la solución conlleva un aumento de la concentración de protones, lo que se traduce en la disminución del pH.
- ii. La evolución del E_h es opuesta al cambio de pH, en donde se aprecia una tendencia al aumento del potencial, nuevamente con un mayor aumento para el caso con cambios cíclicos de temperatura.
- iii. En el caso de la conductividad se aprecia una disminución y posterior estabilización para ambos casos, notando una clara diferencia en el primer ciclo con una mayor disminución de conductividad para la muestra con cambios de temperatura.
- iv. La evolución de la turbidez es distinta para los dos casos. En la situación con cambios de temperatura, se observa que en el primer ciclo se alcanza un máximo de turbidez que comienza a disminuir con los ciclos posteriores. Por otro lado, la muestra sin cambios de temperatura tiene un comportamiento ascendente. Sin embargo, se debe notar que el aumento en la turbidez se presenta en la medición posterior a la reposición de agua desde el Vaso C, por lo cual ésta puede estar influenciando la turbidez de la muestra. Más aún, se debe notar que al finalizar el ciclo de temperatura, la medición de la turbidez de la muestra del Vaso A presenta leves disminuciones.
- v. En el caso del oxígeno disuelto se aprecia un comportamiento similar para ambas situaciones, aunque la curva de la muestra sin cambios de temperatura se encuentra por sobre la curva de la muestra con los ciclos de temperatura. Una posible explicación es debido a que las muestras se encuentran a distinta temperatura (diferencia de 2,5 [°C]).
- vi. No se observan cambios importantes para los sólidos totales, por lo cual la temperatura no influye en este procedimiento. No obstante, se debe notar el comportamiento “parabólico” de la concentración de sólidos con el paso del tiempo.



a)



b)

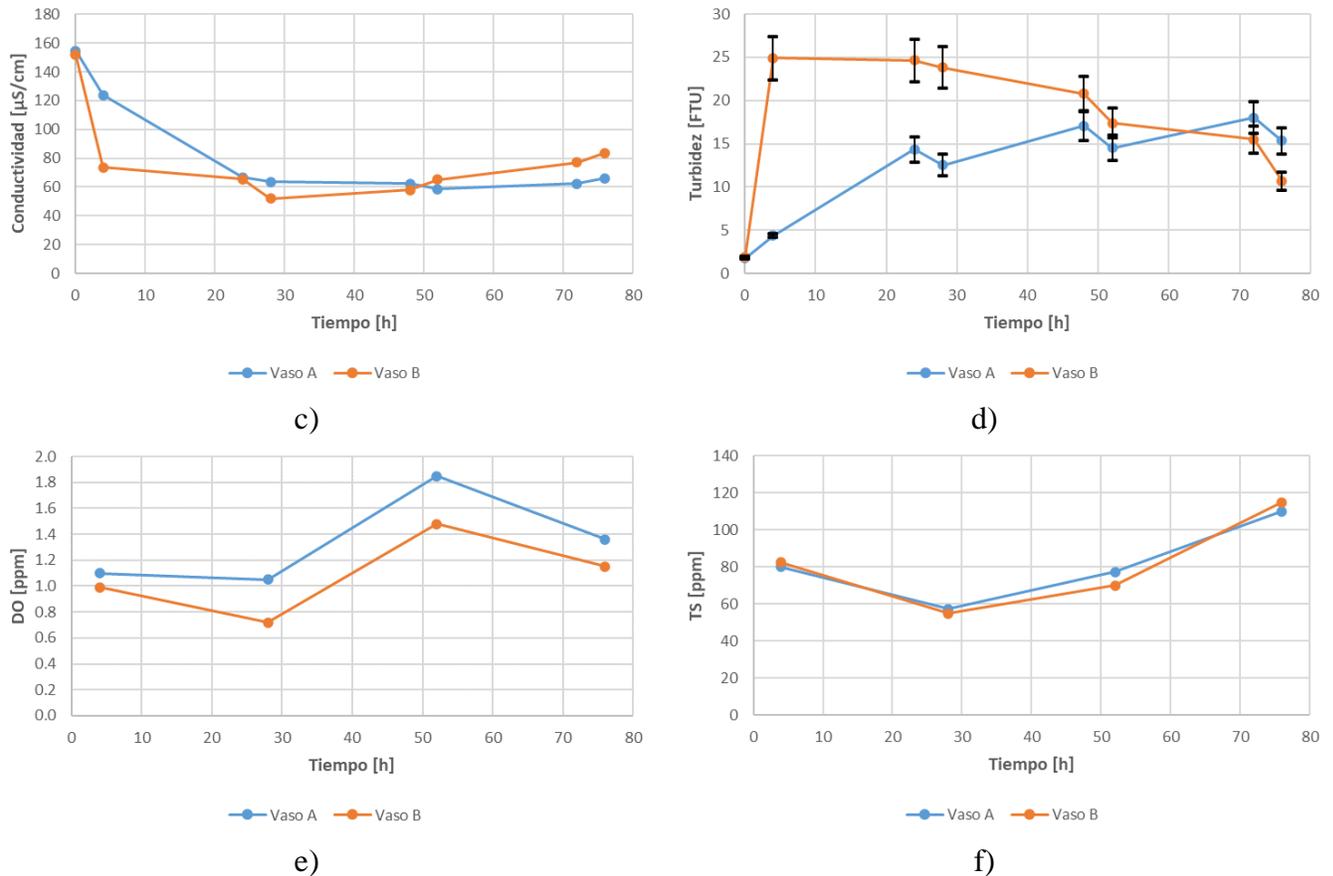


Figura 4-26: Gráficos de evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua destilada, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11)

II. Agua fresca

De los gráficos de la Figura 4-27 se observan los siguientes aspectos:

- i. Se presenta una situación similar a la evolución del pH del agua destilada, con una tendencia a la disminución del pH. Una diferencia apreciable es que el pH de la muestra con cambios de temperatura aumenta en dos ocasiones, las cuales al igual que en el caso anterior se asocian con la reposición de agua desde el Vaso C cuando en éste se ha añadido cal extra. Nuevamente, se intuye que la disminución de pH está asociada con la carbonación de ambas soluciones.
- ii. La evolución del E_h es similar a lo presentado en el agua destilada, con una tendencia al aumento del potencial y disminuciones producto de la reposición de agua.
- iii. En el caso de la conductividad se expone un comportamiento similar a la evolución de la conductividad en el agua destilada, con una disminución en el primer ciclo y posterior estabilización en el Vaso A, pero en el caso del Vaso B se aprecia un aumento en la conductividad. Esto puede estar influenciado por la reposición de agua, puesto que se añaden más iones en solución, lo que finalmente conlleva a un aumento de la conductividad.
- iv. Del gráfico de turbidez se aprecia nuevamente que en el primer ciclo los valores para la solución con cambios de temperatura aumentan considerablemente en comparación con la solución a temperatura ambiente. En ambos casos hay una tendencia al aumento de la turbidez.

- v. En el caso del oxígeno disuelto se aprecia que al final del primer ciclo los valores son mayores para el caso de variación de temperatura. Además, en ambas situaciones se aprecia una tendencia a la disminución del oxígeno disuelto. Sin embargo, se debe observar que en el segundo ciclo el valor de oxígeno disuelto es mayor para el caso sin variación de temperatura, situación que no se repite en otro ciclo.
- vi. Al igual que en el caso del agua destilada, los sólidos totales tienen una curva similar para ambas situaciones, con la diferencia de que los valores para la muestra con cambios de temperatura son mayores que los observados en la muestra sin cambios de temperatura. Esta diferencia puede ocurrir debido al aumento en la concentración producto de la evaporación y reposición del fluido.

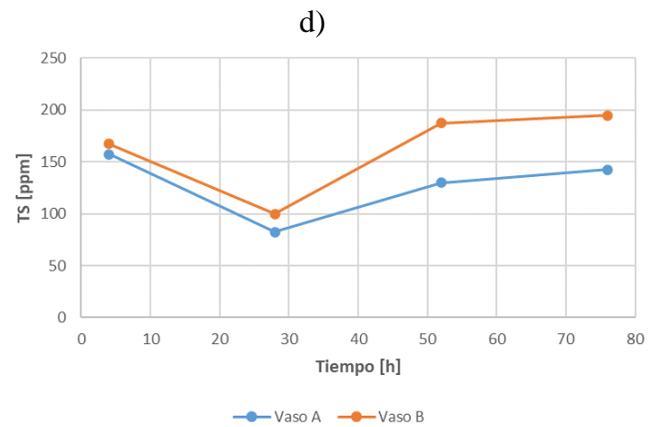
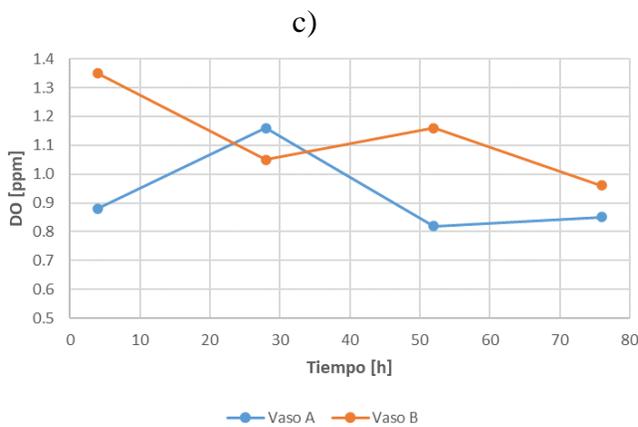
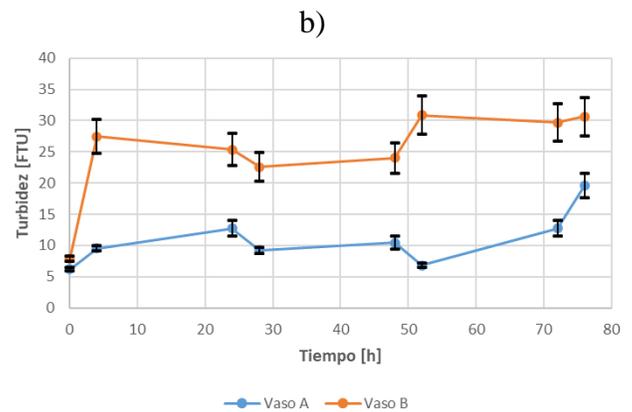
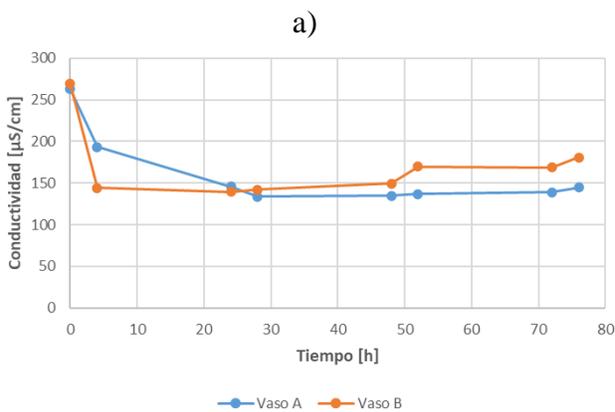
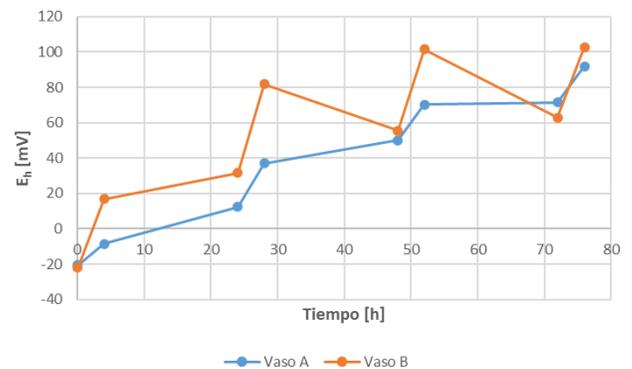
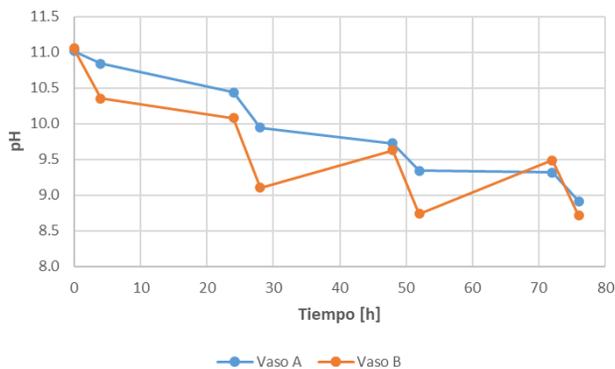
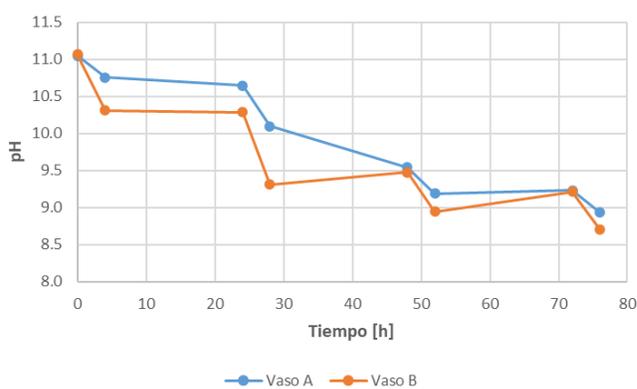


