



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

**COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS FINAS OCLUIDAS DE SULFUROS DE COBRE EN EL  
YACIMIENTO DE PROYECTO ARQUEROS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN  
METALURGIA EXTRACTIVA**

**YOSUKE EBISU**

**PROFESOR GUÍA:  
WILLY KRACHT GAJARDO**

**PROFESOR CO-GUÍA:  
LEANDRO VOISIN ARAVENA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CHRISTIAN IHLE BASCUÑAN  
GIOVANNI PAMPARANA MANNIS**

**SANTIAGO DE CHILE  
2018**

## Resumen

En estos últimos años en el área minera de los recursos metálicos, la ley baja y la fineza de las partículas están siendo un problema más grande. Ante este problema, para mejorar los resultados de flotación de cobre, en este estudio se llevó a cabo una serie de experimentos modificando parámetros hidrodinámicos, que son la agitación y el flujo del aire, con las muestras de un yacimiento que se ubica en la cuarta región de Chile. Las muestras se componen de cuatro distintas especies minerales de cobre, tales como bornita, calcosina, calcopirita y tennantita. Por los estudios anteriores sobre este mineral se sabe que la calcopirita se flota lento. Dado esta situación el objetivo de los experimentos es aclarar las reacciones del mineral de cobre contra la variación de agitación y aireación y la diferencia de comportamiento entre las especies minerales, y mejorar el resultado de flotación.

Los experimentos se llevaron a cabo con una máquina de flotación en laboratorio de Denver con la celda de 1 L. Aunque normalmente la celda Denver se opera con el aire autoaspirado por la presión negativa generada por la rotación del impeller, se conectó un compresor a la entrada del aire para poder modificar el flujo del aire independientemente de la velocidad de impeller. Los experimentos de flotación se llevaron a cabo en 16 minutos y los concentrados se sacaron en los tiempos de 1, 2, 4, 8 y 16 minutos. El número de las muestras utilizadas es cuatro y las cuatro se componen de distintas composiciones mineralógicas. Los experimentos se llevaron a cabo modificando el flujo del aire y la velocidad de impeller. Los flujos del aire utilizados son 1,6, 5,2 y 7,2 L/min y las velocidades de agitación son 900, 1100 y 1300 rpm. Los productos se analizaron con ICP-MS para calcular las recuperaciones y las constantes cinéticas y con MLA para obtener las composiciones mineralógicas. Con la medición por MLA se hizo posible analizar los comportamientos de cada especie mineral en flotación.

Por los experimentos se aclararon los siguientes. Primero, se mostró que las partículas finas flotan muy lento. Aunque el grado de liberación (o el área superficial liberada) es suficiente la velocidad de flotación de las partículas finas como  $-18,4 \mu\text{m}$  fue lento. Segundo, el aumento del flujo del aire y la agitación fue útil para aumentar la velocidad de flotación aunque la condición óptima y el grado de mejoramiento fueron distintos para cada muestra. Tercero, la flotabilidad fue diferente por especies minerales y el orden fue calcosina>tennantita>bornita>calcopirita. Y además, se indicó que las partículas fáciles de flotar (calcosina) hacen lento las velocidades de flotación de las partículas difíciles de flotar (calcopirita, bornita y finas).

## Abstract

In recent years in the area of metal resource mining, the low grade and fineness of the particles are being a bigger problem. Faced with this problem, in order to improve the copper flotation results, in this study a series of experiments was carried out modifying hydrodynamic parameters, which are the agitation and the air flow, with the samples of a deposit that is located in the fourth region in Chile. The samples are composed of four different copper mineral species, such as bornite, chalcocite, chalcopyrite and tennantite. From previous studies on this mineral it is known that chalcopyrite's flotation speed is slow. Given this situation, the objective of the experiments is to clarify the reactions of the copper ore against the variation of agitation and aeration and the difference of behavior between the mineral species, and to improve the flotation result.

The experiments were carried out with a Denver flotation cell of laboratory scale with the 1 L cell. Although the Denver cell is normally operated with self-suctioning air by the negative pressure generated by the rotation of the impeller, a compressor was connected to the air inlet to be able to modify the air flow rate regardless of the speed of the impeller. The flotation experiments were carried out in 16 minutes and the concentrates were taken at the times of 1, 2, 4, 8 and 16 minutes. The number of samples used is four and the four are composed of different mineralogical compositions. The experiments were carried out by modifying the air flow rate and the impeller speed. The air flow rates used are 1.6, 5.2 and 7.2 L / min and the stirring speeds are 900, 1100 and 1300 rpm. The products were analyzed with ICP-MS to calculate the recoveries and the kinetic constants and with MLA to obtain the mineralogical compositions. With the measurement by MLA it became possible to analyze the behavior of each mineral species in flotation.

The following were revealed by the experiments. First, it was shown that fine particles float very slowly. Although the degree of liberation (or the surface area liberated) is sufficient, the rate of flotation of fine particles such as  $-18.4 \mu\text{m}$  was slow. Second, the increase in air flow rate and agitation was useful to increase the rate of flotation although the optimal condition and the degree of improvement were different for each sample. Third, the floatability was different for mineral species and the order was chalcocite > tennantite > bornite > chalcopyrite. In addition, it was indicated that the particles easy to float (chalcocite) slow down the flotation speeds of the particles difficult to float (chalcopyrite, bornite and fine).

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
2.	Revisión bibliográfica .....	2
2.1.	Cinética de flotación .....	2
2.2.	Flotación de partículas finas .....	3
3.	Objetivo .....	5
3.1.	Objetivo General .....	5
3.2.	Objetivos específicos .....	5
4.	Metodología .....	6
4.1.	Microscopía óptica .....	6
4.2.	Chancado .....	7
4.3.	Molienda .....	7
4.4.	Flotación .....	10
4.5.	ICP-MS .....	12
4.6.	MLA (Mineral Liberation Analyzer) .....	12
4.7.	Medición del flujo del aire en la celda Denver .....	13
5.	Procedimientos .....	15
5.1.	Chancado y muestreo .....	15
5.2.	Determinación de la curva de molienda .....	15
5.3.	Caracterización con microscopio óptico .....	15
5.4.	Efectos de tamaños de partículas y reactivos .....	15
5.5.	Efectos de agitación y aire con aire forzado .....	16
5.6.	Análisis por MLA .....	18
5.7.	Análisis cinéticos .....	18
5.8.	Medición del flujo del aire .....	18
6.	Resultados .....	20
6.1.	Propiedades de muestras .....	20
6.1.1.	Caracterización con el microscopio óptico .....	20
6.1.2.	Caracterización por MLA .....	29
6.2.	Resultados de experimentos para saber los efectos de las condiciones químicas .....	31
6.2.1.	Resultados .....	31
6.2.2.	Consideraciones .....	39

6.3.	Resultados de experimentos de flotación (efecto de la agitación y el flujo del aire) .....	40
6.3.1.	Resultados de análisis con ICP-MS .....	40
6.3.2.	Resultados de análisis por MLA .....	50
6.3.3.	Consideraciones .....	83
7.	Discusiones .....	85
8.	Conclusiones .....	87
9.	Bibliografía .....	88

## Índice de figuras

Figura 1 Microscopio óptico de luz polarizada .....	7
Figura 2 El molino de Yoshida Seisakusho Co., Ltd. ....	8
Figura 3 Barras de molino .....	9
Figura 4 Bolas de molino.....	9
Figura 5 La máquina de flotación del tipo Denver .....	10
Figura 6 El impeller de la máquina de flotación.....	11
Figura 7 El sistema MLA .....	12
Figura 8 El sistema de medición del flujo con la celda del tipo Denver.....	13
Figura 9 Esquema del sistema de medición del aire .....	14
Figura 10 Flujómetro de masa .....	17
Figura 11 La relación entre la velocidad de agitación y el flujo del aire .....	19
Figura 12 Los minerales de cobre en la partícula que contiene granos de roca ígnea (Bo: bornita, Cp: calcopirita)	21
Figura 13 Granos de calcopirita (Cp: calcopirita).....	21
Figura 14 Calcopirita framboidal (Cp: calcopirita) .....	22
Figura 15 Partículas eutécticas de calcopirita y bornita en calcita y partículas eutécticas de calcopirita y bornita en rocas ígneas (feldespato) (Bo: bornita).....	24
Figura 16 Partícula única de calcopirita en feldespato (Cp: calcopirita) .....	24
Figura 17 Partículas calcosina en la caliza que contiene feldespato (Cc: calcosina, Bo: bornita).....	25
Figura 18 Eutéctico de bornita, tetraedrita y calcosina (partículas finas).....	26
Figura 19 Partículas eutécticas de bornita y calcosina en caliza que incluye rocas ígneas (Bo: bornita, Cc: calcosina) .....	27
Figura 20 Eutéctico de bornita y calcosina en la caliza consistente en calcita y minerales de cobre en la caliza que contiene rocas ígneas (Bo: bornita, Cc: calcosina).....	28

Figura 21 Composición mineralógica de las cuatro muestras (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	29
Figura 22 Las distribuciones del tamaño de granos minerales .....	30
Figura 23 Resultados de flotación de la muestra 1 con solo AP3477 como colector .....	31
Figura 24 Resultados de flotación de la muestra 1 con AP y Xantato (SIPX) como colector .....	32
Figura 25 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 1.....	32
Figura 26 Resultados de flotación de la muestra 2 con solo AP3477 como colector .....	33
Figura 27 Resultados de flotación de la muestra 2 con AP y Xantato (SIPX) como colector .....	33
Figura 28 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 2.....	34
Figura 29 Resultados de flotación de la muestra 3 con solo AP3477 como colector .....	35
Figura 30 Resultados de flotación de la muestra 3 con AP3477 y Xantato (SIPX) como colector .....	35
Figura 31 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 3.....	36
Figura 32 Resultados de flotación de la muestra 4 con solo AP3477 como colector .....	37
Figura 33 Resultados de flotación de la muestra 4 con AP3477 y Xantato (SIPX) como colector .....	37
Figura 34 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 4.....	38
Figura 35 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No. 1).....	41
Figura 36 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.2).....	42
Figura 37 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.3).....	42
Figura 38 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.4).....	43
Figura 39 Efectos de la agitación y flujo del aire a la constante cinética Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4).....	44
Figura 40 Efectos de la agitación y flujo del aire a la recuperación máxima Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4).....	45
Figura 41 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.1.....	46
Figura 42 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.2.....	47

Figura 43 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.3.....	47
Figura 44 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.4.....	48
Figura 45 Efectos de la agitación y el flujo del aire a la eficiencia de separación Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4).....	49
Figura 46 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita).....	50
Figura 47 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita).....	51
Figura 48 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 $\mu\text{m}$ , muestra No.1).....	52
Figura 49 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 $\mu\text{m}$ , muestra No.1).....	52
Figura 50 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita) .....	53
Figura 51 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	54
Figura 52 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.1).....	55
Figura 53 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.1).....	55
Figura 54 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita) .....	56
Figura 55 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita) .....	57
Figura 56 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	58
Figura 57 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	59



Figura 58 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 µm, muestra No.2).....	60
Figura 59 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 µm, muestra No.2).....	60
Figura 60 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 µm) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	61
Figura 61 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 µm) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	62
Figura 62 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 µm, muestra No.2).....	63
Figura 63 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 µm, muestra No.2).....	63
Figura 64 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 µm) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	64
Figura 65 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7-18,8 µm) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	65
Figura 66 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	67
Figura 67 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	68
Figura 68 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 µm, muestra No.3).....	69
Figura 69 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (-4,7 µm, muestra No.3).....	69
Figura 70 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 µm) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	70
Figura 71 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (-4,7 µm) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	71
Figura 72 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre	

liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.3).....	72
Figura 73 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.3).....	72
Figura 74 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	73
Figura 75 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	73
Figura 76 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	75
Figura 77 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita).....	76
Figura 78 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (–4,7 $\mu\text{m}$ , muestra No.4).....	77
Figura 79 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (–4,7 $\mu\text{m}$ , muestra No.4).....	77
Figura 80 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (–4,7 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	78
Figura 81 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (–4,7 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	79
Figura 82 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.4).....	80
Figura 83 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ , muestra No.4).....	80
Figura 84 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8 $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita) .....	81
Figura 85 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las	

partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)  
..... 82

## Indice de tablas

Tabla 1 Condiciones experimentales .....	16
Tabla 2 Condiciones experimentales .....	17
Tabla 3 Las características de cada muestra .....	30

## 1. Introducción

En estos últimos años en el área minera de los recursos metálicos, la ley baja y la fineza de las partículas están siendo un problema más grande. Las minas que se pueden explotar fácilmente ya están operando o se terminaron su vida como mina mientras las minas restantes suelen tener problemas tales como; la fineza de las partículas de interés, la ley baja, la dificultad de desarrollo por la escasa de la infraestructura o la profundidad de los recursos y etc.

En el área minera, hay 2 tipos de método para concentrar el material de interés y producir metal puro; que son hidrometalurgia y pirometalurgia. Históricamente la mayoría de los minerales se trataba en el método de pirometalurgia, que se ejecuta en horno bajo una alta temperatura. La alimentación al horno tiene que ser pulverizada para promover reacción química u oxidación y tiene que tener una ley adecuada ( $> 25\%$  en el caso de Cu), aunque los minerales tienen la ley mucho más baja ( $< 1\%$  en el caso de Cu). Entonces para concentrar minerales y generar la alimentación requerida del horno, normalmente los minerales se procesan al lado del yacimiento en la planta de flotación. Flotación es uno de los métodos más utilizados para separar los minerales preciosos desde los innecesarios utilizando la diferencia de hidrofobicidad (o hidrofiliidad). En el método de flotación se alimenta el aire a una celda cúbica (típicamente) llenada con la pulpa del mineral de interés y se implementa agitación para introducir aire y generar burbujas. La pulpa es el líquido, en el que las partículas minerales son dispersas. Las partículas hidrofóbicas se flotan junto con las burbujas y las hidrofílicas se quedan en la pulpa.

Para recuperar las partículas finas incluidas en la ganga se tiene que moler hasta que se libere de la ganga, porque la baja liberación resulta en la poca fuerza de la tensión superficial y la baja flotabilidad (Jameson 2017, Miettinen et al. 2010). Sin embargo, la recuperación de las partículas finas suelen ser baja debido a su poca probabilidad de colisión con las burbujas (Grano et al. 1994, Tao 2004, Hassanzadeha et al. 2016, Rahman et al. 2014, Shahbazi 2010 y Yoon 2000) y a su falta de energía cinética para desplazar la película de agua (Hewitt et al. 1993 y Chipfunhu 2012). Además, en la flotación de las partículas finas, no solamente la fineza del mineral de interés perjudica la flotación sino también la de la ganga (Leistner et al. 2017).

Por otro lado en el estudio anterior sobre el mineral del yacimiento, los minerales de calcopirita y bornita muestran distintos comportamientos. En el relave la fracción de la calcopirita suele ser mayor que la de la cabeza en comparación con la bornita, es decir, la recuperación de la calcopirita es más baja que la de la bornita. Las razones posibles son; 1. las partículas de calcopirita son más pequeñas y ocluidas que la bornita y 2. las partículas de calcopirita no flotan por la condición experimental. En el caso 1. moler más fino sería una alternativa y en el caso 2. se debe aplicar un tratamiento relacionado con la selectividad.