Figura 4-27: Gráficos de evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua fresca, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11)

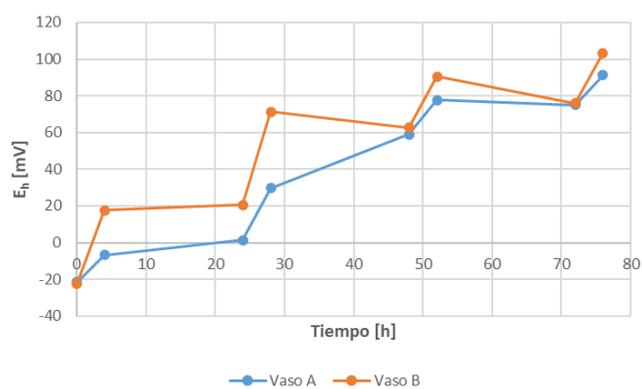
III. Agua recuperada

De los gráficos de la Figura 4-28 se observan los siguientes aspectos:

- i. Tanto para las curvas de pH como E_h se aprecian situaciones similares a las planteadas para el agua destilada y fresca, en donde el primer valor tiene una tendencia descendente (siendo menor para el caso de la muestra con variación de temperatura), y para el E_h se observa un comportamiento ascendente (con mayor valor para el caso con variación de temperatura).
- ii. En el caso de la conductividad se aprecia una diferencia con respecto a los tipos de agua anteriores. Es posible notar un aumento notable en los valores de conductividad para la muestra con cambios de temperatura, en contraste del caso sin variación de temperatura, en donde la conductividad permanece relativamente constante. En este caso se aprecia de mejor manera lo expuesto para el comportamiento de la conductividad del agua fresca, en donde, debido a la reposición de agua, se añade mayor cantidad de iones en comparación con el fluido sin cambios de temperatura, aumentando en cada ciclo la conductividad.
- iii. La turbidez en ambas muestras aumenta en el primer ciclo. Sin embargo, para la muestra sin variación de temperatura este valor permanece constante para las pruebas restantes, mientras que en el caso de la muestra con variación de temperatura aumenta con cada ciclo, observándose finalmente una turbidez mayor para esta muestra que para aquella sin variación de temperatura.
- iv. Las curvas de oxígeno disuelto son similares para ambas muestras, salvo en el último ciclo en donde se aprecia un aumento para el caso sin variación de temperatura.
- v. Finalmente, para el caso de los sólidos totales es posible observar que para la muestra con variación de temperatura en cada ciclo estos sólidos aumentan considerablemente, a diferencia del caso sin variación de temperatura en que la curva se mantiene ligeramente constante. De manera similar a lo expuesto para el agua fresca, se puede intuir que producto de la evaporación y reposición del fluido, es esperable que la cantidad de sólidos disueltos y suspendidos aumente, traduciéndose en el alza de los sólidos totales de la muestra con cambios de temperatura. Esto a su vez, puede influir en la disminución de la concentración de oxígeno disuelto.



a)



b)

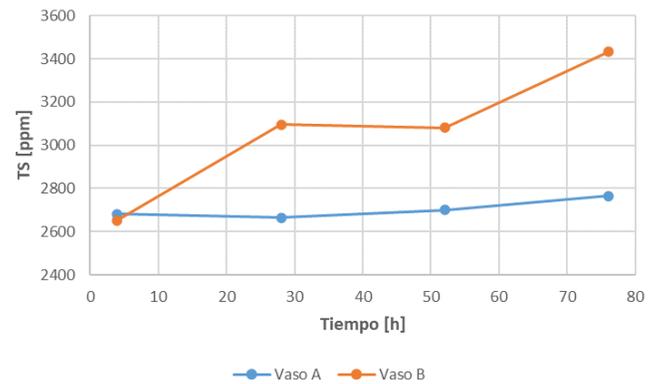
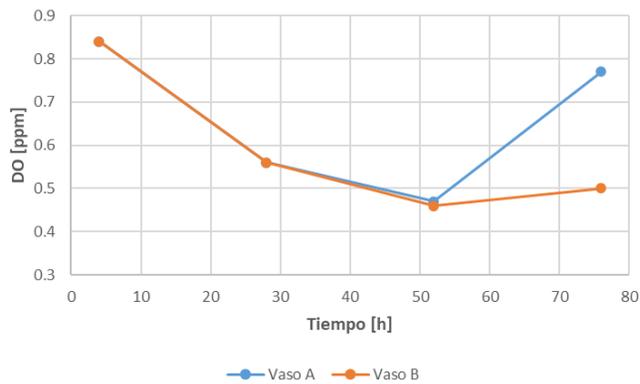
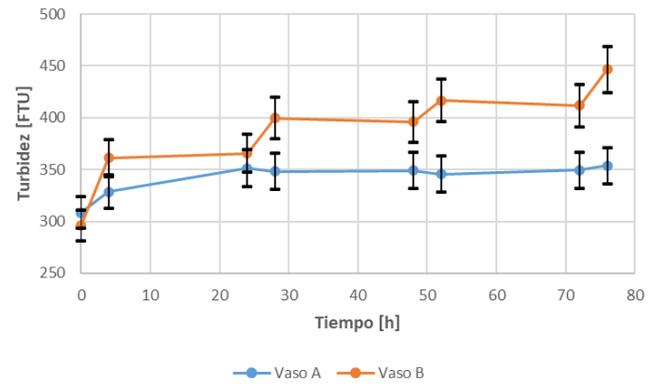
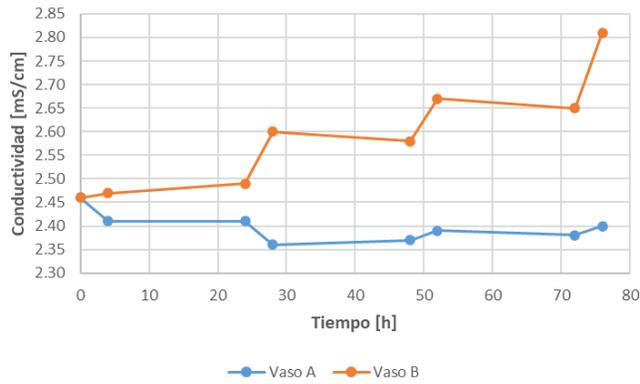


Figura 4-28: Gráficos de evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales con y sin variación de temperatura de agua recuperada, vaso B y vaso A, respectivamente (pH inicial de 11)

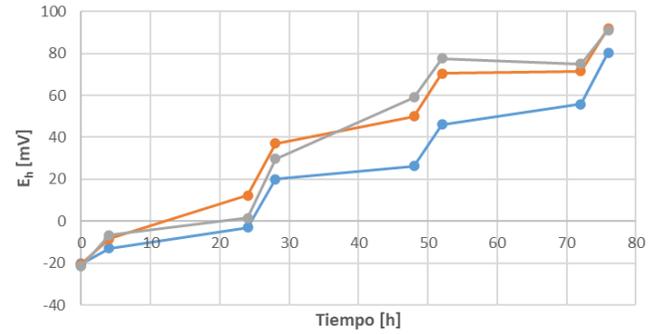
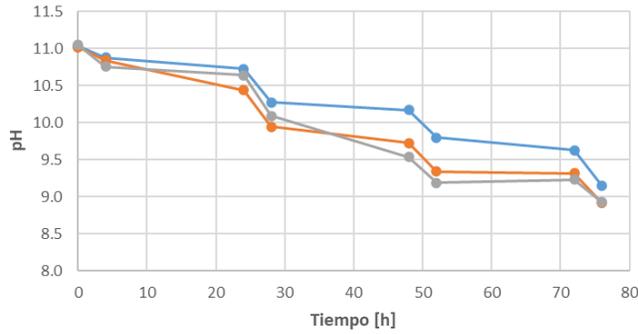
4.2.3. Comparación de muestras sin cambios de temperatura

De los gráficos de la Figura 4-29 se debe mencionar que en aquellos casos en que se tengan dos ejes, los valores para el agua recuperada se observan con el eje secundario (eje de la derecha). Es posible apreciar los siguientes aspectos:

- i. Para el caso de pH y E_h en los tres tipos de agua se tiene un comportamiento similar, con las situaciones descritas anteriormente en que el pH disminuye (carbonación) y el E_h aumenta con los ciclos.
- ii. En el caso de la conductividad, es posible observar un comportamiento similar entre los tres tipos de agua, en donde existe una disminución el primer ciclo, y en los ciclos posteriores se mantiene con valores relativamente constantes, con una mayor irregularidad para el agua recuperada. Se debe notar además los valores para cada tipo de agua, en donde la curva para agua destilada se encuentra bajo la curva de agua fresca, comportamiento esperado para ambos tipos de agua, y con mediciones más altas para el caso del agua recuperada (mayor cantidad de iones disueltos).
- iii. En el caso de la turbidez, para los tres tipos de agua se tiene una tendencia ascendente, la cual es más errática para el agua destilada y el agua fresca debido a que son valores de menor magnitud. Se aprecia además lo esperado para la turbidez del agua recuperada, en donde ésta es mayor que para las otras aguas. Sin embargo, es posible notar que la turbidez es mayor para

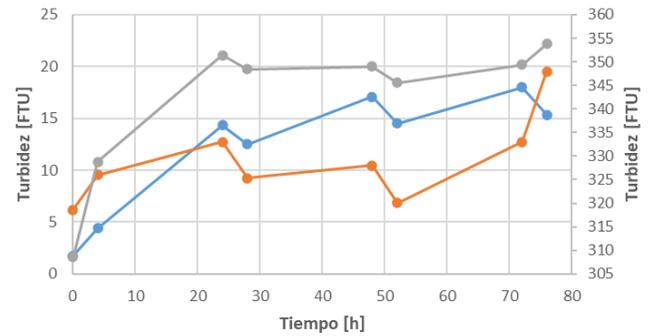
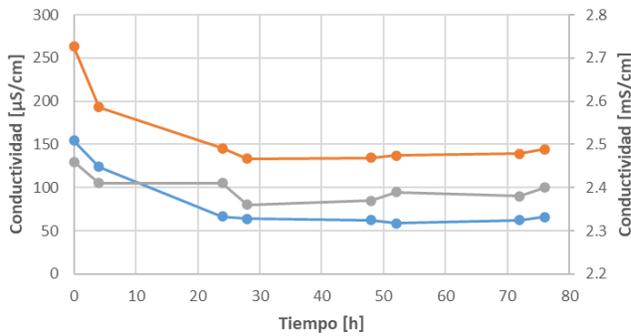
el agua destilada que para el agua fresca, lo que puede diferir del comportamiento esperado de esta propiedad.