Considerando la situación, el primer enfoque aplicado en esta investigación para aumentar la recuperación es intentar recuperar las partículas finas. En este estudio se llevó a cabo una serie de pruebas de flotación modificando el

flujo del aire y la agitación para recuperar las partículas finas, y se analizan los productos (concentrados y relaves) por MLA para saber el efecto de liberación y tamaño de partículas. Además se llevaron a cabo los experimentos para cuatro tipos de muestras. Los cuatro son del mismo yacimiento pero de distintas partes de los sondajes. Por lo tanto tienen distintas composiciones mineralógicas y distintas características. Estas diferencias afectan al comportamiento de las partículas en la celda de flotación. Para saber el efecto de esas diferencias, tales como composición mineralógica y tamaño de graos minerales, a la cinética de flotación, se llevaron a cabo experimentos de flotación a cada muestra y se analizaron.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Cinética de flotación

Flotación es uno de los métodos de separación más utilizados en procesamiento de minerales. Es un proceso donde las partículas de interés en la pulpa acuosa se adjuntan a burbujas de aire selectivamente, formando conjuntos de partículas y burbujas, que se transportan posteriormente fuera de la pulpa a la fase espuma (Leistner et al. 2017). Dado que los componentes de la reacción son partículas, que se alimentan una sola vez al principio del proceso, y burbujas, que se alimentan constantemente a lo largo del proceso, se considera que la reacción es la química del primer orden, tal como la velocidad de reacción es en proporción a la concentración de la especie (partículas) en el sistema. Por lo tanto la ecuación (1) se consta, donde  $W$  es el peso de la especie,  $t$  es tiempo y  $k$  es una constante. En el proceso de flotación la  $W$  es el peso de las partículas minerales. Y consecuentemente se deriva la ecuación (2) que expresa el peso restante en la celda en el tiempo  $t$  donde  $W_0$  es el peso del mineral en el tiempo 0. Al final utilizando la recuperación  $R = (W_0 - W)/W_0$  se obtiene la ecuación familiar de la recuperación (3).

$$-\frac{dW}{dt} = kW \quad (1)$$

$$W = W_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

$$R = 1 - \exp(-kt) \quad (3)$$

Como la reacción en la celda de flotación es entre las partículas minerales y burbujas de aire, la constante cinética  $k$  incluye los efectos de ambos elementos. Se sabe que en las celdas con la fase delgada de espuma la constante relaciona linealmente al flujo de área superficial de gas  $S_b$  (Gorain et al. 1997). Se investigó la relación en la celda piloto de 60 L y en la celda operacional de 100 m<sup>3</sup>, y la relación lineal se observó en común en las ambas celdas. Dado esto, poniendo la constante de proporcionalidad como  $P$ , la relación se describe como la ecuación (4). En la ecuación el flujo de área superficial de gas  $S_b$  es la velocidad con la que el área superficial de gas pasa por la celda por unidad del área transversal

de la celda, con la unidad de  $m^2 m^{-2} s^{-1}$ . El flujo de área superficial de gas es un valor calculado por dividir el flujo de gas por el área unitaria  $J_g$  por el diámetro promedio de Sauter  $D_{32}$  como la ecuación (5). Y las variables  $J_g$  y  $D_{32}$  son como las siguientes ecuaciones (6) y (7) donde  $Q_{aire}$  es el flujo de aire ( $m^3/s$ ),  $A_{celda}$  es el área transversal de la celda ( $m^2$ ) y  $d_i$  es el diámetro de una partícula (m).

$$k = PS_b \quad (4)$$

$$S_b = \frac{6J_g}{D_{32}} \quad (5)$$

$$J_g = \frac{Q_{aire}}{A_{celda}} \quad (6)$$

$$D_{32} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \quad (7)$$

Como se sabe en las explicaciones, en la ecuación (4) la variable  $P$  expresa todos los otros elementos que afectan al comportamiento de partículas aparte de la burbuja. Los dos principales factores son la flotabilidad de partículas y la recuperación de espuma. En la suposición arriba y en los experimentos de esta investigación el grosor de la fase de la espuma es tan delgado como la recuperación de espuma se puede considerar como 100 %. En este caso lo que la  $P$  significa es únicamente la flotabilidad de la partícula aunque hay que notarse que “la flotabilidad” incluye los efectos de reactivos y tamaño además de hidrofobicidad del mineral.

## 2.2. Flotación de partículas finas

Como que se refirió en la parte anterior, a la flotabilidad el tamaño de partículas tiene un efecto significativo. Siendo una reacción entre burbujas y partículas, las partículas y las burbujas tienen que colisionarse. Además, como los subprocesos de flotación se saben los procesos de adjunto y estabilización. El tamaño de partículas afecta a las probabilidades de colisión, adjunto y estabilización (Spedden 1984). Las partículas finas normalmente muestran la velocidad de flotación lenta por su baja probabilidad de colisión con las burbujas mientras otro fenómeno importante, que es desprendimiento, se considera ignorable para las finas (Shahbazi et al. 2010).

Colisión y conjunto entre burbujas y partículas básicamente se expresan como las ecuaciones (8) y (9), donde  $P_c$  es la probabilidad de colisión entre partículas y burbujas,  $P_a$  es la probabilidad de adhesión,  $P_d$  es la probabilidad de desprendimiento,  $d_p$  es el diámetro de partícula,  $d_b$  es el diámetro de burbuja y  $A$  y  $n$  son los parámetros que se varían con los números de Reynolds.

$$P = P_c P_a (1 - P_d) \quad (8)$$

$$P_c = A \left( \frac{d_p}{d_b} \right)^n \quad (9)$$

Como estas relaciones indican, en la flotación de las partículas finas la baja probabilidad de colisión por la proporción del tamaño de partícula al tamaño de burbujas causa la dificultad teniendo la diferencia de magnitud depende de la condición del flujo (los parámetros  $n$  y  $A$ ). Uno de los métodos propuestos para solucionar este problema es disminuir el tamaño de burbuja. Las ecuaciones (8) y (9) muestran que la disminución de tamaño de burbuja resulta en mejor probabilidad de colisión. La flotación con microburbujas se instalaron en algunas plantas industriales y con el menor tamaño de burbujas se logra una probabilidad relativamente alta de colisión. Esta manera de aumentar la probabilidad de colisión y en consecuencia la velocidad de flotación, corresponde al aumento de  $S_b$  en la ecuación (5). Y un otro enfoque es aumentar el flujo de aire para agrandar la oportunidad de eventos. Este enfoque también se puede explicar por las ecuaciones (4)-(7). El aumento del flujo de aire significa el aumento de  $J_g$  y en mismo tiempo  $S_b$ .



### 3. Objetivo

#### 3.1. Objetivo General

Mejorar la recuperación mediante una combinación de aumento en liberación y condiciones hidrodinámicas y químicas en el proyecto arqueros con el enfoque desde el punto de vista de la liberación de minerales y el flujo del aire.

#### 3.2. Objetivos específicos

##### Objetivo 1

-Revelar el fenómeno de la relación entre el tamaño de partículas y la recuperación para proyecto arqueros

##### Objetivo 2

-Revelar el fenómeno de la relación entre la recuperación por tamaño y dispersión del aire

##### Objetivo 3

-Mejorar la recuperación de las partículas pequeñas para el mineral de arqueros

##### Objetivo 4

-Aumentar la recuperación de calcopirita

## 4. Metodología

### 4.1. Microscopía óptica

Para la caracterización de minerales se utiliza un microscopio óptico. El microscopio óptico utilizado en la caracterización de minerales es de luz polarizada. Este tipo de microscopio es un microscopio óptico al que se le han añadido dos polarizadores (uno entre el condensador y la muestra y el otro entre la muestra y el observador). El material que se usa para los polarizadores son prismas de Nicol, que dejan pasar únicamente la luz que vibra en un único plano (luz polarizada). Esta luz produce en el campo del microscopio claridad u oscuridad, según que los dos nicoles estén paralelos o cruzados.

En la caracterización de minerales se observan las propiedades tales como el color, el brillo, el crucero (cleavage) el pleocroísmo y la dureza. Además, con el microscopio de luz polarizada se puede observar la anisotropía y la reflexión interna. Anisotropía se identifica con los polarizadores cruzados y un cristal anisótropo muestra distintos colores cuando se gira en la platina.

En la figura 1 se muestra el microscopio óptico de luz polarizada equipado con una cámara conectada al computador.



Figura 1 Microscopio óptico de luz polarizada

#### 4.2. Chancado

El chancado es la etapa primera de conminución de rocas. El objetivo de este procesamiento es reducir tamaño de partículas para poder transportarlos y procesarlos en los molinos (la próxima etapa). Hay varios tipos de chancador y varios tipos utilizados en la faena, pero en esta investigación se utilizó un chancador de mandíbula para preparar las muestras. Como otros tipos de chancador, existen tales como un chancador giratorio, de cono, etc. Depende del tipo, la capacidad y el tamaño de alimentación y producto varían y se elige uno que corresponde a los requerimientos.

#### 4.3. Molienda

La molienda es la etapa que viene al siguiente del chancado teniendo objetivo de moler las partículas y liberar los minerales de interés de los minerales de ganga. Los molinos más utilizados en el laboratorio son el de barras y el de bolas.

Las formas de ambos molinos son similares, que son cilíndricos, y la diferencia es la media de molienda. En el molino de barra se ponen las barras y a él de bolas se ponen las bolas. El molino de barras se utiliza para las partículas relativamente más gruesas.

En general la alimentación del molino es el tamaño de unos micrones y se muele en unos cientos o hasta unas docenas micrones. Con el molino de bolas se puede moler muy finamente, pero con el objetivo de evitar sobremolienda se combina con el molino de barras.

En esta investigación ambos molinos fueron utilizados depende de experimentos.



Figura 2 El molino de Yoshida Seisakusho Co., Ltd.

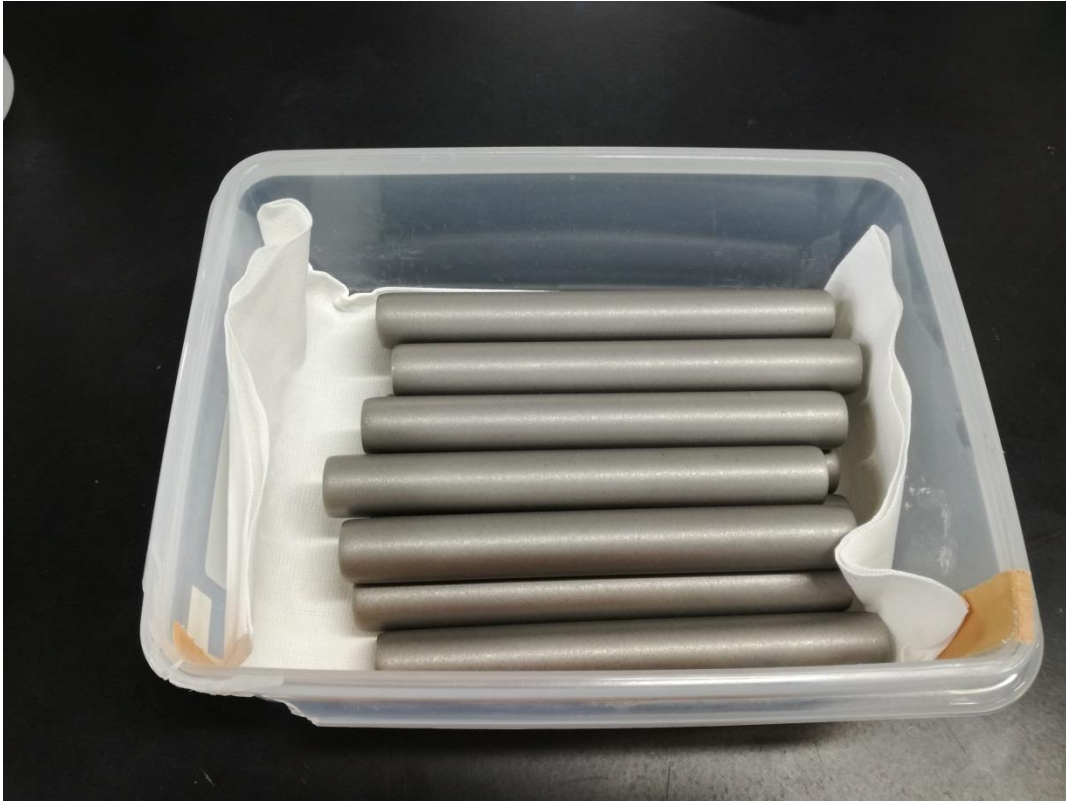


Figura 3 Barras de molino



Figura 4 Bolas de molino



#### 4.4. Flotación

Flotación es uno de los métodos más utilizados para separar los minerales preciosos desde los innecesarios utilizando la diferencia de hidrofobicidad (o hidrofiliidad). En el método de flotación se alimenta el aire a una celda cúbica (típicamente) llenada con la pulpa del mineral de interés y se implementa agitación para introducir aire y generar burbujas. Las partículas hidrofóbicas se flotan junto con las burbujas y las hidrofílicas se quedan en la pulpa.



Figura5 La máquina de flotación del tipo Denver

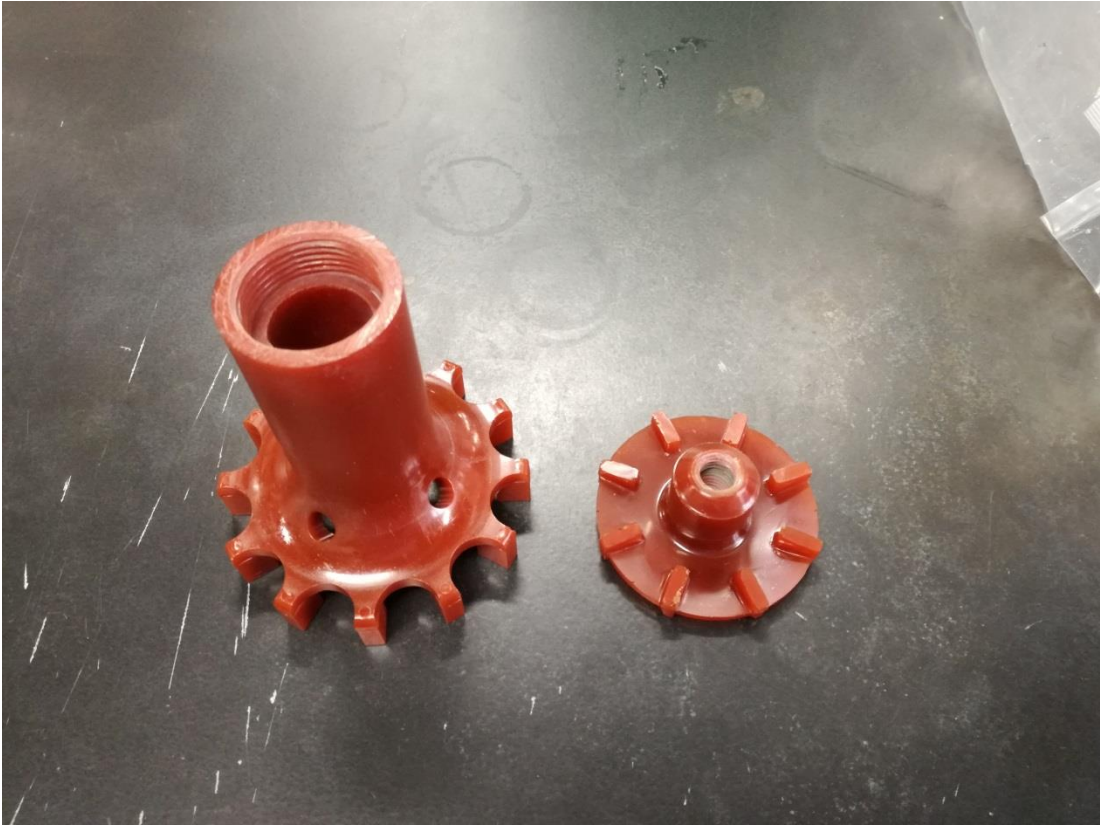


Figura 6 El impeller de la máquina de flotación

#### 4.5. ICP-MS

ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (Ing.), Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (Esp.)) es una técnica de análisis inorgánico elemental e isotópico capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango ng/l – mg/l además de poder llevar a cabo la determinación de los elementos en un análisis multielemental que provee la composición de la muestra analizada.

#### 4.6. MLA (Mineral Liberation Analyzer)

MLA es un sistema que consiste en 2 partes, que son la parte de microscopio electrónico (SEM-EDX) y la del programa de analizador de imágenes. El sistema realiza análisis de varios parámetros, no solamente la ley o la distribución de tamaño sino también la distribución de grano de minerales, mineralogía modal, y la liberación de minerales. En la Figura 7 se muestra el sistema de MLA. La liberación de minerales se mide superficialmente como la proporción de perímetro libre a perímetro total por grano.



Figura 7 El sistema MLA



#### 4.7. Medición del flujo del aire en la celda Denver

En este trabajo aclarar el efecto del flujo del aire es uno de los objetivos, pero la máquina de flotación con la celda Denver, que es el equipo utilizado en laboratorio en común en el mundo, no tiene aparatos para medir o ajustar el flujo. El variable único es la velocidad de agitación. Por lo tanto antes de los experimentos de flotación se midió la relación entre el flujo de aire y la velocidad de agitación.

Para medir el flujo se utilizó la celda de un litro llenada con agua. Se cubrió la calda entera con una bolsa plástica y se conectó un tubo como salida del aire. Y el otro cabo del tubo se metió en agua para medir el flujo con una probeta. En la figura 8 se muestra la foto del sistema de medición del flujo del aire, y en la figura 9 se muestra el esquema del sistema. Con este sistema se puede medir el flujo con poca pérdida de carga y poco efecto de la presión del agua en probeta.



Figura 8 El sistema de medición del flujo con la celda del tipo Denver

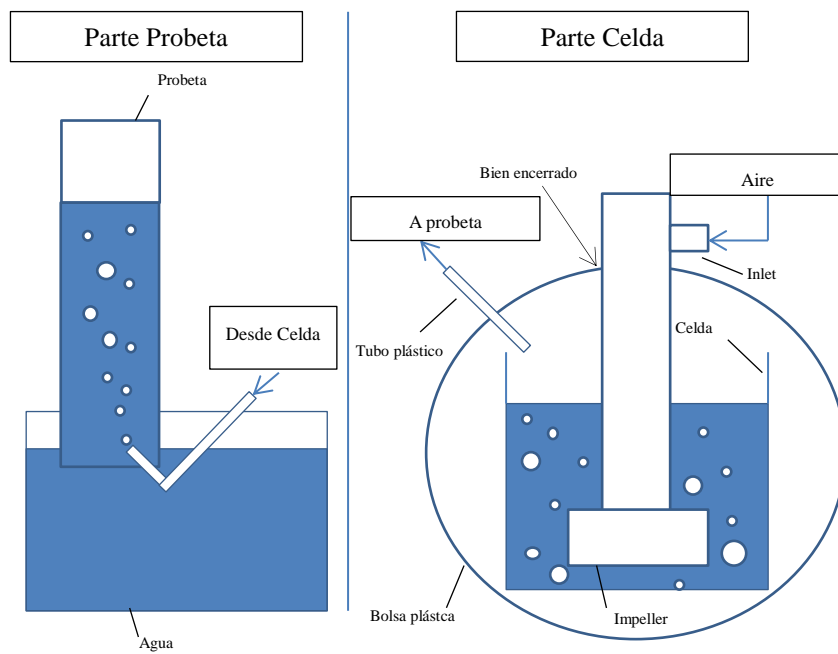


Figura 9 Esquema del sistema de medición del aire

## 5. Procedimientos

### 5.1. Chancado y muestreo

Las muestras para este estudio son 4 minerales de las distintas partes de los sondajes de un yacimiento. Llegaron al laboratorio como sondajes rotos (no chancados) así que se chancaron primero. El chancado se llevó a cabo con el chancador mandíbula y se tamiza con la malla #6 (3350 mm) para recircular la sobrecarga al chancador. Después, se separaron en los paquetes de 480 g cada uno, que es la alimentación del molino. La separación fue ejecutada con el cortador giratorio que tiene 10 recipientes.

### 5.2. Determinación de la curva de molienda

Para generar muestras molidas en el tamaño de objetivo, hay que obtener una relación entre tiempo de molienda y el tamaño de partículas. Los tamaños de partículas tienen su propia distribución, así que se utiliza valor representativo. La representativa más utilizada es el  $P_{80}$ .  $P_{80}$  se define como: el peso total de las partículas menor que el tamaño equivale a 80 % de peso total de la muestra. En esta investigación las muestras se muelen por 4, 8, 12, 16 y 20 minutos y se tamizan para obtener los  $P_{80}$ . Y al final se calcularon los valores requeridos para cada prueba.

### 5.3. Caracterización con microscopio óptico

Se llevó a cabo la caracterización con el microscopio óptico para las cuatro muestras. Para la observación las muestras fueron preparadas en la forma de briquetas de resina epoxi. La observación, por lo tanto, fue ejecutada con la luz reflejada. La preparación de briquetas es el mismo procedimiento de las briquetas para el análisis de MLA.

### 5.4. Efectos de tamaños de partículas y reactivos

Primero para investigar los efectos del tamaño de partículas y del reactivo se llevaron a cabo algunos experimentos de flotación. Considerando la fineza de los minerales de cobre, las condiciones experimentales elegidas son los  $P_{80}$  de 50, 70 y 100  $\mu\text{m}$ . En mismo tiempo para cada  $P_{80}$  se aplican 2 condiciones de reactivos. En la Tabla

1 se muestran las condiciones experimentales.

Los concentrados son separados según el tiempo tales como 0-1 minuto, 1-2 minutos, 2-4 minutos, 4-8 minutos y 8-16 minutos. Aparte de eso se analiza relave también, por lo tanto un experimento genera 6 muestras que analizar. Teniendo el resultado del análisis químico se calcula la recuperación y se comparan los resultados de flotación.

Tabla 1 Condiciones experimentales

Número de muestra	No 1, 2, 3, 4	
P <sub>80</sub> (μm)	50, 70, 100	
Colectores	AP 3477: 46 g/t SIPX: N.A.	AP3477: 15 g/t SIPX: 10 g/t
Espumante	MIBC: 24 g/t	

### 5.5. Efectos de agitación y aire con aire forzado

Considerando el análisis químico de los productos de la etapa anterior, se elige la condición mejor de P<sub>80</sub> y reactivo. En esta condición se llevan a cabo unos más experimentos cambiando la velocidad de impeller de la celda y el flujo de aire. Por la característica de la celda Denver la cantidad de aire se introduce depende de la agitación. Pero en esa investigación se conectó un compresor para cambiar el flujo del aire independiente de la agitación. Normalmente para la celda de 1 L se emplea la velocidad de 900 rpm, por lo tanto en este estudio se aplican 3 variedades de velocidad de 900rpm, 1100 rpm y 1300 rpm. Y como el flujo de aire, se aplicaron 1,6, 5,2 y 7,2 L/min, que correspondieron a la cantidad de aire en la condición auto aspirada con la velocidad de agitación de 900, 1100 y 1300 rpm respectivamente. Para medir y ajustar el flujo de aire se utilizó el flujómetro de masa de diferencial de temperatura, MF-F hecho por HORIBA Stec Co., Ltd. En la figura 10 se muestra la foto del flujómetro. En la Tabla

2 se muestran las condiciones experimentales para este trabajo. Tiempo de flotación es 16 minutos igual que la parte anterior. Los productos de experimentos son 5 concentrado y 1 relave. Los concentrados y relaves se muestran para hacer briquetas de resina epoxi de MLA, y se analizaron por especie de minerales.



Figura 10 Flujómetro de masa

Tabla 2 Condiciones experimentales

Número de muestra	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
P <sub>80</sub> (µm)	50	50	50	100
Colectores	AP 3477: 15 g/t SIPX: 10 g/t			
Espumante	MIBC: 24 g/t			
Velocidad de agitación (rpm)	900, 1100, 1300			
Flujo de aire (L/min)	1,6, 5,2, 7,2			
Velocidad de gas superficial (cm/s)	0,23, 0,74, 1,03			

## 5.6. Análisis por MLA

En la parte anterior se produjeron 60 concentrados y 12 relaves. Se hicieron briquetas con una resina epoxi, y el detalle del procedimiento es como lo siguiente. Primero la muestra tiene que ser cortado en 1 g aproximadamente. Y después se mezcla con polvo de carbono del mismo peso de la muestra. Este polvo es para desaglomerar y dispersar las partículas finas de minerales. La mezcla se junta con el líquido de prepolímero. Después de mezclar bien las partículas y prepolímero se echa el líquido de endurecedor, se mezcla bien hasta que se vuelva transparente y se calienta en el horno de 45 °C por una noche. Después de endurecerse bien las briquetas tienen que ser pulidas. Al final las bien pulidas pasa la etapa de recubrimiento por capa de carbono.

Las briquetas pulidas se ponen en la cámara de muestras de MLA y parte la medición. Antes de la medición, que se demora desde 1 o 2 horas hasta unas 10 horas por muestra, se tiene que definir la configuración. Cuando esté lista la medición, se analiza las imágenes y se lleva a cabo la clasificación de minerales.

## 5.7. Análisis cinéticos

Considerando la reacción de flotación como la del primer orden las ecuaciones (10) y (11) se derivan con la velocidad de reacción  $V$ , la densidad de la pulpa  $C$ , el tiempo  $t$ , la recuperación  $R$  y la constante cinética  $k$ .

$$V = -\frac{dC}{dt} = kC \quad (10)$$

$$R = 1 - \exp(-kt) \quad (11)$$

Con la ecuación (11), el gráfico de  $\ln(1-R)$  contra el tiempo  $t$  debería ser una línea recta. Sin embargo se suelen curvar hacia arriba en realidad. Este es debido a la suposición del modelo que después del tiempo suficiente la recuperación llega a 100 % aunque en realidad las partículas ocultas en la ganga existen y la recuperación no llega a 100 %. Considerando lo explicado, se propone la siguiente ecuación (12) con la recuperación máxima  $R_{max}$ .

$$R = R_{max}[1 - \exp(-kt)] \quad (12)$$

En este informe el cálculo ejecutó con el modelo de la ecuación (12) y se comparan la recuperación máxima  $R_{max}$  y la constante cinética  $k$ .

## 5.8. Medición del flujo del aire

En este trabajo los experimentos de flotación se iba a llevar a cabo con la celda de un litro y entonces la velocidad de

agitación normal para este tamaño de celda es 900 rpm. Por lo tanto para esta medición del flujo, la velocidad se varió en 900, 1100 y 1300 rpm.

En la figura 11 se muestran los resultados. El flujo del aire se varía en un rango ancho desde 1,6 L/min hasta 7,2 L/min mientras la velocidad de agitación desde 900 a 1300 rpm.

Se dividen los valores por el área de sección transversal y se obtienen la velocidad de gas superficial  $J_g$ . La celda utilizada en este experimento tiene el área de 116 cm<sup>2</sup> y por lo tanto las  $J_g$  son 13,9, 45,0, 62,4 cm/min respectivamente.

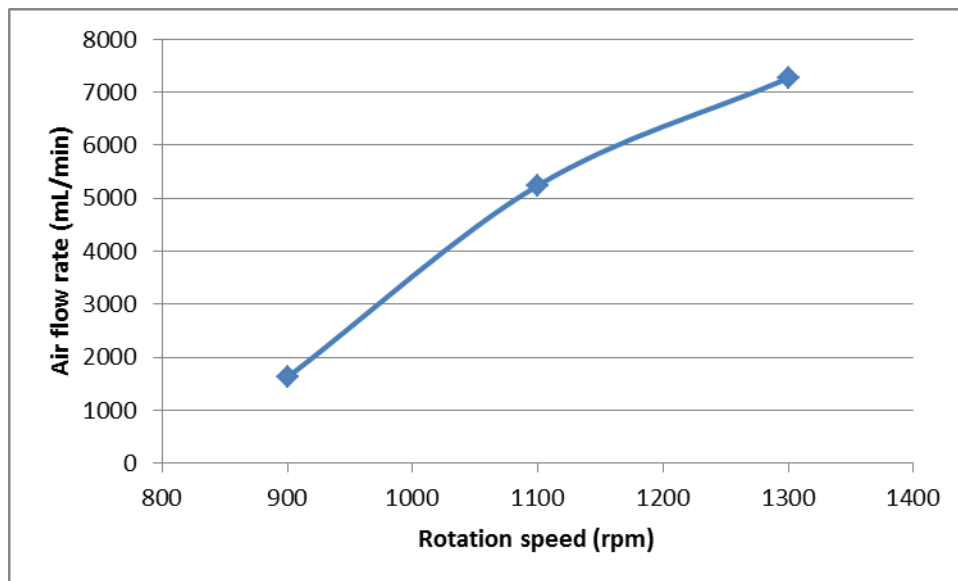


Figura 11 La relación entre la velocidad de agitación y el flujo del aire

## 6. Resultados

### 6.1. Propiedades de muestras

#### 6.1.1. Caracterización con el microscopio óptico

En este capítulo se explican las propiedades observadas en la microscopía de las cuatro muestras.

##### 6.1.1.1. Muestra 1

La mayoría de los minerales de cobre es bornita, y calcopirita está en el segundo lugar de proporción. La calcosina y la tennantita son escasas. A veces bornita está en eutéctico con calcopirita. La mayoría de los granos de minerales de cobre está en el tamaño de entre docenas y diez micrones y algunos en menos de diez, aunque unos pocos granos están en el tamaño de mayor de 100 micrones. Especialmente calcopirita suele existir en pequeños granos como menos de diez micrones. Algunos granos pequeños de calcopirita están en esferas framboidales. La calcosina puede ser eutéctico con bornita y es muy poco. Aunque la cantidad era muy pequeña, también hubo un caso en el que la bornita y la covelina eran eutécticos.

Aunque la roca huésped es una caliza compuesta de finas partículas de calcita, contiene una gran cantidad de partículas de feldespato y partículas de grava ígnea rocosa. En algunos casos los minerales de cobre se encuentran en las partículas grandes de caliza, pero en muchos casos, el mineral de cobre se encuentra disperso en partículas de feldespato calizo que incluyen feldespato y rocas ígneas, en las piedras ígneas y en la matriz de la piedra caliza.

En las figuras 12-14 se muestran las imágenes de la muestra 1 tomados con microscopio óptico.