- iv. En el caso del oxígeno disuelto se nota que los valores son mayores para el agua destilada y menores para el agua recuperada, lo cual es lo esperado puesto que a mayor concentración iónica y sólidos totales, menor es la solubilidad del oxígeno. Esto último se aprecia también en el gráfico de sólidos totales, en que se presenta una disminución y posterior aumento de los valores para las tres muestras de agua.



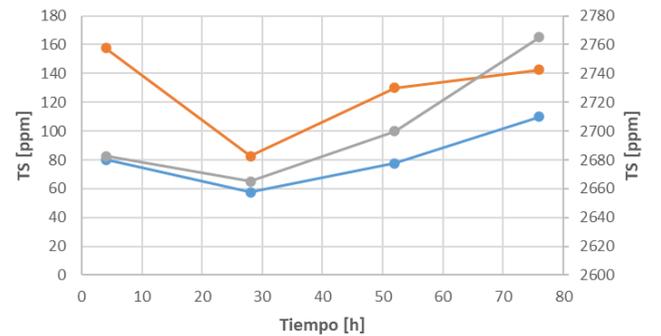
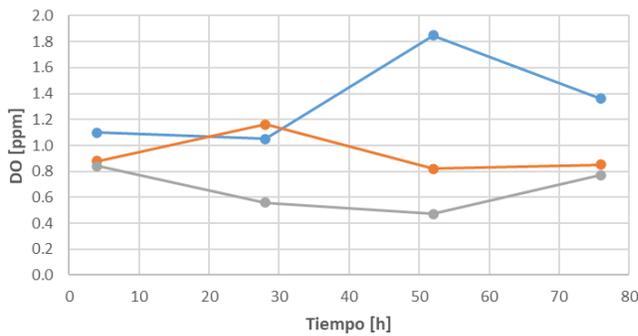
a)

b)



c)

d)



e)

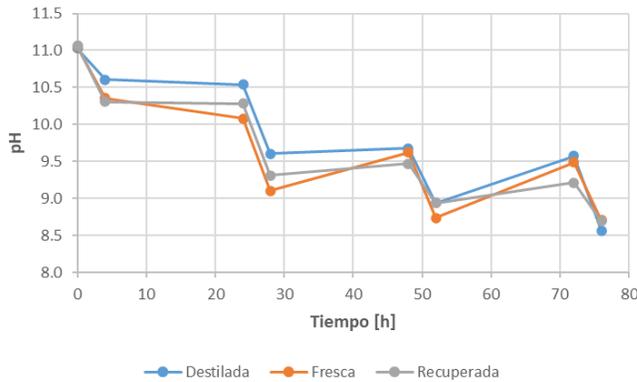
f)

Figura 4-29: Gráficos de comparación de la evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales para muestras sin cambios de temperatura (pH inicial de 11)

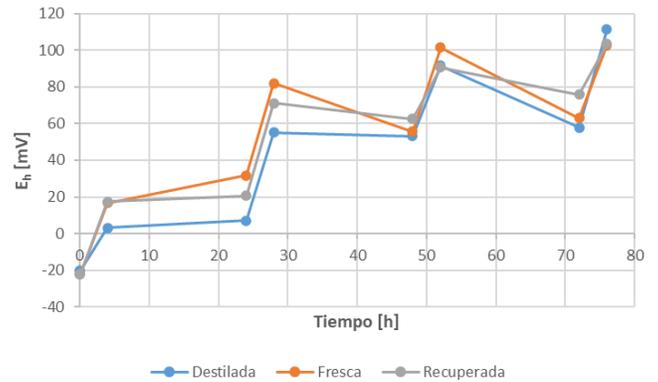
4.2.4. Comparación de muestras con cambios de temperatura

Similar a la sección anterior, en el caso de que los gráficos de la Figura 4-30 presente dos ejes, los valores para el agua recuperada se observan con el eje secundario (eje de la derecha). Es posible apreciar los siguientes aspectos:

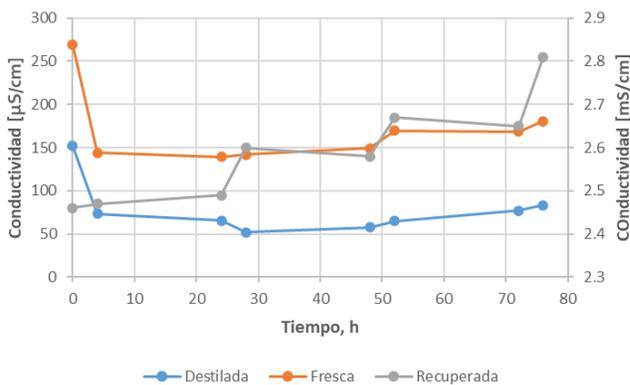
- i. En los casos de pH y E_h se vuelva a observar las situaciones descritas previamente. A diferencia de los casos en que no se tiene variación de temperatura, la disminución de pH y aumento de E_h son más erráticas, principalmente se aprecian aumentos de pH y disminución de E_h los cuales están asociados con la reposición de agua.
- ii. El comportamiento de la conductividad es similar para el agua destilada y agua fresca, en donde hay una disminución en el primer ciclo y luego un aumento lento en los valores. Sin embargo, en el caso del agua recuperada la conductividad aumenta considerablemente con el paso del tiempo.
- iii. En el caso de la turbidez, se tienen comportamientos distintos para cada tipo de agua. Si bien tanto la turbidez del agua fresca como del agua destilada aumentan en el primer ciclo y luego presentan una disminución, el primer tipo de agua posteriormente presenta un aumento en la turbidez, a diferencia del agua destilada en que esta propiedad disminuye de manera constante. Por otro lado, la turbidez del agua recuperada aumenta constantemente con cada ciclo.
- iv. Para el caso de oxígeno disuelto y sólidos totales se tienen situaciones similares a las descritas previamente para las muestras sin variación de temperatura, salvo para la curva de sólidos totales del agua recuperada en que esta propiedad aumenta con el transcurso del tiempo. Nuevamente, este aumento puede estar relacionado con la evaporación y reposición del agua.



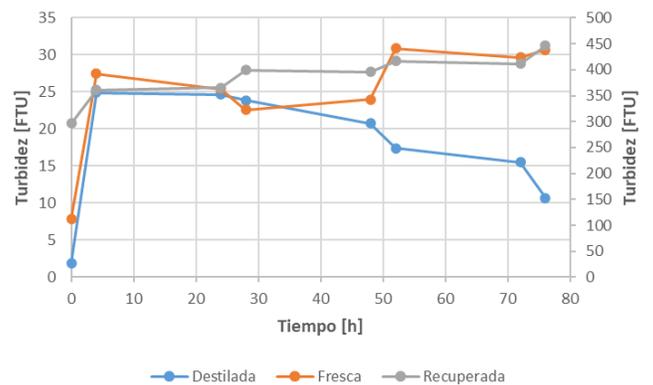
a)



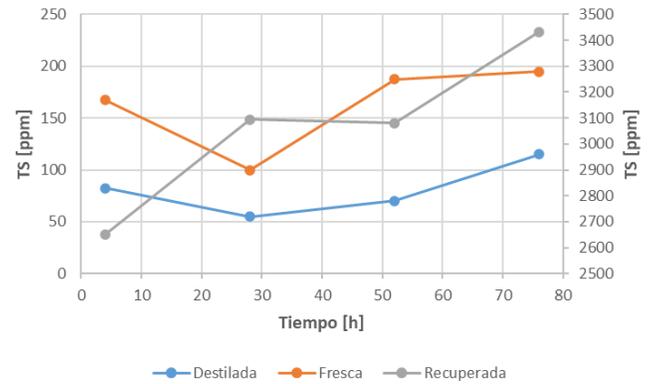
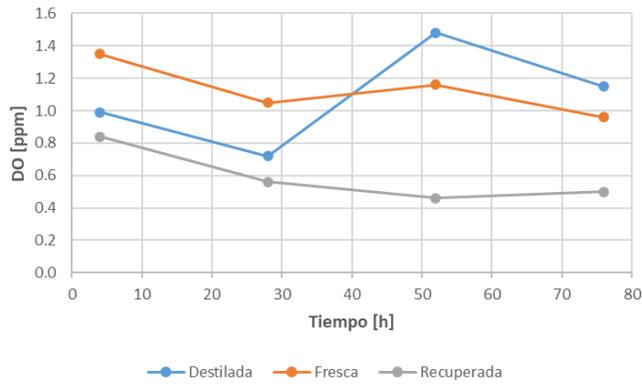
b)



c)



d)



e)

f)

Figura 4-30: Gráficos de comparación de la evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales para muestras con cambios de temperatura (pH inicial de 11)

Finalmente, en la Figura 4-31 se muestra el diagrama de Pourbaix para los valores de pH y potencial observados. Es evidente que todas las muestras se encuentran dentro de la zona de estabilidad del agua, mostrándose además la relación inversa observada entre estos parámetros para los tres tipos de agua, con y sin variación de la temperatura.

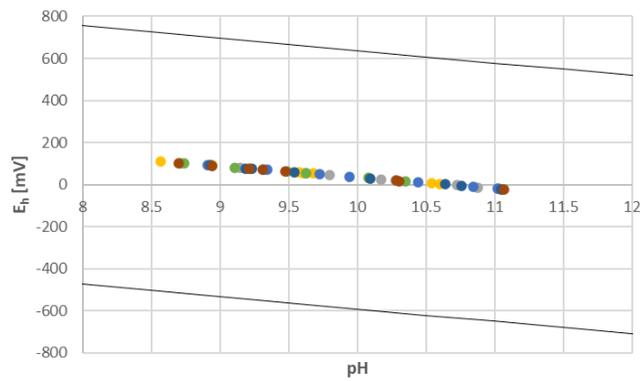


Figura 4-31: Diagrama de Pourbaix de muestras de agua con y sin variación de temperatura

5. Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

Mediante el trabajo desarrollado en esta memoria y del análisis de resultados es posible establecer las conclusiones y recomendaciones presentadas a continuación.

5.1. Conclusiones

- Se concluye que la recuperación metalúrgica final de la combinación de mineral de alto tiempo de residencia y agua de alta fuerza iónica es mayor que la obtenida en la combinación de mineral de bajo tiempo de residencia y agua de baja fuerza iónica, con valores de 87,41% y 86,42%, respectivamente. No obstante, durante los primeros 4 [min] del proceso, la recuperación es mayor para *M-BTR / A-BFI* siendo de 78.54%, mientras que *M-ATR / A-AFI* presenta una recuperación de 76.09%. Por otro lado, se observa de esta combinación una ley de cobre de 3,65%, mientras que la obtenida para la combinación *M-BTR / A-BFI* es de 5,67%.
- Sin embargo, al comparar las cuatro combinaciones planteadas, se destaca que la mayor eficiencia la presenta *M-BTR / A-AFI*, para la cual se obtiene una recuperación metalúrgica de 87,98% y una ley acumulada de 6,28%.
- Se nota que la recuperación metalúrgica es superior para las combinaciones con el mineral de bajo tiempo de residencia para los primeros minutos de flotación. Esto puede ocurrir puesto que el mineral de alto tiempo de residencia esté ligeramente oxidado o cubierto por especies hidrofílicas en su superficie, haciendo que la fracción de mineral de flotación rápida sea menor. Análogamente, se tienen valores de recuperación superiores al flotar con el agua de mayor fuerza iónica, a causa de que se evita la coalescencia de burbujas promoviendo la tasa de colisión entre éstas y las partículas, y se disminuye la repulsión electrostática entre ambas, por consecuencia aumentando la probabilidad de formación del agregado.
- Para ambos minerales se aprecian leyes superiores en las combinaciones realizadas con las muestras de agua de alta fuerza iónica. Este comportamiento es contrario a lo esperado con respecto a la relación de fuerza iónica y recuperación de ganga, razón por la que se espera que puede ocurrir debido a la mayor concentración de Ca^{2+} en este tipo de agua que presente efectos depresores. Por otro lado, se obtienen menores leyes en las combinaciones asociadas al mineral de alto tiempo de residencia, lo cual es producto de una mayor entrada de ganga mineral al concentrado. En particular, se observa una espuma de mayor altura en las pruebas realizadas con este mineral, la cual rebalsa en el primer minuto de flotación, traducándose en una alta recuperación másica y de agua en este período de tiempo.
- El fenómeno previamente indicado referente a la espuma explica el comportamiento no estrictamente decreciente observado para las muestras de mineral *M-ATR*, puesto que al presentar mayor recuperación de ganga en el primer minuto, las leyes parciales son relativamente menores a las determinadas para las combinaciones con mineral *M-BTR*. No obstante, una vez que se obtiene una espuma más estable en los tiempos posteriores, ocurre un aumento en la ley debido a que hay una disminución en la recuperación de agua y de ganga.
- La velocidad de flotación del material que flota rápidamente es menor en las muestras de mineral *M-ATR*. Esto se corrobora a partir de los modelos cinéticos, en donde las constantes cinéticas son superiores para las combinaciones con mineral *M-BTR*, junto con una mayor fracción de componentes de cinética lenta para el mineral *M-ATR*. Adicionalmente, se obtienen

- constantes cinéticas mayores para las combinaciones con agua *A-AFI*, esto producto de la mayor fuerza iónica y los efectos previamente indicados respecto a la formación del agregado.
- Se considera que el modelo Kelsall Modificado es el que mejor ajusta los datos experimentales para todas las combinaciones, de donde se obtiene el menor error relativo promedio. No obstante, se debe tener en cuenta que, debido a la mayor cantidad de parámetros que definen el modelo, existe una dilución en los valores de estos. Por otro lado, el modelo Gamma también se ajusta bien a los datos experimentales, con un bajo error relativo promedio. Sin embargo, no se considera como el mejor modelo puesto que los valores obtenidos para el parámetro R_{∞} son notablemente mayores a la recuperación metalúrgica experimental, especialmente para las combinaciones con mineral *M-ATR*.
 - Para el tiempo final de flotación todas las combinaciones alcanzan una recuperación entre 86% y 88%, lo cual indica que la fracción de mineral no recuperable es de aproximadamente 15%. Mediante el procedimiento de Imaizumi e Inoue (1963) se tiene que esta porción de mineral varía entre 16,15% y 20,16%, para la combinación *M-BTR / A-AFI* y *M-ATR/ A-BFI*, respectivamente.
 - La flotación verdadera de mineral hidrofóbico es mayor para la combinación de muestras de menor tiempo de contacto en comparación con las muestras de mayor tiempo de contacto, siendo de 69,36% y 65,35%, respectivamente. Por otro lado, la porción de partículas hidrofóbicas recuperadas por flotación por arrastre es mayor en esta última combinación, con un valor de 25,24% y de 19,74% para *M-BTR/A-BFI*. Adicionalmente, el valor de recuperación por flotación verdadera mayor y porción de partículas recuperadas por arrastre menor están asociadas a la combinación *M-BTR/A-AFI*, con valores de 74,66% y 15,14%, respectivamente.
 - Debido al comportamiento no estrictamente decreciente de las leyes de cobre asociadas al mineral *M-ATR*, no es posible ajustar los datos mediante el modelo AREV para modelar la recuperación en función de la razón de enriquecimiento.
 - En general no se logra concluir que debido a un aumento en la conductividad del agua existe una disminución en las leyes. En particular se aprecia que la ley en función de la conductividad presenta un comportamiento parabólico, con un valor máximo para 4,31 [mS/cm].
 - A partir de las conclusiones anteriormente expuestas, se plantea la posibilidad de aumentar la eficiencia del proceso al flotar una pulpa conformada por mineral relativamente fresco, y agua recirculada que presente una mayor fuerza iónica que el agua fresca.
 - Respecto al estudio de variación cíclica de temperatura se debe destacar que existe una evolución distinta al comparar las propiedades de la muestra de agua con temperatura constante y la muestra de agua con variación de temperatura. En todos los casos se observa una disminución del pH al transcurrir el tiempo, siendo mayor esta disminución para las muestras con cambio de temperatura. Se intuye que esta disminución se asocia con la carbonación del agua.
 - En el caso de la conductividad se logra evidenciar una disminución y posterior estabilización para los tres tipos de agua sin cambios de temperatura, mientras que las muestras con cambios de temperatura presentan un ligero aumento luego de la disminución del ciclo inicial, siendo ésta de mayor magnitud. No obstante, en el caso del agua recuperada con cambios de temperatura no se observa esta disminución, sino que inmediatamente aumenta la conductividad. De igual manera, se observa en los sólidos totales una disminución y posterior aumento de los valores, lo cual se condice con la conductividad de las muestras. Este fenómeno

se encuentra relacionado con la evaporación del fluido en las muestras de cambios de temperatura, lo cual conlleva a un aumento en la concentración de sólidos suspendidos y disueltos.

- Finalmente se debe notar que, si bien las muestras sometidas a cambios de temperatura y el agua recirculada presentan valores similares en las propiedades de pH, E_h y oxígeno disuelto, tanto la conductividad, como la turbidez y la concentración de sólidos totales presentan valores considerablemente superiores en el agua recirculada, puesto que ha estado en contacto con mineral. En conclusión, estos parámetros no pueden ser alcanzados tan solo modificando constantemente la temperatura de las soluciones.

5.2. Recomendaciones

Al inicio de este documento se indica que ciertos parámetros no se encuentran dentro del alcance de este trabajo, como variaciones en las condiciones operacionales (pH, velocidad de agitación, flujo de aire, dosificación de reactivos, etc.), por lo cual, en el caso de continuar con este trabajo se propone estudiar el efecto de estas variables en la eficiencia de la flotación, junto con estudios a la viscosidad de la pulpa. Además, se propone realizar una mayor cantidad de pruebas para generar una reconciliación de datos que permitan una mayor confiabilidad de los resultados.

De la misma manera, se plantea no solo estudiar la eficiencia de la flotación en términos de las leyes y recuperación de cobre, sino también de otros metales como molibdeno y hierro, o también de minerales de ganga para determinar de manera cuantitativa el efecto de la calidad química del agua en la recuperación de ganga.

Finalmente, se sugiere realizar análisis químico a la superficie de ambas muestras de mineral para determinar la evolución de éste al estar en contacto distinto tiempo con el agua, ya sea por oxidación de la superficie o adsorción de partículas. Análogamente, se recomiendan análisis del agua recuperada de las pruebas, tanto las asociadas a los concentrados como a la cola, para estudiar iones que puedan estar disueltos o remanentes de reactivos.

6. Capítulo VI: Bibliografía

1. ASTM D1125-95(1999), Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
2. Baalousha, M.; “Effect of nanomaterial and media physicochemical properties on nanomaterial aggregation kinetics”; *Nanoimpact* 6, 55-68; 2017.
3. Biçak, Ö., Ekmekçi, Z., Can, M., Öztürk, Y., “The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu-Zn sulfide ore”; *International Journal of Mineral Processing* 102-103, 32.37; 2012.
4. Boujounoui, K., Abidi, A., Baçaoui, A., El Amari, K., Yaacoubi, A.; “Flotation process water recycling investigation for the complex Draa Sfar sulphide ore, Morocco”; *Mine Water Environ* 37, 75-87; 2018.
5. Chander, S.; “A brief review of pulp potentials in sulfide flotation”; *International Journal of Mineral Processing* 72, 141-150; 2003.
6. Chang, R.; Colledge, W., “Química séptima edición”; Editorial Mcgraw Hill; 108-128, 671-; 2002.
7. Comisión Chile del Cobre; “Consumo de agua en la minería del cobre al 2019”; Dirección de Estudios y Políticas Públicas; 2020.
8. Corin, K.C., Wiese, J.G.; “Investigating froth stability: A comparative study of ionic strength and frother dosage”; *Minerals Engineering* 66-88, 130-134; 2014.
9. Dowling, E.C., Klimpel, R.R., Aplan, F.F.; “Model discrimination in the flotation of a porphyry copper ore”; *Mining, Metallurgy & Exploration* 2, 87 – 101; 1985.
10. Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X., Williams, R.A.; “Particle deposition and aggregation”; *Batterworth Heinemann, Oxford*, pp. 157 – 173; 1995.
11. Farrokhpay, S., Zanin, M.; “An investigation into the effect of water quality on froth stability”; *Advandec Powder Technology* 23, 493-497; 2012.
12. Fondriest Environmental, Inc. “Dissolved Oxygen.” *Fundamentals of Environmental Measurements*. 19 Nov. 2013. Web. < <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/> >.
13. Fondriest Environmental, Inc. “Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids.” *Fundamentals of Environmental Measurements*. 3 Mar 2014. Web. < <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/> >.
14. Fondriest Environmental, Inc. “Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity.” *Fundamentals of Environmental Measurements*. 13 Jun. 2014. Web. < <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/> >.
15. García-Zúñiga, H.; “La recuperación por flotación es una función exponencial del tiempo”; *Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería* 47, 83-86; 1935.
16. Guo, B., Liu, X., Tan, X.; “Other flow assurance issues”; “*Petroleum production engineering*”; 663-699; 2017.
17. Hale, G., “Acidic seas: how carbon dioxide is changing the oceans”; *ChemMatters* February 2018 Issues, 10-12; 2018.
18. Imaizumi, T., Inoue, T.; “Kinetic consideration of froth flotation”; 6th International Mineral Processing Congress, 581-593; 1963