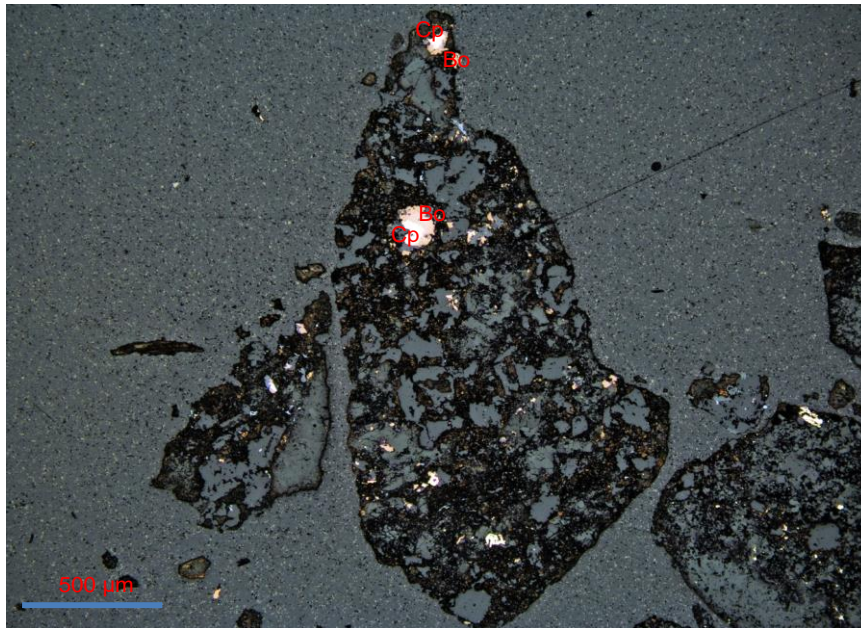


Figura 12 Los minerales de cobre en la partícula que contiene granos de roca ígnea (Bo: bornita, Cp: calcopirita)

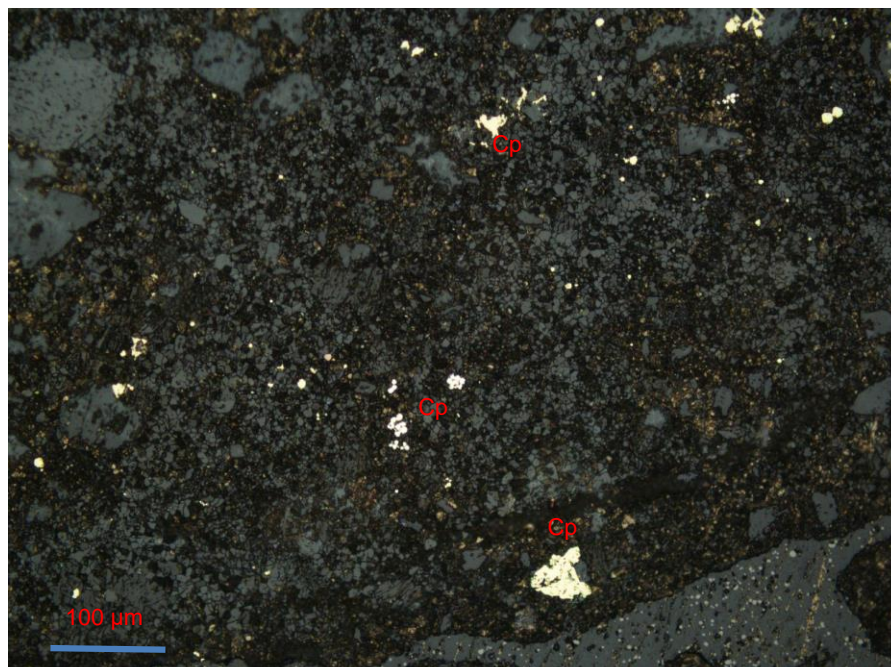


Figura13 Granos de calcopirita (Cp: calcopirita)

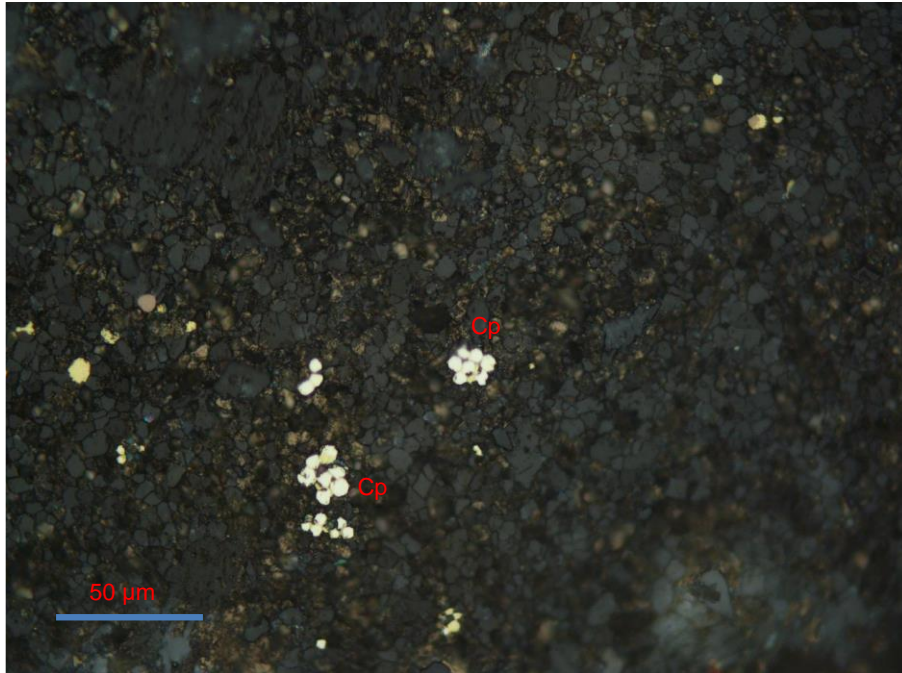


Figura 14 Calcopirita framboidal (Cp: calcopirita)

### 6.1.1.2. Muestra 2

Los minerales de cobre son muy abundantes en bornita y luego contienen calcopirita e incluso minerales de calcosina menores. Se observa que la calcosina y la calcopirita son eutécticas con bornita.

Aunque las partículas de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  de bornita, se dispersan con partículas de aproximadamente 50 a 10  $\mu\text{m}$  en la mayoría de los casos, y además partículas finas de 10  $\mu\text{m}$  o menos se dispersan en el sustrato calcáreo compuesto de calcita fina.

La calcopirita tiene una sola partícula de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  a varias decenas de micrones, pero muchas son eutécticas con mineral de bornita. Además, muchas partículas están en el orden de decenas de micrones, muchas partículas por debajo de 10 micrones se encuentran dispersas en el mineral.

La calcosina está en menos de decenas de micrones, y se encuentra dispersa en el mineral con muchas partículas de menos de 10 micrones.

La roca huésped es una caliza que contiene una gran cantidad de rocas ígneas que se ven como gravas andesíticas, y también se observan grandes fenocristales feldespatos. La caliza se compone principalmente de rocas ígneas en una matriz de cristal de calcita fina. También se ve parcialmente la caliza que consiste en calcita de grano grueso. Muchos de los minerales de cobre están dispersos en piedra caliza que contiene las rocas ígneas, y muchos minerales de cobre de 10  $\mu\text{m}$  o menos están presentes. Los minerales de cobre en la caliza gruesa tienen muchas partículas gruesas.

En las figuras 15-16 se muestran las imágenes microscópicas de la muestra 2. En la figura 15 la calcopirita está encerrada en partículas de bornita.



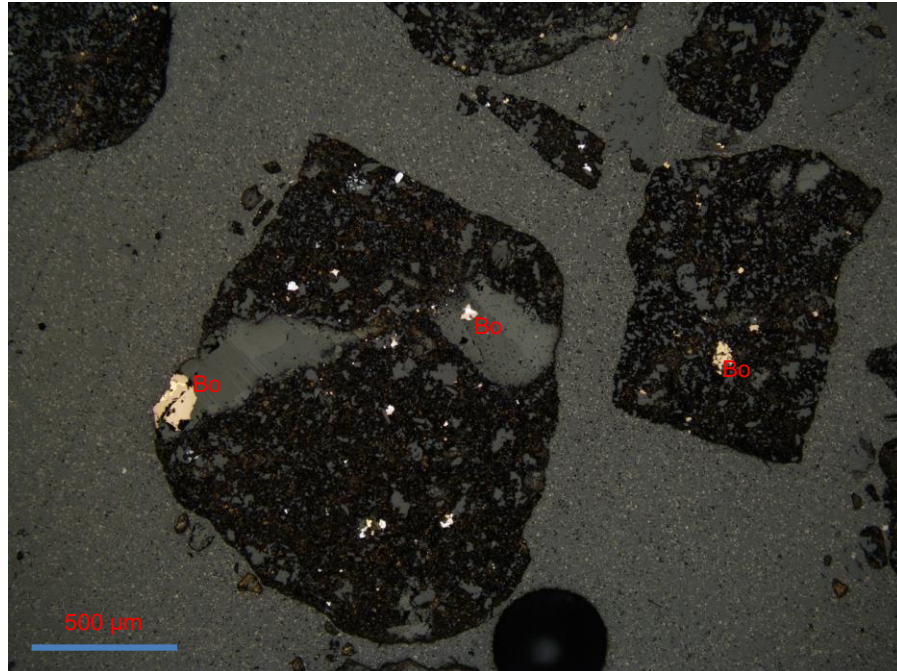


Figura 15 Partículas eutécticas de calcopirita y bornita en calcita y partículas eutécticas de calcopirita y bornita en rocas ígneas (feldespatho) (Bo: bornita)

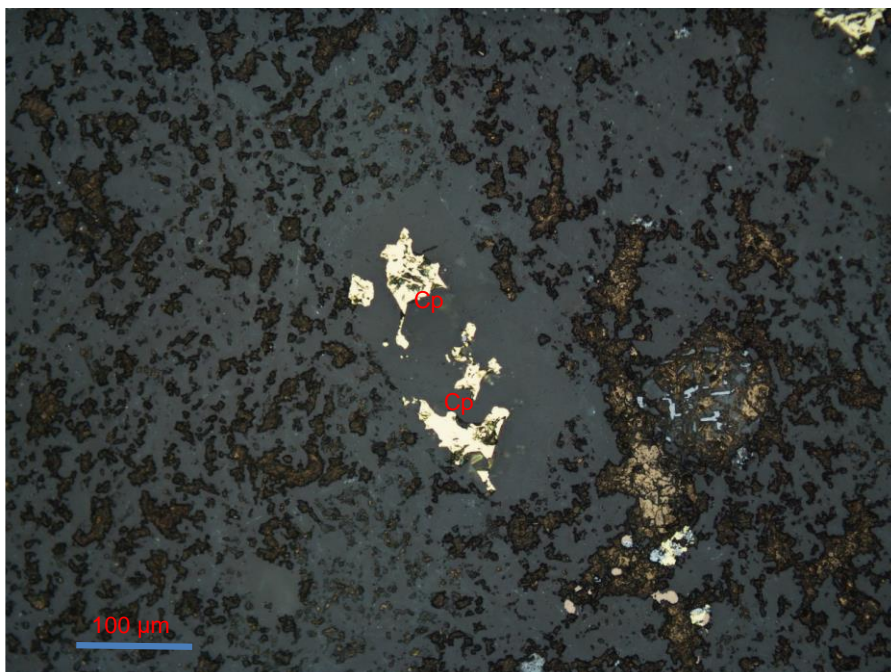


Figura 16 Partícula única de calcopirita en feldespatho (Cp: calcopirita)

### 6.1.1.3. Muestra 3

Los minerales de cobre son muchos en bornita y calcosina, y la calcopirita se ve raramente. La bornita y la calcosina a menudo son eutécticas. Además, las partículas individuales de tetraedrita de igual o menos de decenas micrones y las tetraedritas de varias decenas micrones o menos son eutécticos con calcosina o bornita.

La bornita y calcosina a menudo son eutécticas. Se observa una pequeña cantidad de granos eutécticos de bornita y calcosina del orden de cientos micrones. La mayoría de la bornita y calcosina son partículas de varias decenas de micrones y hay partículas eutécticas de ambas. Muchas partículas minerales de cobre de 10  $\mu\text{m}$  o menos están en la ganga en puntos dispersos.

En las figuras 17-18 se muestran las imágenes ópticas de la muestra 3.

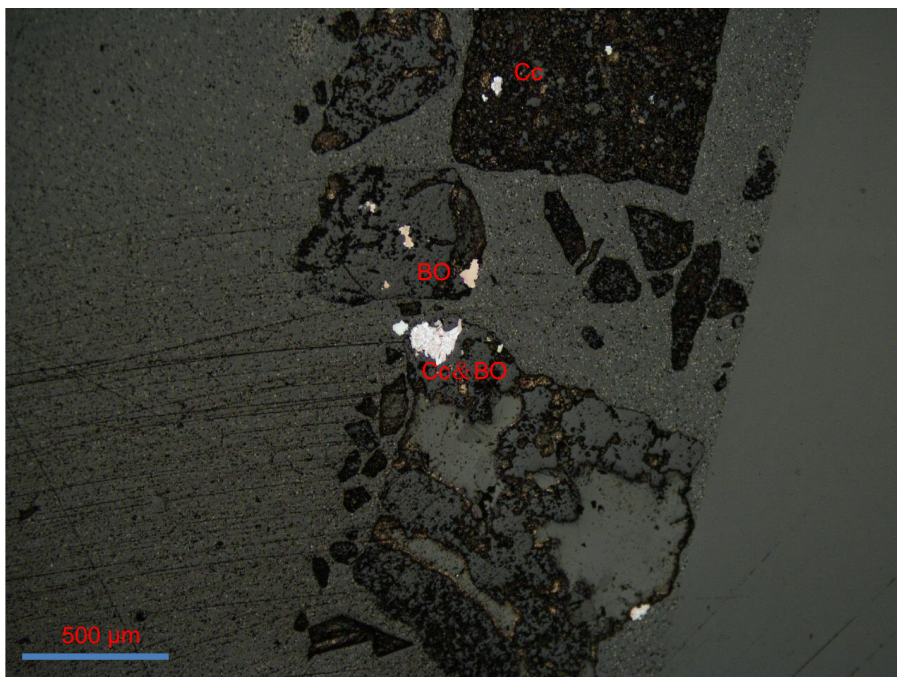


Figura 17 Partículas calcosina en la caliza que contiene feldespato (Cc: calcosina, Bo: bornita)

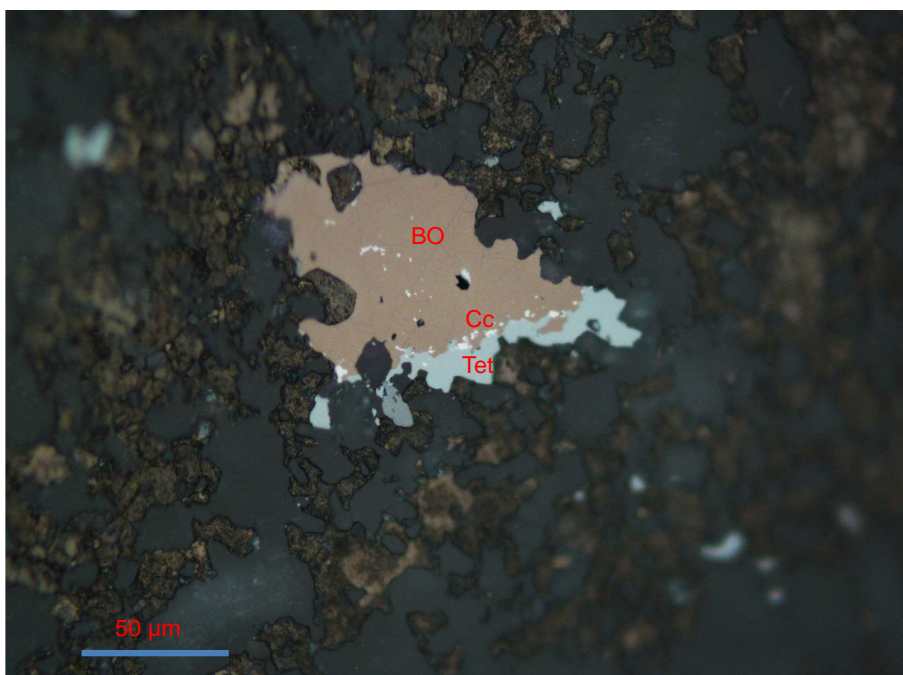


Figura 18 Eutético de bornita, tetraedrita y calcosina (partículas finas)  
(Bo: bornita, Cc: calcosina, Tet: tetraedrita)



#### 6.1.1.4. Muestra 4

Los minerales de cobre son bornita, calcosina y calcopirita, el mineral principal de cobre es bornita, segundo es calcosina y hay pocas calcopiritas. En muchos casos, bornita y calcosina son eutécticas. Se observan granos gruesos de aproximadamente 1 mm de eutéctico de bornita y calcosina, pero la mayoría de ellos tienen un tamaño de 100  $\mu\text{m}$  a decenas de  $\mu\text{m}$ . La calcopirita tiene muchas partículas de decenas micrones o menos.