19. Kalegowda, Y., Chan, Y.L., Wei, D.H., Harmer, S.; "X-PEEM, XPS and ToF-SIMS characterisation of xanthate induced chalcopyrite flotation: Effect of pulp potential"; *Surface Science* 635, 70-77; 2015.
20. Kester, D.R., Duedall, I.W., Connors, D.N., Pytkowicz, R.M.; "Preparation of artificial seawater"; *Limnol. Oceanogr.* 12 (1), 176-179; 1967.
21. Kracht, W., Orozco, Y., Acuña, C.; "Effect of surfactant type on the entrainment factor and selectivity of flotation at laboratory scale"; *Minerals Engineering* 92, 216-220; 2016.
22. Kuopanportti, H., Suorsa, T., Pöllänen, E.; "Effects of oxygen on kinetics of conditioning in sulphide ore flotation"; *Minerals Engineering* 10, 1193-1205; 1997.
23. Levay, G., Smart, R. St. C., Skinner, W.M.; "The impact of water quality on flotation performance"; *The Journal of the Sout African Institute of Mining and Metallurgy*, 69-75; 2001.
24. Li, D.; "Microfluidic methods for measuring zeta potential"; *Interface Science and Technology* 2, 617-640; 2004.
25. Liu, L., Rao, S.R., Finch, J.A.; "Technical note laboratory study on effect of recycle water on flotation of a Cu/Zn sulphide ore"; *Minerals Engineering* 6, 1183-1190; 1993.
26. Liu, W., Moran, C.J., Vink, S.; "A review of the effect of water quality on flotation"; *Minerals Engineering* 53, 91-100; 2013.
27. Mu, Y., Peng, Y.; "The effect of saline water on copper activation of pyrite in chalcopyrite flotation"; *Minerals Engineering* 131, 336-341; 2019.
28. Muzenda, E.; "An investigation into the effect of water quality on flotation performance"; *World Academy of Science, Engineering and Technology* 69, 237-241; 2010.
29. Nagaraj, D.R., Wang, S.S., Avotins, P.V., Dowling, E.; "Structure-activity relationships for copper depressants"; *SME Preprint*, 83-100; 1983.
30. Oncsik, T., Trefalt, G., Borvocek, M., Szilagy, I.; "Specific ion effects on particle aggregation induced by monovalent salts within the Hofmeister Series"; *Langmuir* 31, 3799-3807; 2015.
31. Pate, K., Safier, P.; "Chemical metrology methods for CMP quality"; *Advances in Chemical Planarization*, 299-325; 2016.
32. Peng, Y., Zhao, S.; "The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation"; *Minerals Engineering* 24, 1687-1693; 2011.
33. Ramos, O., Castro, S., Laskowski, J.S.; "Copper-molybdenum ores flotation in sea water floatability and frothability"; *Minerals Engineering* 53, 108-112; 2013.
34. Sasaki, K., Takatsugi, K., Ishikura, K., Hirajima, T.; "Spectroscopic study on oxidative dissolution of chalcopyrite, enargite and tennantite at different pH values"; *Hydrometallurgy* 100, 144-151; 2010.
35. Sepalveda-Suarez, C., Castro, S.H.; "The effect of redox potential on the selective flotation of molybdenite by using Anamol-D as copper depressant"; *Proceedings International Symposium on Electrochemistry in Mineral and Metal Processing* 96-6; 98 – 107; 1996.
36. Sheni, N., Corin, K., Wiese, J.; "Considering the effect of pulp chemistry during flotation on froth stability"; *Minerals Engineering* 116, 15-23; 2018.
37. Smith, P.G., Warren, L.J.; "Entrainment of particles into flotation froths"; *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 5, 123-145; 1989.
38. Solomon, T.; "The definition and unit of ionic strength"; *Journal of chemical education* 78(12), 1691-1692; 2001.

39. Trick, J.K., Stuart, M., Reeder, S.; “Contaminated groundwater sampling and quality control of water analyses”; *Environmental Geochemistry*, 29-57; 2008.
40. Vera, M.A.; Franzidis, J-P; Manlapig, E.V.; “Estimation of froth zone recovery in flotation cells”; VI SHMMT / XVIII ENTMI, 259-263; 2001.
41. Wang, B., Peng, Y.; “The effect of saline water on mineral flotation – A critical review”; *Minerals Engineering* 66-68, 13-24; 2014
42. Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T., Lauten, R.A.; “The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation”; *Applied Clay Science* 114, 48-52; 2015.
43. Wills, B.A., Finch, J.A.; “Wills’s Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery”; 8th Edition; 2015.
44. Yianatos, J.; “Flotación de minerales”; 2005.
45. Yu, Y., Ma, L., Cao, M., Liu, Q.; “Slime coatings in froth flotation: A review”; *Minerals Engineering* 114, 26-36; 2017.

7. Anexos

7.1. Anexo A: Memoria de cálculo

En este anexo se encuentran algunas de las fórmulas esenciales utilizadas para el análisis de los datos experimentales.

i. Preparación de la pulpa

El volumen de agua se calcula a partir de la Ecuación 7-1:

$$V_L = V_T - V_S \quad (7.1)$$

Ecuación 7-1: Cálculo de volumen de agua

Donde V_T corresponde al volumen de la pulpa [L] y V_S es el volumen de mineral [L]. Al reescribir esta ecuación en función de las masas de mineral y agua se obtiene la relación de la Ecuación 7-2, en donde ρ_L y ρ_S corresponden a las densidades del agua y mineral [kg/L], respectivamente, y M_S es la masa de mineral [kg].

$$M_L = \rho_L \left(V_T - \frac{M_S}{\rho_S} \right) \quad (7.2)$$

Ecuación 7-2: Cálculo de la masa de agua

Por otro lado, el porcentaje de sólidos de la pulpa se obtiene mediante la Ecuación 7-3, donde M_T es la masa de la pulpa [kg]. Al despejar la masa de agua e igualar con la Ecuación 7-2, se obtiene la masa de mineral requerida para un porcentaje de sólidos y volumen de pulpa dados (Ecuación 7-4).

$$C_P [\%] = \frac{M_S}{M_S + M_L} \times 100 \quad (7.3)$$

Ecuación 7-3: Cálculo del porcentaje de sólidos en masa

$$M_S = \frac{V_T \rho_L}{\frac{1 - C_P}{C_P} + \frac{\rho_L}{\rho_S}} \times 100 \quad (7.4)$$

Ecuación 7-4: Cálculo de masa de mineral en función de porcentaje de sólidos y volumen de pulpa

ii. Flujo de aire

El flujo de aire requerido para la flotación se calcula mediante la Ecuación 7-5:

$$Q [LPM] = A \times J_g \times \frac{60}{10^3} \quad (7.5)$$

Ecuación 7-5: Cálculo de flujo de aire

Donde A es el área transversal de la celda [cm^2] y J_g es la velocidad superficial del gas.

iii. Leyes parciales y acumuladas

La masa parcial de cobre en el concentrado i se estima mediante la relación mostrada en la Ecuación 7-6:

$$m_i[g] = l_i \times M_i \quad (7.6)$$

Ecuación 7-6: Cálculo de la masa parcial de cobre en el concentrado i

Donde l_i es la ley parcial de cobre en el concentrado i y M_i corresponde a la masa total parcial del concentrado i [g]. Por otro lado, las leyes acumuladas de cobre hasta el concentrado j se determinan a partir de la Ecuación 7-7:

$$l_j = \frac{\sum_{i=1}^j m_i}{\sum_{i=1}^j M_i} \quad (7.7)$$

Ecuación 7-7: Cálculo de la ley acumulada de metal

iv. Recuperación de agua

La recuperación de agua es posible de estimar a partir de la Ecuación 7-8, donde $M_{L,C}$ y $M_{L,A}$ son las masa de agua en el concentrado y en la alimentación [kg], respectivamente. Cabe destacar que la masa de agua en la alimentación considera tanto el agua empleada para la formación de la pulpa como el agua agregada posteriormente para reposición del agua recuperada en el concentrado.

$$R_w[\%] = \frac{M_{L,C}}{M_{L,A}} \times 100 \quad (7.8)$$

Ecuación 7-8: Cálculo de recuperación de agua

v. Diferencia cuadrática

A partir de este método es posible ajustar los modelos a los datos experimentales. El objetivo es minimizar la expresión de la Ecuación 7-9 al variar los parámetros que definen cada modelo, en donde $y_{i,e}$ es el dato experimental para el tiempo i , y $y_{i,c}$ es el valor calculado a partir del modelo para el tiempo i .

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i,e} - y_{i,c})^2} \quad (7.9)$$

Ecuación 7-9: Cálculo de la raíz de la suma de diferencia cuadrática

vi. Splines cúbicos

En este procedimiento se busca determinar n polinomios cúbicos de la forma presentada en la Ecuación 7-10, que se ajusten a $n+1$ datos experimentales $(x_0, y_0), \dots, (x_n, y_n)$. En la ecuación se definen 4 constantes $(a_{0,k}, a_{1,k}, a_{2,k}$ y $a_{3,k})$ para cada polinomio, lo que hace un total de $4n$ constantes.

$$f_k(x) = a_{0,k} + a_{1,k}x + a_{2,k}x^2 + a_{3,k}x^3 \quad (7.10)$$

Ecuación 7-10: Polinomio para splines cúbicos

Para determinar estas constantes se necesitan $4n$ ecuaciones, las cuales se muestran en la Tabla 7-1. Luego, haciendo uso de la Ecuación 7-9, se obtienen las constantes que minimicen la diferencia y mejor ajusten los polinomios a los datos experimentales.

Tabla 7-1: Ecuaciones para determinación de constantes en splines cúbicos

Ecuación	Condición
$f_k(x_{k-1}) = y_{k-1}$	$k = 1, \dots, n$
$f_k(x_k) = y_k$	$k = 1, \dots, n$
$f'_k(x_k) = f'_{k+1}(x_k)$	$k = 1, \dots, n - 1$
$f''_k(x_k) = f''_{k+1}(x_k)$	$k = 1, \dots, n - 1$
$f''_k(x_{k-1}) = 0$	$k = 1, n$

vii. Ajuste polinomial

Mediante este método se busca identificar las variables que influyen los datos experimentales obtenidos. Para ello, se propone un polinomio de la forma presentada en la Ecuación 7-11, en donde f_i corresponde a los resultados experimentales, como la recuperación metalúrgica o ley para las 4 combinaciones, a_j son constantes que permiten identificar la influencia de la variable x_{ij} en los resultados. Cabe notar que estas variables pueden ser de grado 1, grado 2, o bien combinaciones entre variables. El ajuste se realiza a partir de la minimización de la raíz de la suma de diferencia cuadrática.

$$f_i = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \times x_{ij} \quad (7.11)$$

Ecuación 7-11: Ecuación para ajuste polinomial

7.2. Anexo B: Propiedades de muestras de agua para flotación

En este anexo se encuentra la concentración de especies determinada a partir del análisis ICP de cada muestra de agua previo a la flotación. Se señalan los valores medidos a las propiedades durante la semana de estudio de evolución de las muestras mientras se encuentran almacenadas en los barriles. Se enseñan los valores promedios y desviación estándar relativa utilizados en la sección 4.1.1 para el análisis. Adicionalmente se entregan gráficos de la evolución de las propiedades de cada muestra en el tiempo.

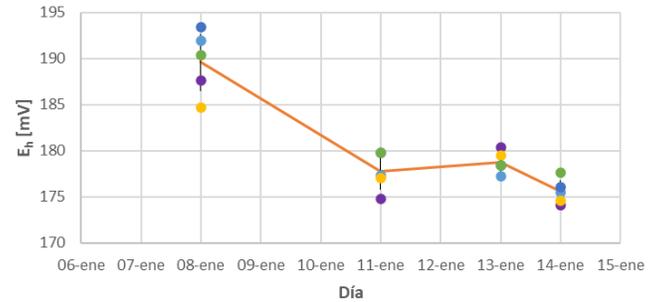
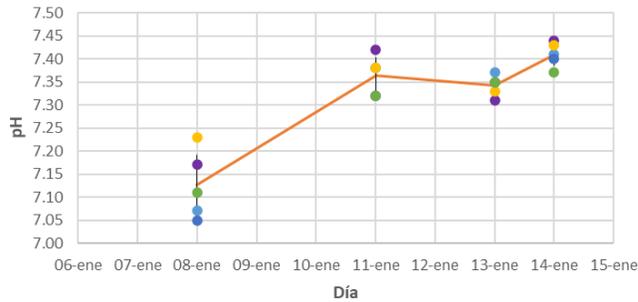
Tabla 7-2: Concentración de especies disueltas en las muestras de agua obtenidas a partir de ICP

Analyte Symbol	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr
	D-ICPMS											
Tipo de Método												
Unidad	µg/L											
Limite	5	1	0.1	1	2	10	30	10	1	0.1	0.1	0.5
AGUA A-BFI	45006	<1	<0.1	717	<2	553	53553	458627	<1	<0.1	<0.1	<0.5
AGUA A-AFI	72694	<1	<0.1	455	<2	1955	82025	563131	<1	<0.1	<0.1	<0.5
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb	Sr
	D-ICPMS											
	µg/L											
	0.1	10	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	0.005	0.04
	2,5	<10	<0.005	<0.3	59,9	<0.5	2,77	<0.01	0,63	<0.2	203,86	1297,46
	0,9	<10	<0.005	<0.3	73,9	14,3	5,71	<0.01	0,52	<0.2	222,378	146131
	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba
	D-ICPMS											
	µg/L											
	0.003	0.01	0.005	0.1	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	0.001	0.1
	<0.003	<0.01	<0.005	3427,2	<0.2	7,64	<0.001	<0.1	161	<0.1	5,285	70,4
	<0.003	<0.01	<0.005	5341	<0.2	12,95	<0.001	<0.1	145	<0.1	4,612	83,5
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
	D-ICPMS											
	µg/L											
	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	0,075	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	B
	D-ICPMS											
	µg/L											
	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.2	0.001	0.01	0.3	0.001	0.001	3
	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	4139	<0.2	<0.001	<0.01	<0.3	<0.001	0,389	<3
	0,022	<0.001	<0.001	<0.001	68,84	<0.2	<0.001	<0.01	<0.3	<0.001	0,312	<3

Tabla 7-3: Valores de las propiedades de las muestras de agua A-BFI

<i>Día</i>	<i>Propiedad</i>	1	2	3	4	5	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar relativa [%]</i>
08-ene	pH	7,07	7,17	7,23	7,05	7,11	7,13	0,93
	E _h [mV]	191,90	187,60	184,70	193,40	190,40	189,60	1,64
	Conductividad [mS/cm]	3,68	3,68	3,70	3,70	3,72	3,70	0,40
	Turbidez [FTU]	15,20	19,13	16,96	15,24	11,32	15,57	16,48
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,42	3,49	2,80	2,79	2,52	2,80	13,33
	Sólidos totales [ppm]	3240	3140	3160	3240	3260	3208	1,51
11-ene	pH	7,38	7,42	7,38	7,32	7,32	7,36	0,53
	E _h [mV]	177,30	174,80	177,00	179,80	179,80	177,74	1,06
	Conductividad [mS/cm]	3,73	3,73	3,73	3,70	3,75	3,73	0,43
	Turbidez [FTU]	27,09	30,82	18,80	18,54	11,90	21,43	31,39
	Oxígeno disuelto [ppm]	3,60	3,50	2,60	3,10	3,12	3,18	11,11
	Sólidos totales [ppm]	3360	3420	3380	3160	3400	3344	2,82
13-ene	pH	7,37	7,31	7,33	7,35	7,35	7,34	0,28
	E _h [mV]	177,20	180,40	179,50	178,40	178,40	178,78	0,61
	Conductividad [mS/cm]	3,70	3,77	3,75	3,77	3,77	3,75	0,72
	Turbidez [FTU]	27,65	25,49	18,38	17,72	16,64	21,18	21,21
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,96	2,60	3,59	3,50	2,90	3,11	12,11
	Sólidos totales [ppm]	3140	3180	3180	3220	3180	3180	0,80
14-ene	pH	7,41	7,44	7,43	7,40	7,37	7,41	0,33
	E _h [mV]	175,50	174,10	174,60	176,10	177,60	175,58	0,70
	Conductividad [mS/cm]	3,75	3,72	3,72	3,72	3,75	3,73	0,39
	Turbidez [FTU]	20,19	27,03	17,68	24,51	17,16	21,31	18,12

Oxígeno disuelto [ppm]	3,34	3,58	3,00	3,42	3,07	3,28	6,62
Sólidos totales [ppm]	3200	3220	3140	3180	3240	3196	1,08

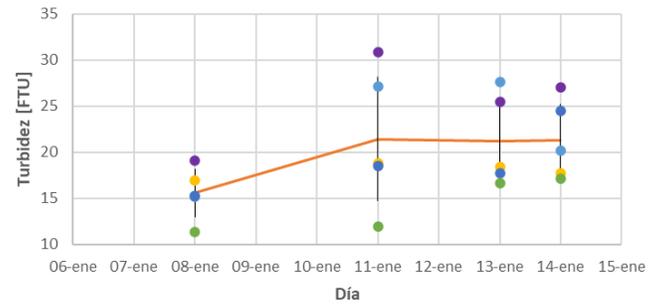
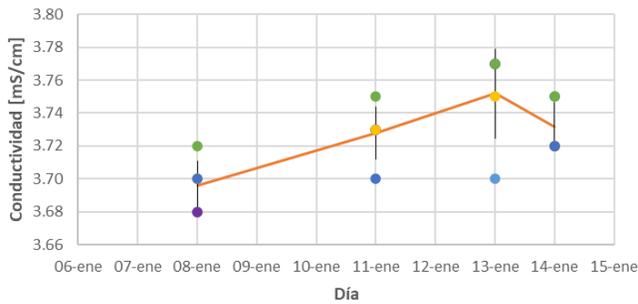


— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

a)

b)

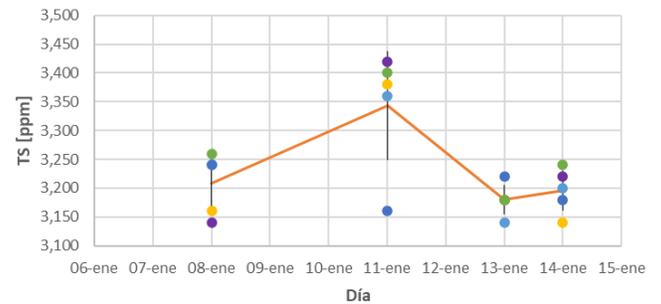
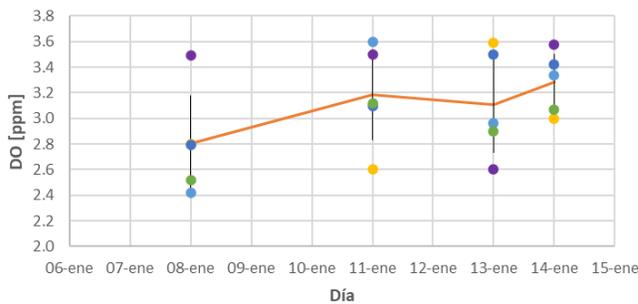


— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

c)

d)



— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

— Promedio ● Muestra 1 ● Muestra 2
 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

e)

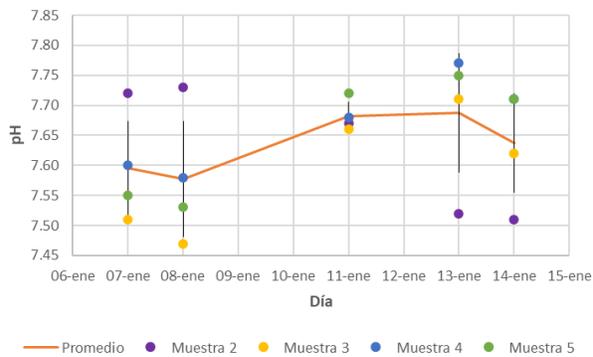
f)

Figura 7-1: Gráficos de evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales en función del tiempo para las muestras de agua A-BFI

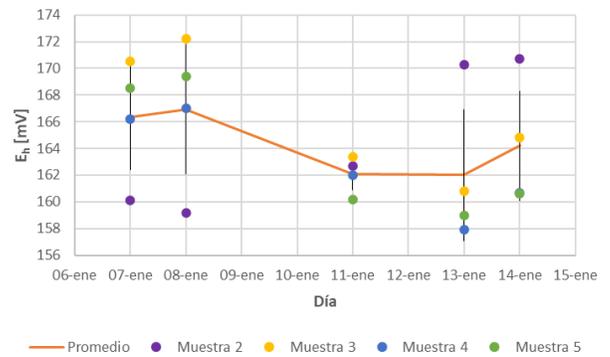
Tabla 7-4: Valores de las propiedades de las muestras de agua A-AFI

<i>Día</i>	<i>Propiedad</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar relativa [%]</i>
07-ene	pH	7,72	7,51	7,60	7,55	7,60	1,04
	E _h [mV]	160,10	170,50	166,20	168,50	166,33	2,35
	Conductividad [mS/cm]	-	-	-	-	-	-
	Turbidez [FTU]	41,62	95,00	69,00	135,00	85,16	40,42
	Oxígeno disuelto [ppm]	3,22	2,30	2,63	2,36	2,63	13,85
	Sólidos totales [ppm]	4180	4100	4100	3140	3880	11,04
08-ene	pH	7,73	7,47	7,58	7,53	7,58	1,27
	E _h [mV]	159,20	172,20	167,00	169,40	166,95	2,90
	Conductividad [mS/cm]	4,34	4,31	4,36	4,31	4,33	0,49
	Turbidez [FTU]	50,00	83,00	62,00	137,00	83,00	40,17
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,74	2,25	2,90	2,70	2,65	9,12
	Sólidos totales [ppm]	-	-	-	-	-	-
11-ene	pH	7,67	7,66	7,68	7,72	7,68	0,30
	E _h [mV]	162,70	163,40	162,00	160,20	162,08	0,73
	Conductividad [mS/cm]	4,31	4,29	4,37	4,33	4,33	0,68
	Turbidez [FTU]	49,75	94,00	73,00	144,00	90,19	38,57
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,82	3,20	3,48	2,80	3,08	9,20
	Sólidos totales [ppm]	4080	4020	4020	4180	4075	1,60
13-ene	pH	7,52	7,71	7,77	7,75	7,69	1,29
	E _h [mV]	170,30	160,80	157,90	159,00	162,00	3,03
	Conductividad [mS/cm]	4,36	4,36	4,39	4,36	4,37	0,30