Contiene las partículas de minerales de cobre finas de menos de 10 micrones, pero en menor cantidad que las otras muestras.

La roca tiene muchas calizas que tienen la parte de calcita gruesa, y hay caliza que contiene muchos feldespatos.

Los minerales de cobre están contenidos en la caliza que contiene calcita gruesa o en la caliza que contiene rocas ígneas o feldespato. Además, hay muchas calcopiritas en la caliza que contiene feldespato. Partículas de bornita y calcosina están presentes en toda la parte de minerales.



Figura 19 Partículas eutécticas de bornita y calcosina en caliza que incluye rocas ígneas  
(Bo: bornita, Cc: calcosina)

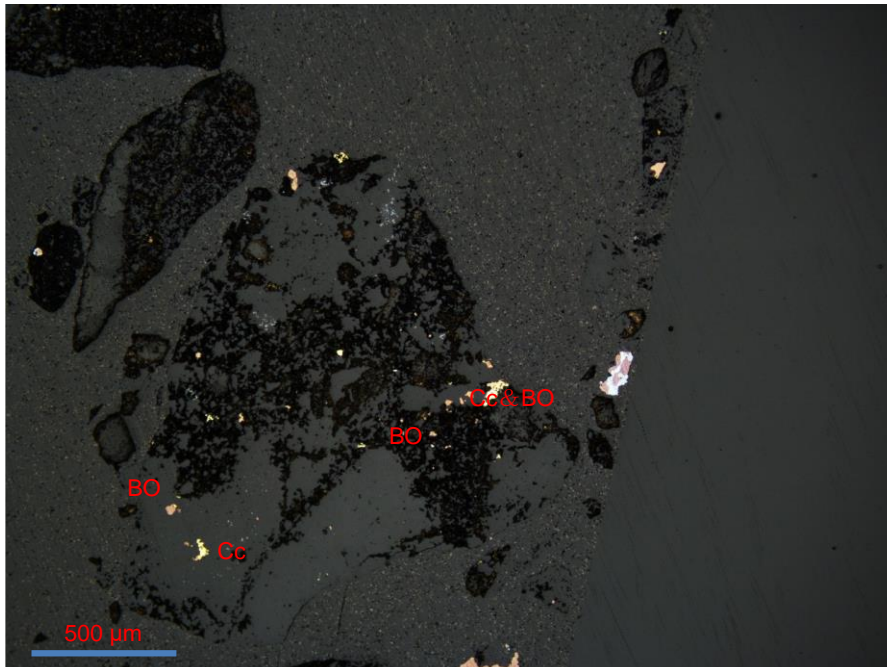


Figura 20 Eutético de bornita y calcosina en la caliza consistente en calcita y minerales de cobre en la caliza que contiene rocas ígneas (Bo: bornita, Cc: calcosina)



### 6.1.2. Caracterización por MLA

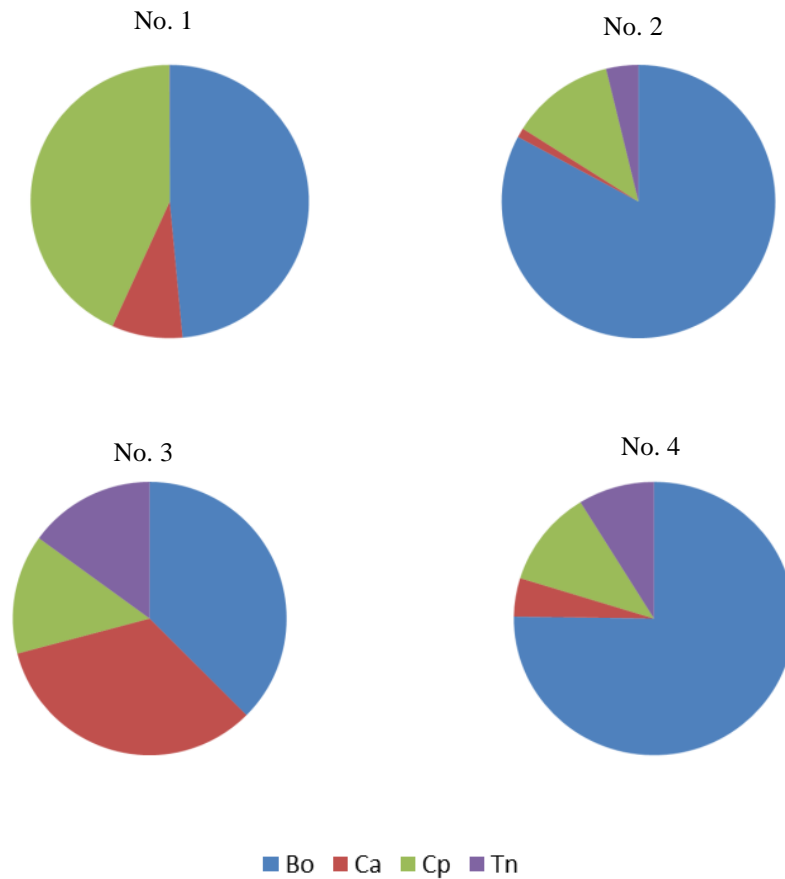


Figura 21 Composición mineralógica de las cuatro muestras  
(Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

En las figuras 21 se muestran las composiciones mineralógicas de las cuatro muestras. En las figuras, Bo significa bornita, Ca es calcosina, Cp es calcopirita y Tn significa Tennantita. Todas las muestras son mayormente de bornita, pero las composiciones de otros minerales son distintas. La muestra 1 contiene poca calcosina y muy poca tennantita. La 2 se compone unos 80 % de bornita y muy poca calcosina. La 3 contiene los cuatro minerales en balance. Y la 4 se compone unos 75 % de bornita y una poca de otros minerales. Además de las diferencias mineralógicas las cuatro muestras son distintas en tamaño de granos y liberación. En la figura 22 se muestran las distribuciones del tamaño de granos minerales de las cuatro muestras. Se observa la diferencia de tamaño claramente. En general la muestra 4 es la más gruesa, la 3 es la segunda y la 1 y la 2 son casi las mismas.

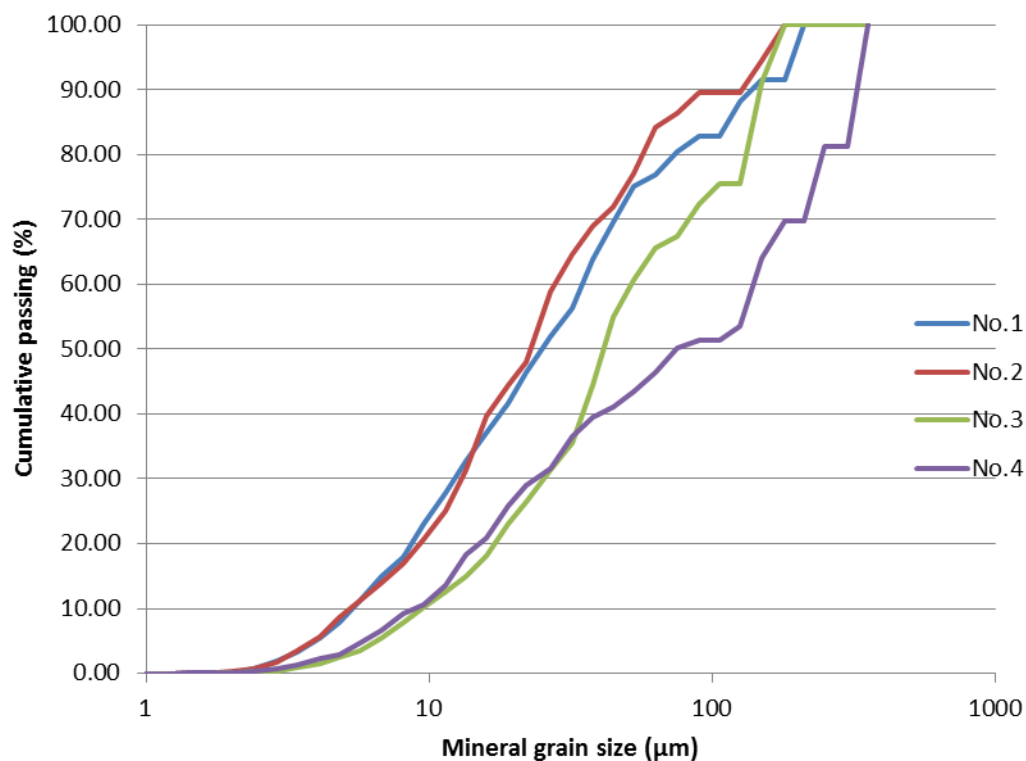



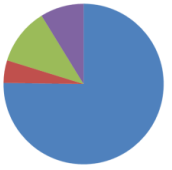


Figura 22 Las distribuciones del tamaño de granos minerales

Tabla 3 Las características de cada muestra

Numero de muestra	No.1	No.2	No.3	No.4
P <sub>80</sub> en flotación (µm)	50	50	50	100
G <sub>80</sub> (tamaño de granos de minerales de cobre) (µm)	80.1	62.9	109.3	246.3
Composición mineralógica				
Características	Cp=Bo	La mayoría es de Bo	Abundante en Ca y Tn	Granos gruesos Composición similar al No.2

## 6.2. Resultados de experimentos para saber los efectos de las condiciones químicas

### 6.2.1. Resultados

#### -Muestra 1

Los resultados de los experimentos sobre la muestra 1 se muestran en las figuras 23 y 24. Con estos resultados se calcularon las constantes cinéticas y la recuperación máxima con el método de mínimos cuadrados, que son mostradas en la figura 25. Esta muestra no demuestra la tendencia clara junta con el cambio del tamaño. Este fenómeno no se observaron en las otras muestras. Además la adición del SIPX mejoró los resultados.

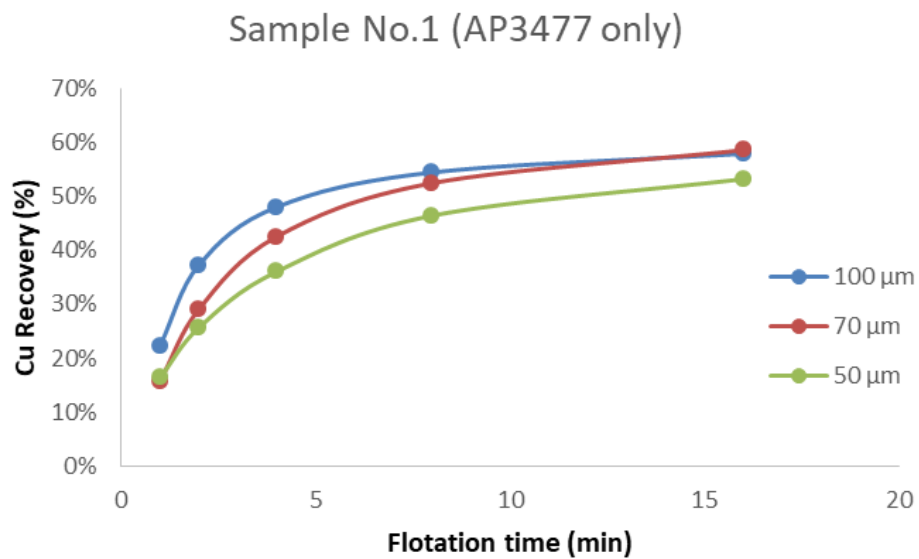


Figura 23 Resultados de flotación de la muestra 1 con solo AP3477 como colector

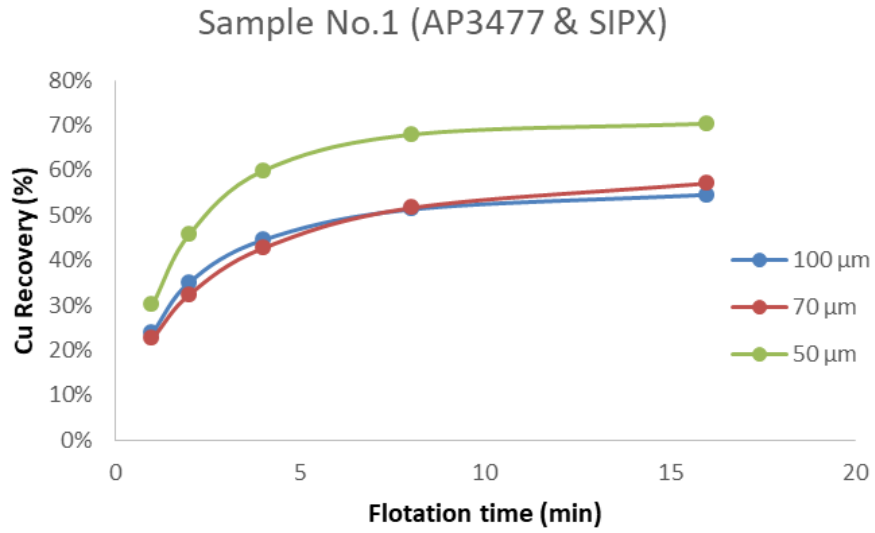


Figura 24 Resultados de flotación de la muestra 1 con AP y Xantato (SIPX) como colector

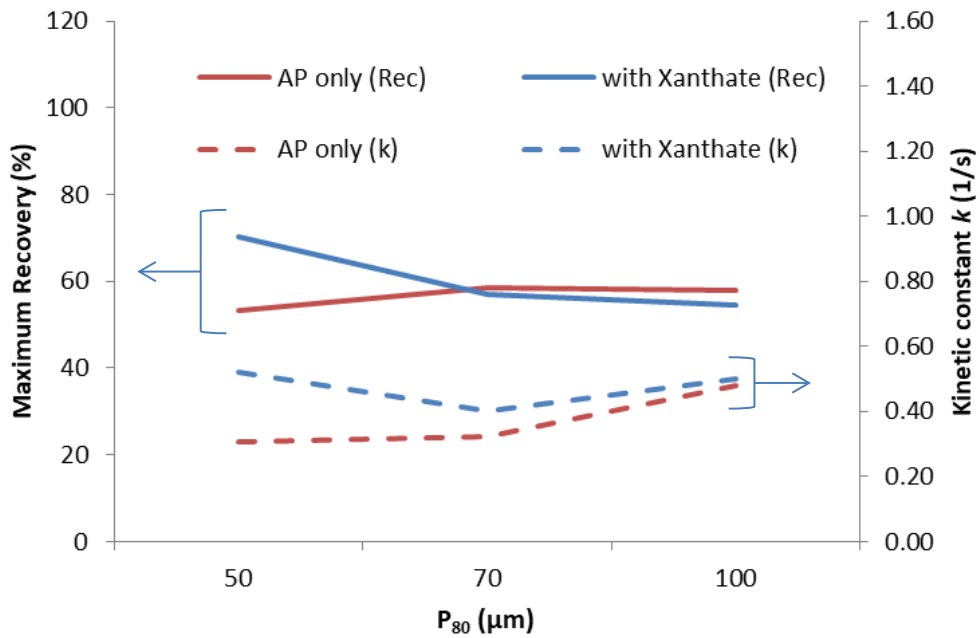


Figura 25 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 1

-Muestra 2

Los resultados de la muestra 2 se muestran en las figuras 26 y 27. En esta serie de resultados se observa la tendencia clara según el tamaño, que es que con el menor tamaño de partículas los resultados son mejores. Esto se refleja en los parámetros de recuperación máxima y la constante cinética  $k$ , que están mostrados en la figura 28. Y además, la figura 28 indica que dosis de xantato isopropílico mejoró los resultados, la recuperación máxima y la constante cinética.

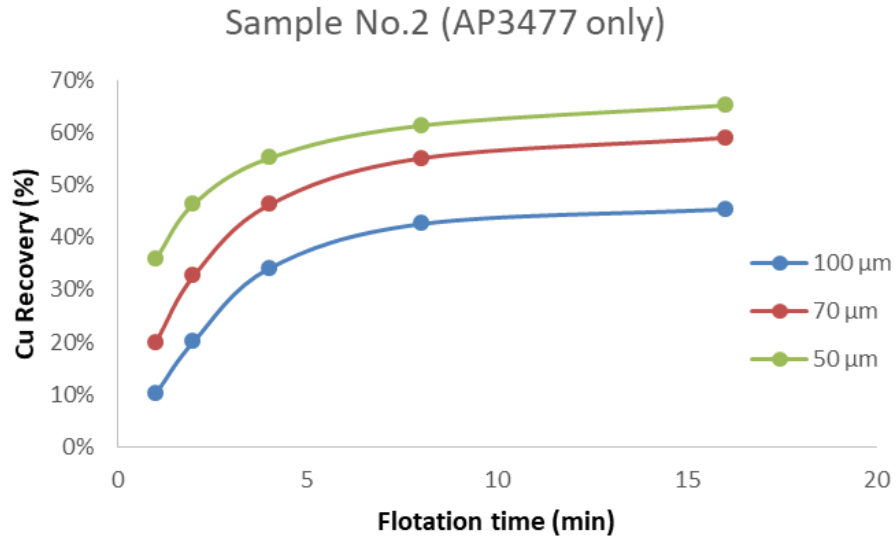


Figura 26 Resultados de flotación de la muestra 2 con solo AP3477 como colector

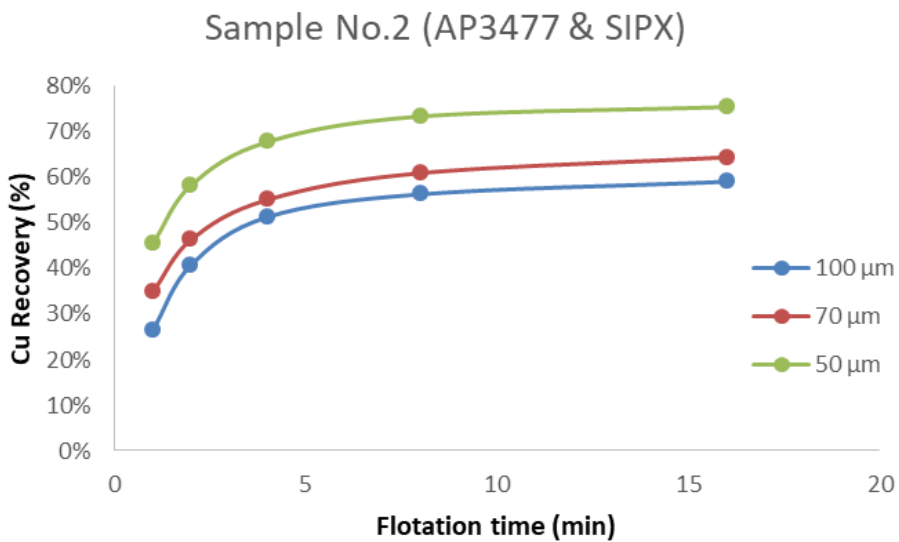


Figura 27 Resultados de flotación de la muestra 2 con AP y Xantato (SIPX) como colector

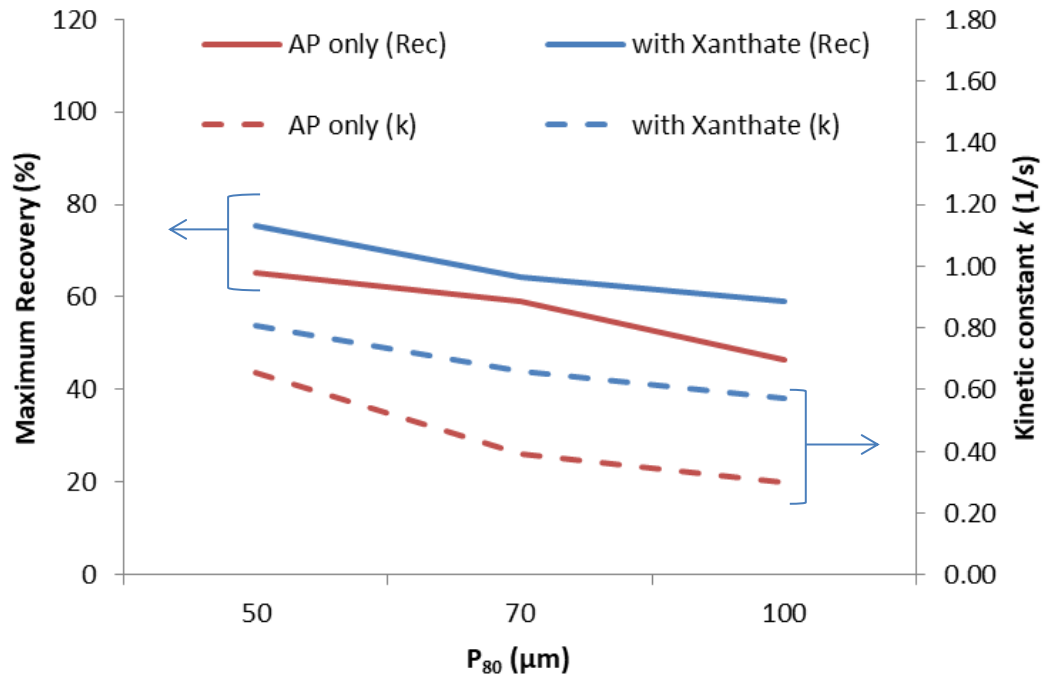


Figura 28 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 2

-Muestra 3

Los resultados de la serie de experimentos de la muestra 3 se muestran en las figuras 29 y 30. Estos resultados indican que el cambio del tamaño desde  $P_{80}$  de  $100\ \mu\text{m}$  a  $70\ \mu\text{m}$  afecta más a la recuperación máxima que a la constante cinética. En otro lado el cambio desde  $70\ \mu\text{m}$  a  $50\ \mu\text{m}$  afecta más a la constante.

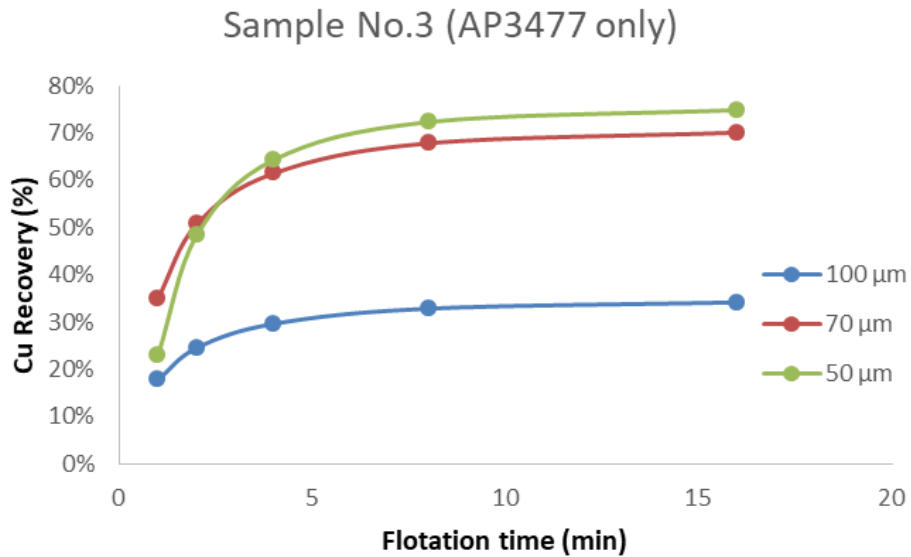


Figura 29 Resultados de flotación de la muestra 3 con solo AP3477 como colector

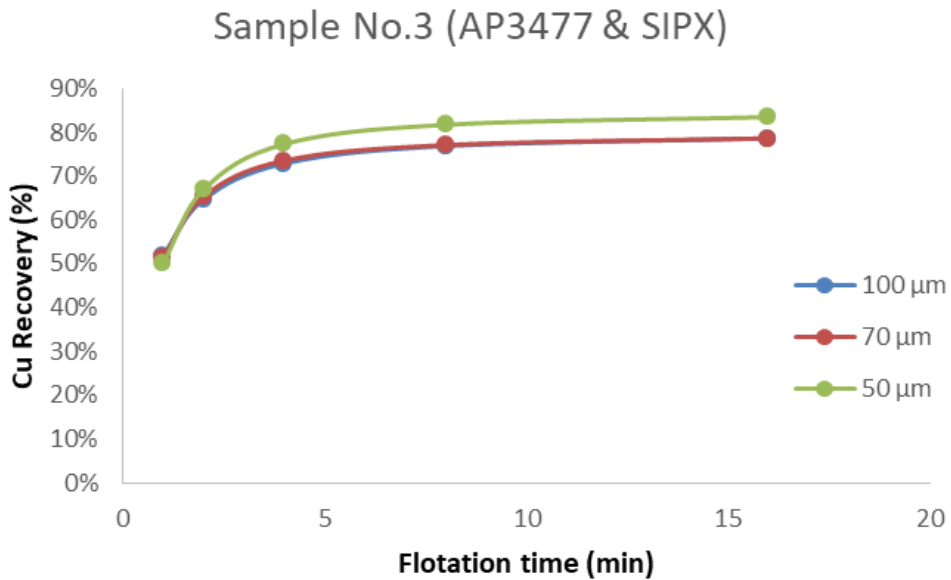


Figura 30 Resultados de flotación de la muestra 3 con AP3477 y Xantato (SIPX) como colector

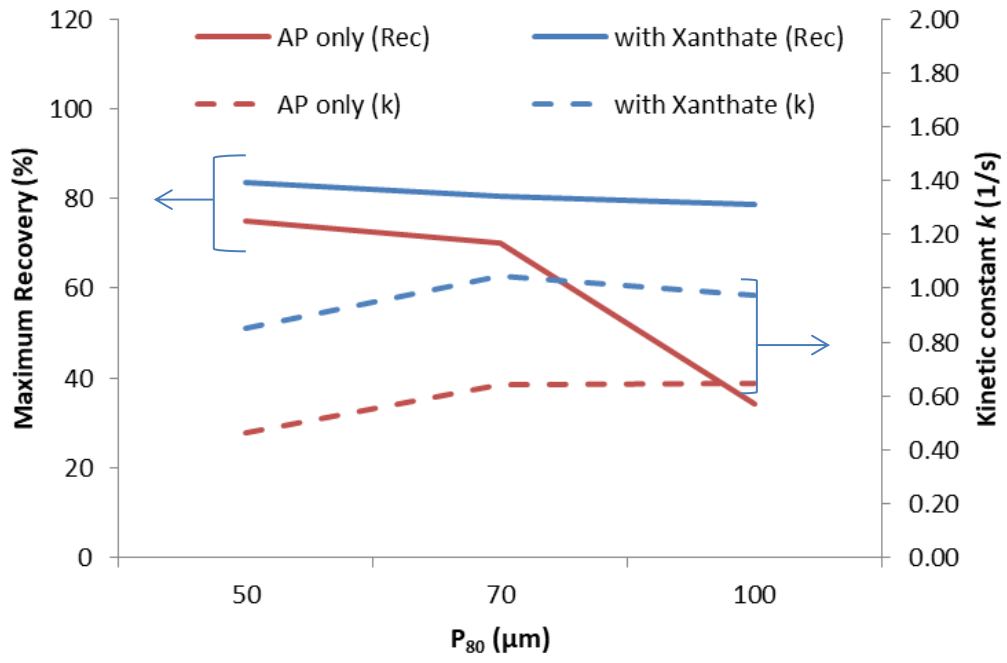


Figura 31 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 3



-Muestra 4

Esta muestra mostró el comportamiento único en las cuatro muestras. Los resultados se muestran en las figuras 32 y 34. La mejor recuperación máxima salió con el  $P_{80}$  de 100  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento no se observó en las otras muestras. Comparando la recuperación máxima y la constante cinética del  $P_{80}$  de 50  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$ , ambos parámetros marcaron el mejor valor en 100  $\mu\text{m}$ .