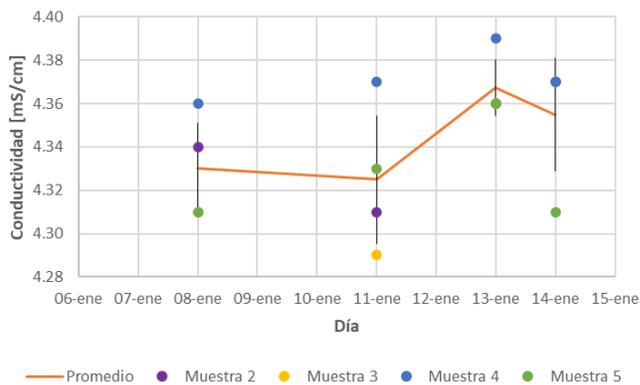
	Turbidez [FTU]	25,61	83,00	54,00	142,00	76,15	56,59
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,84	3,25	3,14	3,24	3,12	5,32
	Sólidos totales [ppm]	3880	3880	3900	4000	3915	1,27
14-ene	pH	7,51	7,62	7,71	7,71	7,64	1,08
	E _h [mV]	170,70	164,80	160,70	160,60	164,20	2,51
	Conductividad [mS/cm]	4,37	4,37	4,37	4,31	4,36	0,60
	Turbidez [FTU]	22,09	81,00	64,00	109,00	69,02	45,64
	Oxígeno disuelto [ppm]	2,71	2,90	3,20	3,25	3,02	7,34
	Sólidos totales [ppm]	3880	3900	3900	4000	3920	1,20



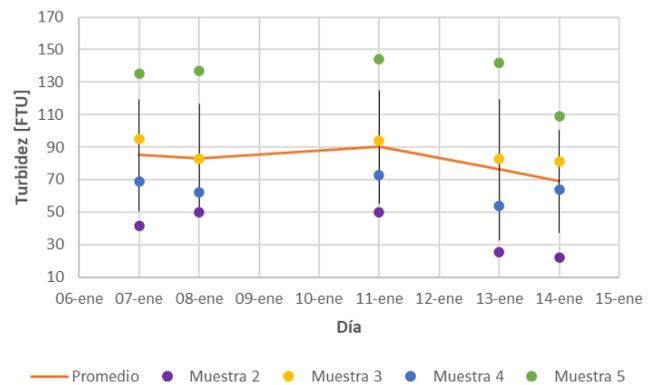
a)



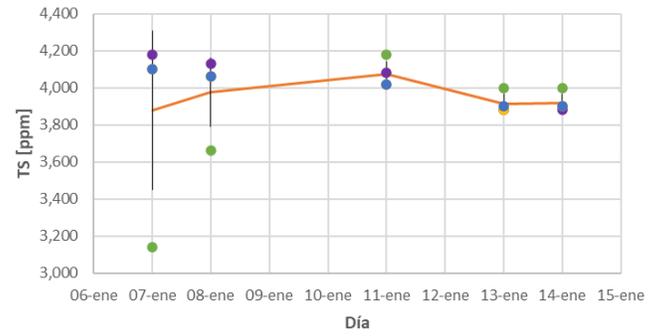
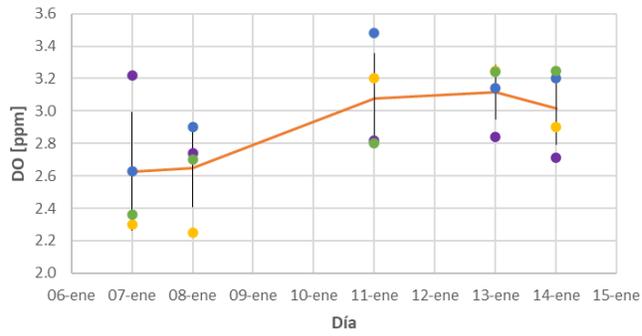
b)



c)



d)



— Promedio ● Muestra 2 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5 — Promedio ● Muestra 2 ● Muestra 3 ● Muestra 4 ● Muestra 5

e)

f)

Figura 7-2: Gráfico de evolución de a) pH, b) E_h , c) conductividad, d) turbidez, e) oxígeno disuelto y f) sólidos totales en función del tiempo para las muestras de agua A-AFI

7.3. Anexo C: Masa total, de sólido y líquido, y ley de cobre por prueba

En este apartado se señalan las masas totales, de sólido y de agua de las 8 pruebas realizadas a partir de las cuales se estima la recuperación másica y la recuperación de agua.

Tabla 7-5: Masa total de las muestras

<i>Muestra</i>	<i>M-BTR [g]</i>				<i>M-ATR [g]</i>			
	<i>A-BFI (n•1)</i>	<i>A-BFI (n•3)</i>	<i>A-AFI (n•5)</i>	<i>A-AFI (n•3)</i>	<i>A-BFI (n•1)</i>	<i>A-BFI (n•3)</i>	<i>A-AFI (n•5)</i>	<i>A-AFI (n•3)</i>
<i>Concentrado 1</i>	240	112	257	124	347	327	314	309
<i>Concentrado 2</i>	68	110	63	72	137	135	124	112
<i>Concentrado 3</i>	113	148	89	110	121	80	115	114
<i>Concentrado 4</i>	191	192	164	196	197	146	175	176
<i>Concentrado 5</i>	277	376	224	346	300	292	287	335
<i>Concentrado 6</i>	190	416	217	345	256	305	267	311
<i>Relave</i>	2636	2462	2741	2602	2432	2525	2416	2439
<i>Total</i>	3715	3816	3755	3795	3790	3810	3698	3796
<i>Alimentación</i>	3747	3848	3786	3826	3824	3841	3807	3828
<i>Pérdidas [%]</i>	0,85	0,83	0,82	0,81	0,89	0,81	2,86	0,84

Tabla 7-6: Masa de sólido de las muestras

<i>Muestra</i>	<i>M-BTR [g]</i>				<i>M-ATR [g]</i>			
	<i>A-BFI (n•1)</i>	<i>A-BFI (n•3)</i>	<i>A-AFI (n•5)</i>	<i>A-AFI (n•3)</i>	<i>A-BFI (n•1)</i>	<i>A-BFI (n•3)</i>	<i>A-AFI (n•5)</i>	<i>A-AFI (n•3)</i>
<i>Concentrado 1</i>	53	34	58	38	73	71	66	66
<i>Concentrado 2</i>	13	23	13	17	24	25	23	21
<i>Concentrado 3</i>	15	25	12	20	15	11	14	14
<i>Concentrado 4</i>	17	21	15	17	20	16	18	19
<i>Concentrado 5</i>	19	22	14	17	27	27	25	29
<i>Concentrado 6</i>	12	21	12	16	22	24	23	26
<i>Relave</i>	987	972	987	994	934	951	953	947
<i>Total</i>	1117	1117	1112	1118	1115	1125	1121	1122
<i>Alimentación</i>	1123	1124	1123	1123	1124	1127	1125	1125
<i>Pérdidas [%]</i>	0,56	0,66	0,94	0,47	0,76	0,14	0,35	0,30

Tabla 7-7: Masa de agua de las muestras

<i>Muestra</i>	<i>M-BTR [g]</i>				<i>M-ATR [g]</i>			
	<i>A-BFI (n°1)</i>	<i>A-BFI (n°3)</i>	<i>A-AFI (n°5)</i>	<i>A-AFI (n°3)</i>	<i>A-BFI (n°1)</i>	<i>A-BFI (n°3)</i>	<i>A-AFI (n°5)</i>	<i>A-AFI (n°3)</i>
<i>Concentrado 1</i>	187	78	199	86	274	256	248	243
<i>Concentrado 2</i>	55	87	50	55	113	110	101	91
<i>Concentrado 3</i>	98	123	77	90	106	69	101	100
<i>Concentrado 4</i>	174	171	149	179	177	130	157	157
<i>Concentrado 5</i>	258	354	210	329	273	265	262	306
<i>Concentrado 6</i>	178	395	205	329	234	281	244	285
<i>Relave</i>	1649	1490	1754	1608	1498	1574	1463	1492
<i>Total</i>	2598	2699	2643	2677	2675	2685	2577	2674
<i>Alimentación</i>	2624	2724	2663	2703	2700	2714	2682	2703
<i>Pérdidas [%]</i>	0,98	0,90	0,77	0,95	0,94	1,08	3,92	1,06

Tabla 7-8: Ley parcial de cobre de las muestras

<i>Muestra</i>	<i>M-BTR [%]</i>		<i>M-ATR [%]</i>	
	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>	<i>A-BFI</i>	<i>A-AFI</i>
<i>Concentrado 1</i>	7,87	7,99	4,24	4,67
<i>Concentrado 2</i>	7,63	7,85	4,1	4,7
<i>Concentrado 3</i>	5,85	7,49	5,85	5,44
<i>Concentrado 4</i>	3,67	4,68	4,84	3,87
<i>Concentrado 5</i>	2,38	2,69	2,24	1,97
<i>Concentrado 6</i>	1,76	1,48	1,17	0,978
<i>Cola</i>	0,117	0,109	0,096	0,097

7.4. Anexo D: Constantes del ajuste polinómico

En esta sección se indican las constantes asociadas a las variables del ajuste polinómico a recuperación y ley.

Tabla 7-9: Constantes asociadas a variables de ajuste polinomial a recuperación metalúrgica

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	pH	E_h	Conductividad	Sólidos totales
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
2.127	2.223	2.223	2.223	3.856	-3.856	2.705	2.223
$(Na^+) \times$	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	2.131	2.135	2.139	0.392	-0.392	1.728	2.152
$(K^+) \times$	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}
	2.156	2.160	2.165	0.392	-0.392	1.767	2.178
$(Ca^{2+}) \times$	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}
	2.182	2.186	2.190	0.393	-0.393	1.807	2.203
$(pH) \times$	a_{29}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}
	0.393	0.393	0.393	2.238	-2.311	-0.521	0.385
$(E_h) \times$	a_{36}	a_{37}	a_{38}	a_{39}	a_{40}	a_{41}	a_{42}
	-0.385	-0.385	-0.385	-2.385	2.460	0.511	-0.377
$(Conductividad) \times$	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}	a_{47}	a_{48}	a_{49}
	1.972	1.987	2.003	-0.497	0.493	1.422	2.065
$(Sólidos totales) \times$	a_{50}	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	a_{55}	a_{56}
	2.377	2.381	2.385	0.393	-0.393	2.099	2.399

Tabla 7-10: Constantes asociadas a variables de ajuste polinomial a ley

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	pH	E_h	Conductividad	Sólidos totales
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0.065	0.090	0.090	0.090	-0.037	0.038	0.137	0.090
$(Na^+) \times$	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	0.066	0.067	0.067	0.007	-0.007	0.117	0.070
$(K^+) \times$	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}
	0.070	0.071	0.072	0.007	-0.007	0.124	0.074
$(Ca^{2+}) \times$	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}
	0.075	0.075	0.076	0.008	-0.008	0.131	0.078
$(pH) \times$	a_{29}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}
	0.008	0.008	0.008	0.070	-0.080	-0.037	0.007
$(E_h) \times$	a_{36}	a_{37}	a_{38}	a_{39}	a_{40}	a_{41}	a_{42}
	-0.007	-0.007	-0.007	-0.091	0.102	0.036	-0.005
$(Conductividad) \times$	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}	a_{47}	a_{48}	a_{49}
	0.161	0.163	0.166	-0.032	0.031	0.317	0.179
$(Sólidos totales) \times$	a_{50}	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	a_{55}	a_{56}
	0.108	0.108	0.109	0.010	-0.010	0.185	0.112