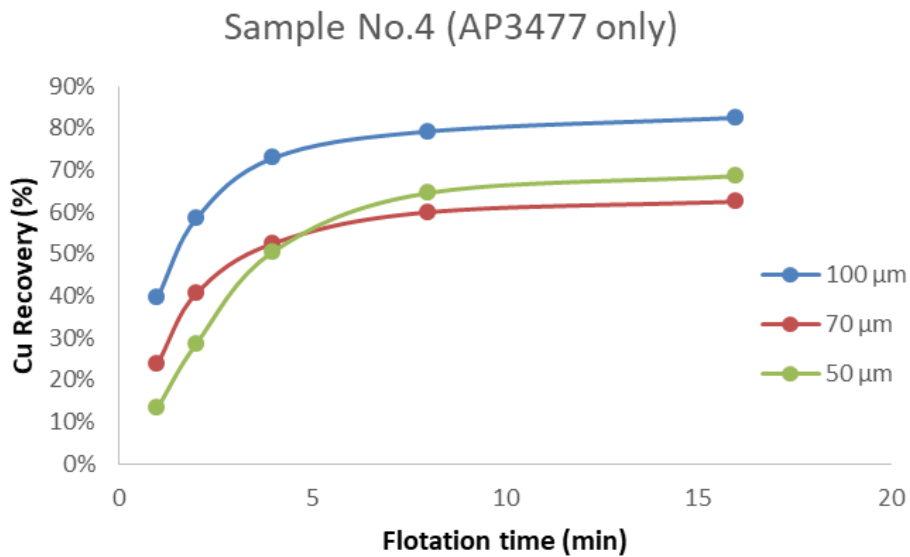


Figura 32 Resultados de flotación de la muestra 4 con solo AP3477 como colector

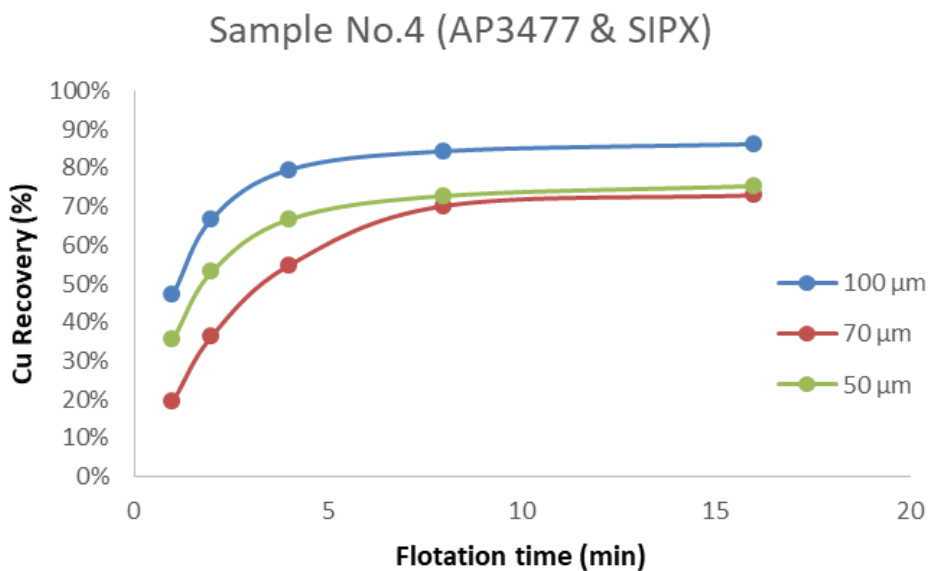


Figura 33 Resultados de flotación de la muestra 4 con AP3477 y Xantato (SIPX) como colector

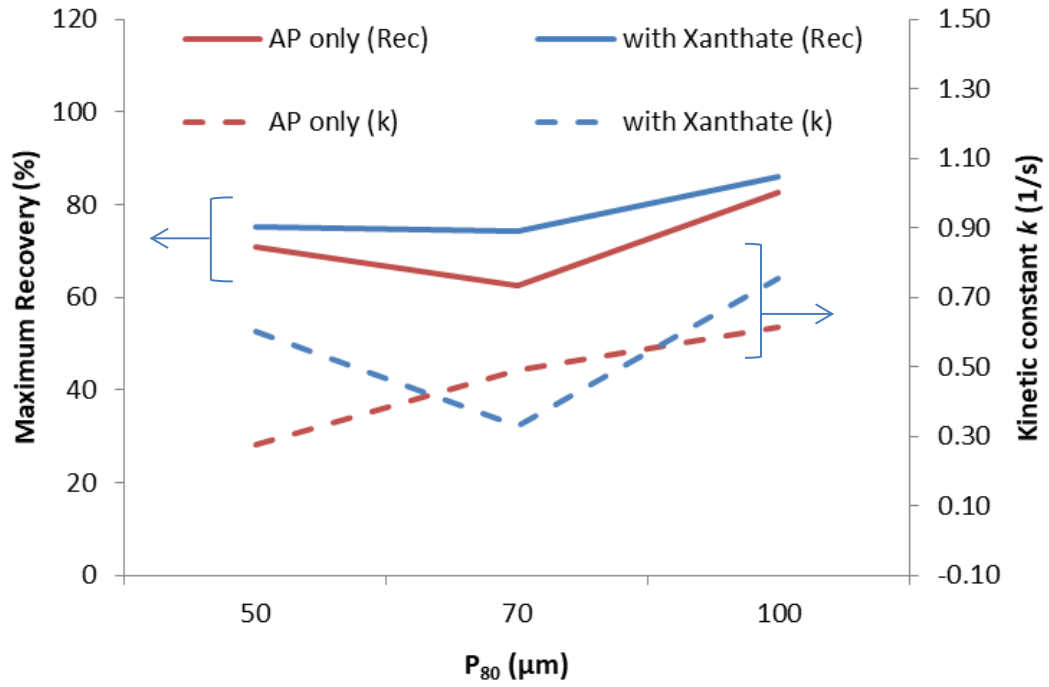


Figura 34 La recuperación máxima y la constante cinética de muestra 4

### 6.2.2. Consideraciones

Desde estos resultados se puede hacer algunas consideraciones. Primero, en las cuatro muestras la 4 mostró una tendencia distinta de las otras muestras, que la mayor recuperación se obtuvo en la molienda más gruesa. Este fenómeno se observó por el grosor de los granos minerales de cobre. Además, la recuperación máxima suele ser más alta que la muestra 1 y la 2 (la de la 3 es casi igual), se puede considerar que este fenómeno es también de la misma razón. Porque los granos minerales son grandes, están más liberados y se flotan más fácilmente.

Segundo, la muestra 3 mostró una gran diferencia entre las dos condiciones de reactivos, es decir, el efecto de la adición de IPX fue el más grande. Desde el punto de vista de la composición, la muestra 3 contiene mucha calcosina y tennantita, por lo tanto se puede considerar que el IPX mejora la recuperación de estos dos minerales más que la bornita y la calcopirita.

El resto, las muestras 1 y 2, tienen las distribuciones similares del tamaño de granos minerales pero el comportamiento en flotación ante el cambio de condiciones es distinto. El resultado de la muestra 2 se mejora con la disminución de  $P_{80}$ , pero sobre la muestra 1 no se observó una tendencia clara. La diferencia más grande entre las dos muestras es el contenido de calcopirita. Se considera que para la calcopirita la disminución de  $P_{80}$  no afecta tanto como a los otros minerales.

Acerca de la relación entre la recuperación máxima y el  $P_{80}$  la mayoría de muestras tienen tendencias parecidas pero una muestra se comportó diferentemente, que es la muestra 4. Mientras las otras muestras marcaron la subida de la recuperación en menor  $P_{80}$ , la muestra 4 mostró el contrario. Este puede ser porque los granos de minerales de cobre son relativamente grandes y por lo tanto en el  $P_{80}$  de 70 y 50  $\mu\text{m}$  ellos están sobremolidos y resulta en la baja recuperación.

Desde el punto de vista de la constante cinética  $k$ , cada muestra tiene distinto comportamiento. En la muestra 2, la  $k$  se comporta en misma tendencia como la recuperación pero en la muestra 3 al revés. En las muestras 1 y 4 es difícil encontrar una tendencia clara. Estos fenómenos pueden salir de la diferencia de composición. La investigación sigue en esta dirección.

La adición de IPX mejoró la recuperación máxima y la constante cinética en todas las muestras.

### 6.3. Resultados de experimentos de flotación (efecto de la agitación y el flujo del aire)

#### 6.3.1. Resultados de análisis con ICP-MS

##### 6.3.1.1. La relación entre la recuperación y el tiempo de flotación

En las figuras 35-38 se muestran las curvas de flotación de las cuatro muestras. Con estos gráficos se calcularon los parámetros cinéticos,  $k$  y  $R_{\infty}$ , y se muestran en la figura 39 (constantes cinéticas) y la 40 (recuperaciones máximas). Desde el punto de vista global las constantes cinéticas muestran mismas tendencias tales como mayor agitación y mayor aireación resultan en mayor constante, aunque los valores se difieren depende de la muestra.

Por otro lado las recuperaciones no mostraron tendencias tan claras. Aunque se observa que mayor agitación resulta en mejor recuperación máxima, las condiciones que dan los mejores resultados son diferentes depende de la muestra. Además, los valores de las recuperaciones se distribuyen en un rango mayor que el de las constantes.

Las tendencias de cada muestra son lo siguiente. Muestra 1: el punto más característico es el de 900 rpm y 1.6 L/min, donde se marcó una recuperación máxima muy baja comparando con las otras condiciones. Y además en esta muestra se observaron las altas recuperaciones en los puntos de “900 rpm, 1.6 L/min”, “1100 rpm, 5.2 L/min” y “1300 rpm, 7.2 L/min”, es decir, en las condiciones de “autoaspirado”.

Muestra 2: para esta muestra el aumento de la agitación y el flujo del aire resultó en mejor recuperación. Comparando los efectos de los dos parámetros, el que tiene el efecto más grande es la velocidad de agitación.

Muestra 3: Lo más diferente a las otras muestras es los valores altos de las recuperaciones máximas. Son altos y no varía mucho por el cambio de los dos parámetros. En esta muestra también se observa la tendencia que la variable más influyente es la velocidad de agitación.

Muestra 4: Esta muestra mostró la misma tendencia como las otras muestras, tal que la velocidad de agitación afecta más a los resultados. La condición que da el mejor resultado es el punto de “1300 rpm, 1.6 L/min”, esto es diferente tendencia.

Como se ha mencionado arriba los resultados de las cuatro muestras indican que una misma tendencia común en todas las muestras y también distintos comportamientos de cada muestra. La común es que la velocidad de agitación es más importante, y el distinto es la reacción contra el cambio del flujo del aire.

Estas diferencias deben ser de las diferencias de composición mineralógica, tamaño de partículas y granos minerales

y grado de liberación. Para descubrir más detalle, se analizaron las muestras por MLA. Con estas se estima que los comportamientos de los minerales de distintas composiciones se explican porque se revelarán los comportamientos de los cuatro minerales principales (bornita, calcosina calcopirita y tennantita).

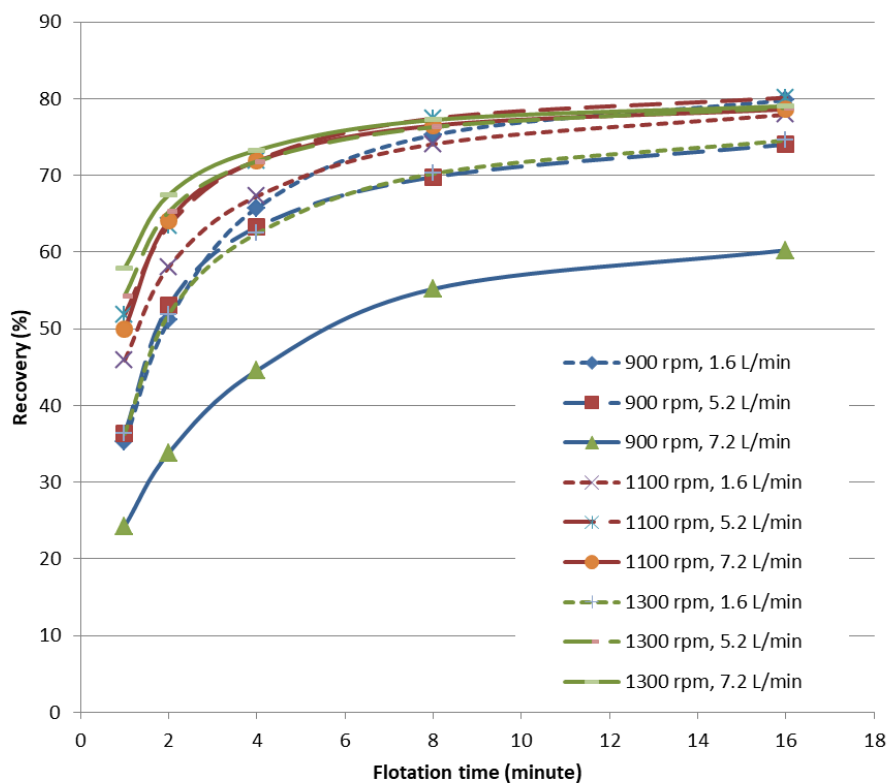


Figura 35 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No. 1)

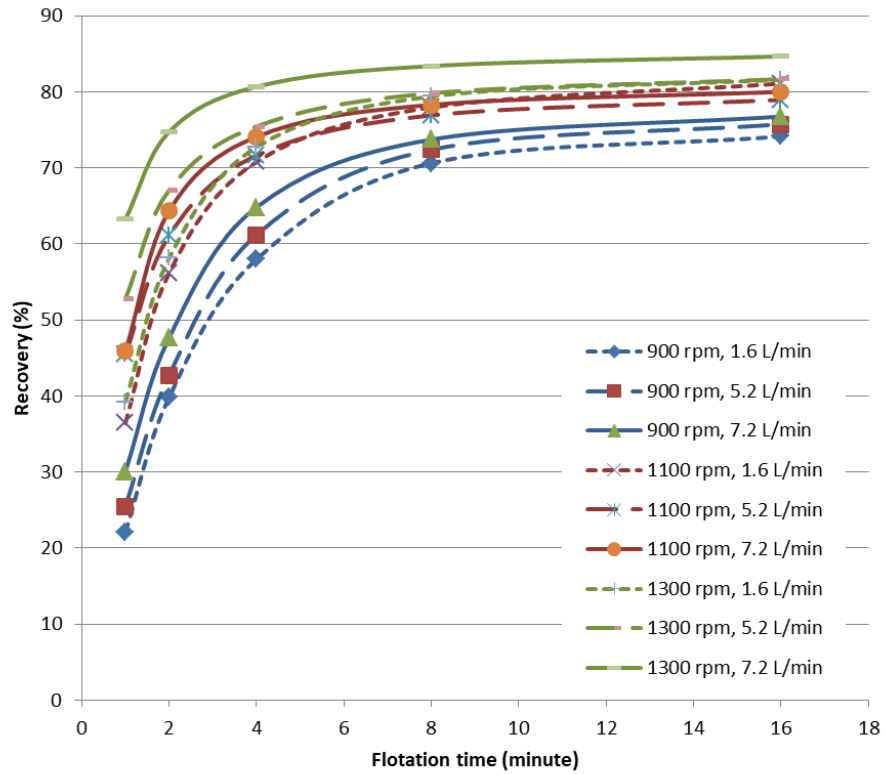


Figura 36 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.2)