7.5. Anexo E: Masa de cal administrada en estudio de variación de temperatura

En esta sección se entrega la masa de cal añadida a las distintas muestras de agua de este estudio junto con el pH obtenido. Cabe notar que corresponden al pH del vaso que contiene el agua de reposición (Vaso C)

Tabla 7-11: Masa de cal vs pH de agua destilada (Vaso C)

Masa de cal [g]	pH
0,000	5,994
0,002	9,424
0,003	9,913
0,005	10,142
0,007	10,359
0,008	10,507
0,010	10,628
0,012	10,737
0,014	10,815
0,016	10,885
0,019	10,962
0,020	10,990
0,021	10,995
0,022	11,012

Tabla 7-12: Masa de cal vs pH de agua fresca (Vaso C)

Masa de cal [g]	pH
0,000	7,341
0,001	8,547
0,003	9,282
0,004	9,587
0,006	9,780
0,007	9,950
0,009	10,050
0,012	10,257
0,015	10,400
0,018	10,540
0,022	10,685
0,026	10,849
0,029	10,915
0,032	10,986

Tabla 7-13: Masa de cal vs pH de agua recuperada (Vaso C)

Masa de cal [g]	pH
0,000	10,184
0,002	10,292
0,003	10,420
0,005	10,522
0,006	10,597
0,008	10,698
0,011	10,783
0,014	10,879
0,017	10,942
0,020	10,986
0,022	11,015

Tabla 7-14: Masa de cal añadida a Vaso C para mantener pH 11

	Fecha	Masa de cal [g]	pH
Agua destilada	02-dic	0,022	11,012
	03-dic	-	11,162
	04-dic	0,005	10,976
	05-dic	0,010	11,086
Agua fresca	18-nov	0,032	10,986
	19-nov	0,005	11,043
	20-nov	0,020	11,193
	21-nov	0,007	10,983
Agua recuperada	16-dic	0,022	11,015
	17-dic	-	11,131
	18-dic	0,007	10,999
	19-dic	0,008	11,023

7.6. Anexo F: Evolución de propiedades del estudio variación de temperatura

En este anexo se señalan los valores de las propiedades medidas a las muestras de agua del estudio de variación de temperatura, lo cuales se analizan en los gráficos de la sección 4.2

Tabla 7-15: Evolución de agua destilada sin cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h [mV]</i>	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	<i>Turbidez [FTU]</i>	<i>Oxígeno disuelto [ppm]</i>	<i>Sólidos totales [ppm]</i>
<i>02-dic</i>	11,031	-20,4	154,6	1,73	-	-
<i>02-dic</i>	10,876	-13,0	123,9	4,39	1,10	80,00
<i>03-dic</i>	10,727	-3,1	66,8	14,34	-	-
<i>03-dic</i>	10,276	19,9	63,7	12,52	1,05	57,50
<i>04-dic</i>	10,171	26,2	62,5	17,09	-	-
<i>04-dic</i>	9,801	46,1	58,6	14,51	1,85	77,50
<i>05-dic</i>	9,630	55,8	62,4	18,02	-	-
<i>05-dic</i>	9,149	80,4	66,2	15,32	1,36	110,00

Tabla 7-16: Evolución de agua destilada con cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h [mV]</i>	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	<i>Turbidez [FTU]</i>	<i>Oxígeno disuelto [ppm]</i>	<i>Sólidos totales [ppm]</i>
<i>02-dic</i>	11,027	-20,3	151,7	1,89	-	-
<i>02-dic</i>	10,604	3,1	73,5	24,89	0,99	82,50
<i>03-dic</i>	10,542	7,2	65,6	24,66	-	-
<i>03-dic</i>	9,605	55,1	52,1	23,83	0,72	55,00
<i>04-dic</i>	9,677	53,1	58,0	20,76	-	-
<i>04-dic</i>	8,942	91,6	65,2	17,39	1,48	70,00
<i>05-dic</i>	9,575	57,7	77,1	15,49	-	-
<i>05-dic</i>	8,567	111,2	83,6	10,68	1,15	115,00

Tabla 7-17: Evolución de agua fresca sin cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h [mV]</i>	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	<i>Turbidez [FTU]</i>	<i>Oxígeno disuelto [ppm]</i>	<i>Sólidos totales [ppm]</i>
<i>18-nov</i>	11,021	-20,5	263,0	6,19	-	-
<i>18-nov</i>	10,844	-8,4	193,2	9,56	0,88	157,50
<i>19-nov</i>	10,442	12,3	145,6	12,74	-	-
<i>19-nov</i>	9,946	37,0	133,7	9,25	1,16	82,50
<i>20-nov</i>	9,728	50,0	134,6	10,47	-	-
<i>20-nov</i>	9,343	70,4	137,1	6,84	0,82	130,00
<i>21-nov</i>	9,320	71,6	139,1	12,73	-	-
<i>21-nov</i>	8,913	92,0	144,5	19,54	0,85	142,50

Tabla 7-18: Evolución de agua fresca con cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h</i> [mV]	Conductividad [μS/cm]	Turbidez [FTU]	Oxígeno disuelto [ppm]	Sólidos totales [ppm]
18-nov	11,053	-22,1	269,0	7,91	-	-
18-nov	10,354	16,8	144,0	27,45	1,35	167,50
19-nov	10,081	31,6	139,5	25,37	-	-
19-nov	9,105	81,9	142,0	22,58	1,05	100,00
20-nov	9,625	55,6	149,3	24,01	-	-
20-nov	8,740	101,5	169,7	30,87	1,16	187,50
21-nov	9,488	63,0	168,6	29,68	-	-
21-nov	8,712	102,7	180,6	30,68	0,96	195,00

Tabla 7-19: Evolución de agua recuperada sin cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h</i> [mV]	Conductividad [mS/cm]	Turbidez [FTU]	Oxígeno disuelto [ppm]	Sólidos totales [ppm]
16-dic	11,050	-21,5	2,46	308,60	-	-
16-dic	10,758	-6,7	2,41	328,80	0,84	2682,50
17-dic	10,643	1,4	2,41	351,40	-	-
17-dic	10,094	29,8	2,36	348,40	0,56	2665,00
18-dic	9,539	59,1	2,37	349,00	-	-
18-dic	9,189	77,6	2,39	345,60	0,47	2700,00
19-dic	9,231	74,9	2,38	349,40	-	-
19-dic	8,930	91,2	2,40	353,80	0,77	2765,00

Tabla 7-20: Evolución de agua recuperada con cambios de temperatura

	<i>pH</i>	<i>E_h</i> [mV]	Conductividad [mS/cm]	Turbidez [FTU]	Oxígeno disuelto [ppm]	Sólidos totales [ppm]
16-dic	11,067	-22,3	2,46	296,40	-	-
16-dic	10,308	17,5	2,47	361,20	0,84	2652,50
17-dic	10,283	20,6	2,49	365,60	-	-
17-dic	9,311	71,2	2,60	399,60	0,56	3095,00
18-dic	9,474	62,6	2,58	396,00	-	-
18-dic	8,942	90,5	2,67	416,80	0,46	3080,00
19-dic	9,215	75,9	2,65	411,60	-	-
19-dic	8,700	103,3	2,81	446,60	0,50	3432,50

7.7. Anexo G: Descripción de equipos

- Cortador Riffle

El cortador es un equipo que permite dividir el material y obtener muestras representativas, vale decir, de similar masa y granulometría (Figura 3-2.a). El mineral es introducido en la parte superior del equipo, y producto de la vibración del cortador se propicia el movimiento de éste, haciendo que descienda y eventualmente entrando en la configuración de 10 capachos. La velocidad de vibración es fundamental para obtener un buen muestreo, por lo cual se trabaja con una velocidad media del equipo (entre 6 y 7 de 12), de tal manera que las muestras sean lo más homogéneas posibles. En el caso del microcortador (Figura 3-5) el modo de uso es similar, con la diferencia de que, puesto que las muestras a cortar son de masas considerablemente menores, en vez de utilizar capachos se emplean 8 tubos de ensayos.

- Medidor de pH

Mediante el medidor de pH mostrado en la Figura 3-2.b es posible medir el pH, el potencial [mV] y la temperatura [°C] de una solución, en donde esta última lectura permite una medición más certera de las primeras. Para la utilización de este equipo se cuenta con un electrodo y una termocupla que cumplen la función de medir el pH y el E_h , y la temperatura de la solución, respectivamente. El modo de empleo es sumergiendo ambos artefactos en la muestra hasta alcanzar un valor estable. La calibración del equipo se realiza empleando soluciones buffer o patrones en donde el pH es conocido (Figura 7-3).



Figura 7-3: Fotografía de las soluciones buffer de calibración del medidor de pH

- Conductividad

El conductímetro utilizado para determinar la conductividad de las muestras consta de un electrodo y una termocupla (Figura 3-2.c), los cuales al ser introducidos en la muestra, generan lecturas de la conductividad ([$\mu\text{S}/\text{cm}$] o [mS/cm]) y temperatura [°C] de la solución, respectivamente. Al igual que en el medidor de pH, permite una compensación en la lectura de la conductividad mediante la temperatura.

La calibración de este equipo se realiza preparando una solución buffer con una masa de KCl conocida. En la Tabla 7-21 se muestra la conductividad de la solución asociada a una masa determinada de KCl. Para este caso se disolvieron 745,9 [mg] de KCL para generar una conductividad de 1413 [μ S/cm].

Tabla 7-21: Soluciones de calibración de conductímetro

CALIBRATION SOLUTIONS	REAGENT
84 μ S/cm	Accurately weigh out 42.35mg of KCL and dissolve in 1 litre deionised water.
1413 μ S/cm	Accurately weigh out 745.9mg of KCL and dissolve in 1 litre deionised water.
12.88mS/cm	Accurately weigh out 7.45g of KCL and dissolve in 1 litre deionised water.
111.8mS/cm	Accurately weigh out 74.5g of KCL and dissolve in 1 litre deionised water.

- Turbidez

La turbidez del agua se estudia utilizando el turbidímetro de la Figura 3-2.d, que genera lecturas en unidades de [FTU] o [NTU]. Para realizar la medición se introduce la muestra en una cubeta de 10 [mL], la cual se agita con el objetivo de evitar precipitación y mantener la homogeneidad de la muestra. La calibración del equipo se efectúa a partir de soluciones estándar de turbiedad de 0, 10 y 500 [FTU] (Figura 7-4).



Figura 7-4: Fotografía de soluciones de calibración 0, 10 y 500 [FTU]

- Oxígeno disuelto

El sensor de oxígeno disuelto (Figura 3-2.e) permite la medición de este parámetro al introducir la sonda en la muestra en estudio, en donde el valor se registra en la pantalla del equipo en [ppm] o porcentaje de saturación. Para una correcta lectura es necesario calibrar el sensor según la presión atmosférica y la salinidad de la solución.