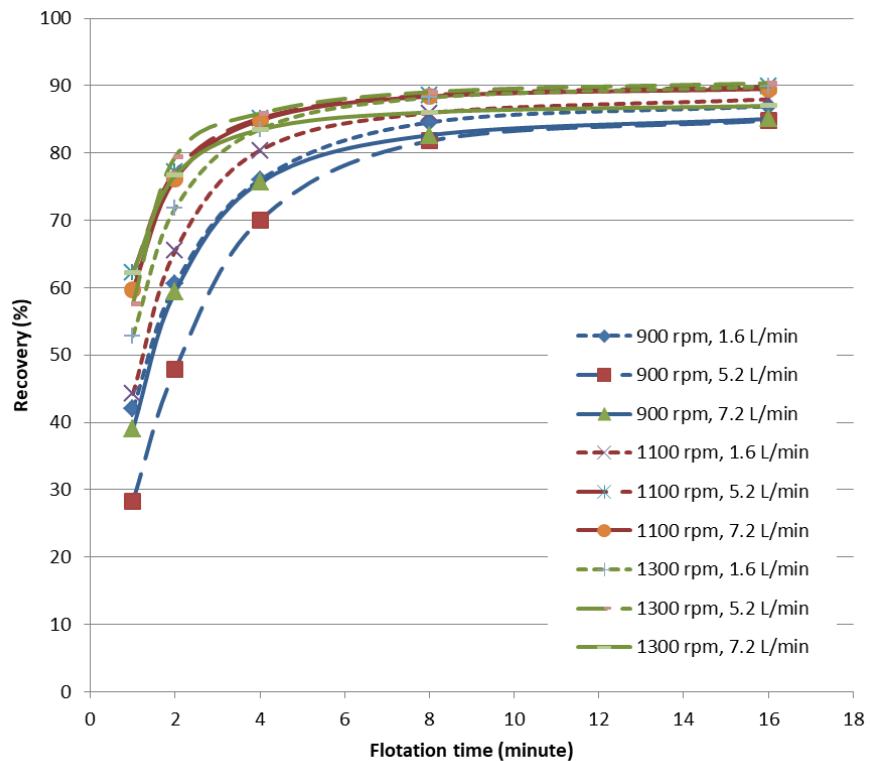


Figura 37 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.3)

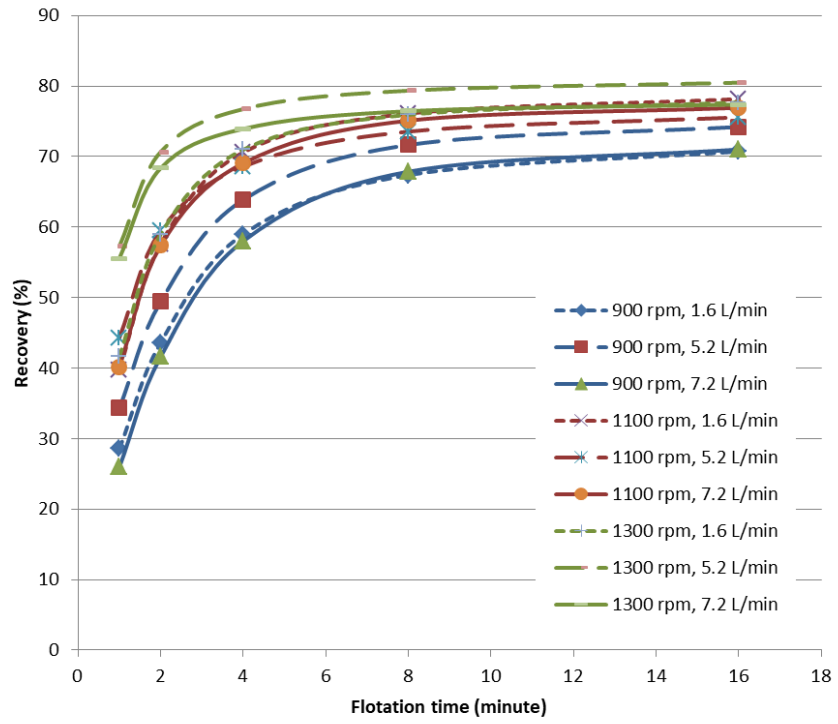


Figura 38 Las relaciones entre el tiempo de flotación y la recuperación (muestra No.4)

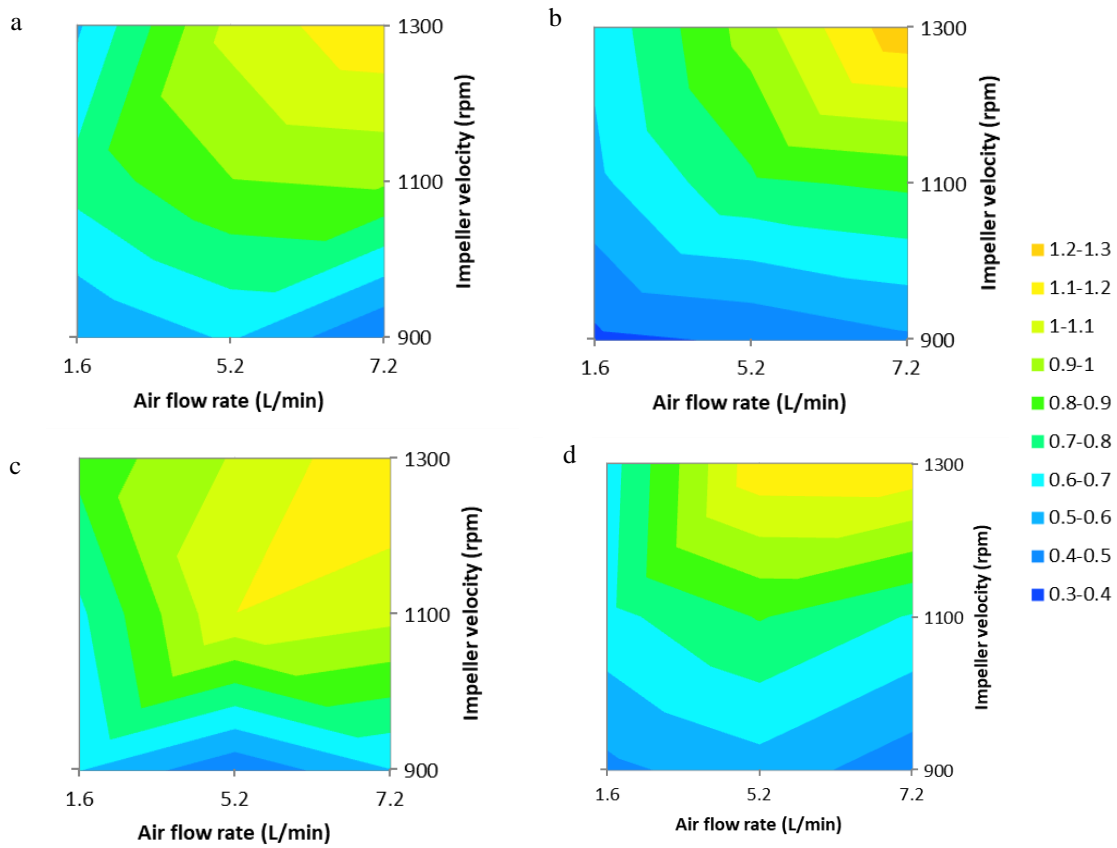


Figura 39 Efectos de la agitación y flujo del aire a la constante cinética  
 Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4)



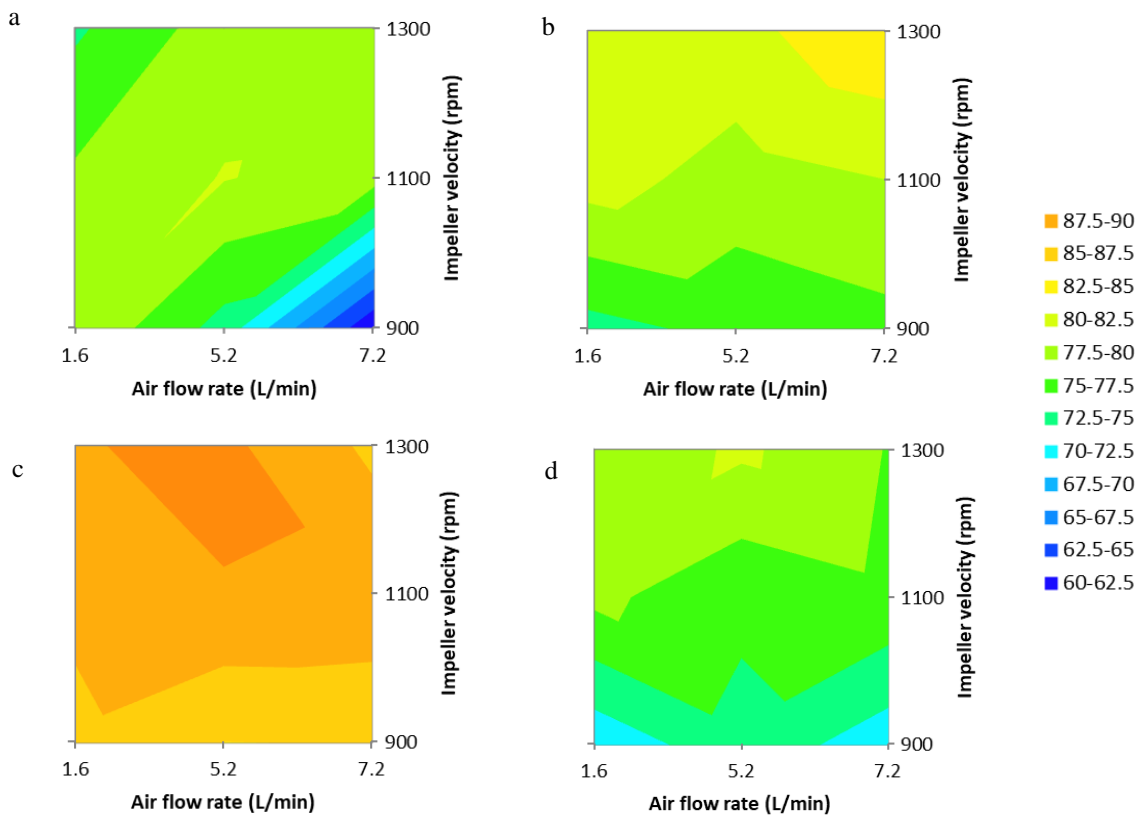


Figura 40 Efectos de la agitación y flujo del aire a la recuperación máxima  
 Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4)

### 6.3.1.2. Eficiencia de separación

En las figuras 41-44 se muestran las eficiencias de separación de cada muestra. Aquí se observa una tendencia común en todas las muestras, que la eficiencia máxima (el punto máximo en cada curva) es la mayor en las líneas verdes (velocidad de impeller de 1300 rpm) y la menor en las curvas azules (velocidad de impeller de 900 rpm). Esta tendencia es clara en las muestras No.2-4, aunque en la muestra No.1 no.

Aparte del valor máximo, el tiempo cuando llega a lo máximo es también distinto depende de la condición. En general 1300 rpm con 7,2 L/min o 5,2 L/min da la máxima eficiencia en el tiempo entre dos y cuatro minutos y después se disminuye mientras las curvas azules (900 rpm) llegan al punto máximo más tarde y no se disminuye tanto.

En la figura 45 se muestran los valores máximos de la eficiencia en los 16 minutos de cada muestra. Aquí hay que notar que los muestreos se hicieron en los tiempos de 1, 2, 4, 8 y 16 minutos y por lo tanto los valores comparados fueron las eficiencias de estos tiempos dispersos.

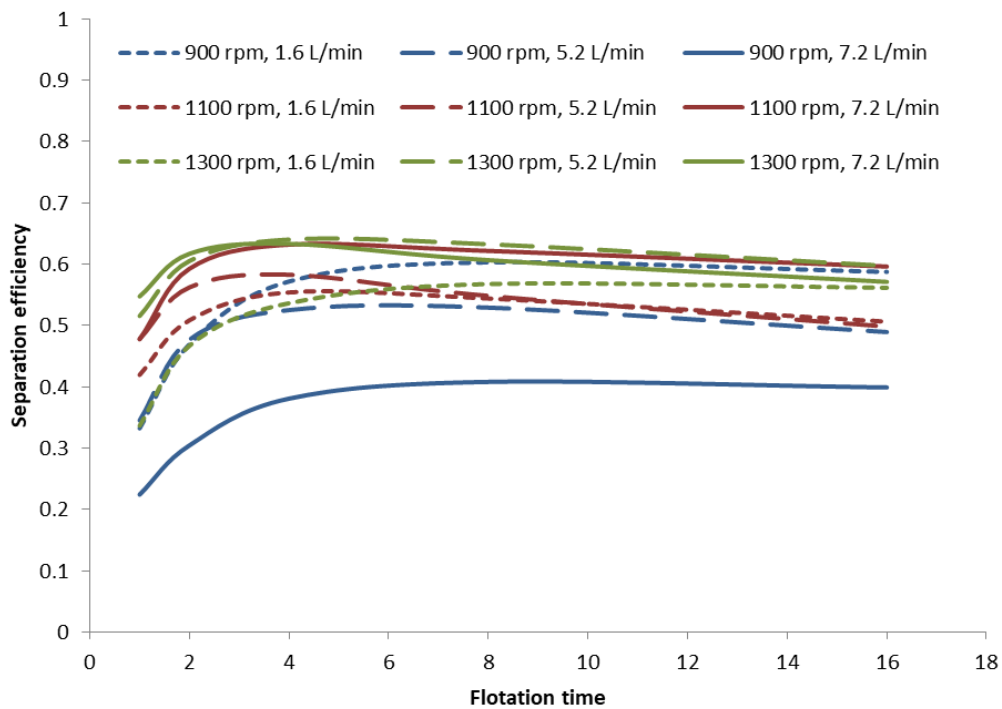


Figura 41 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.1

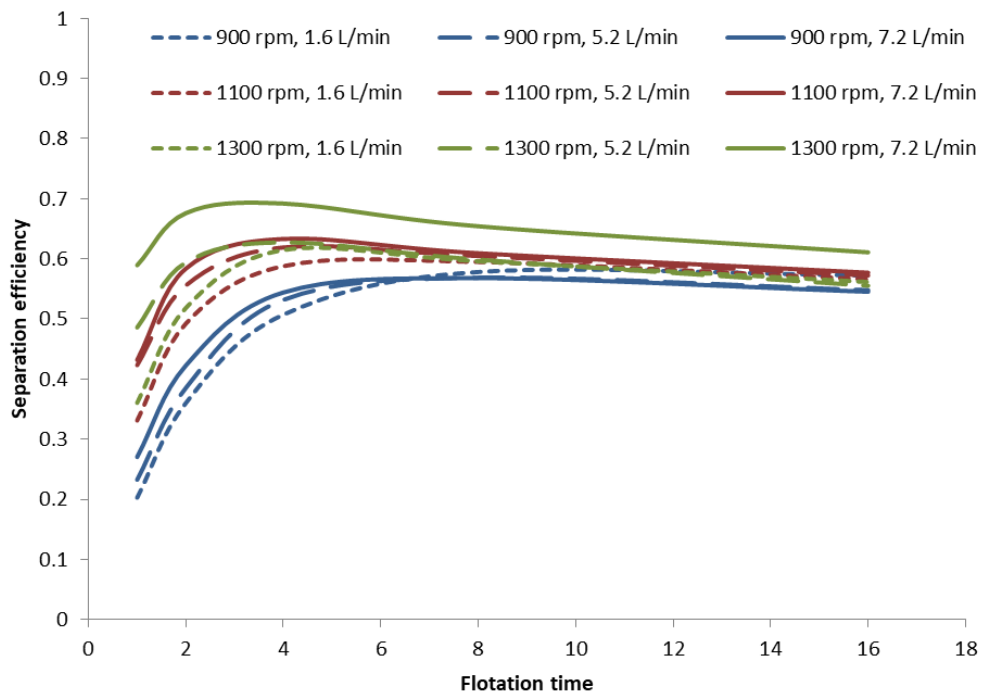


Figura 42 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.2

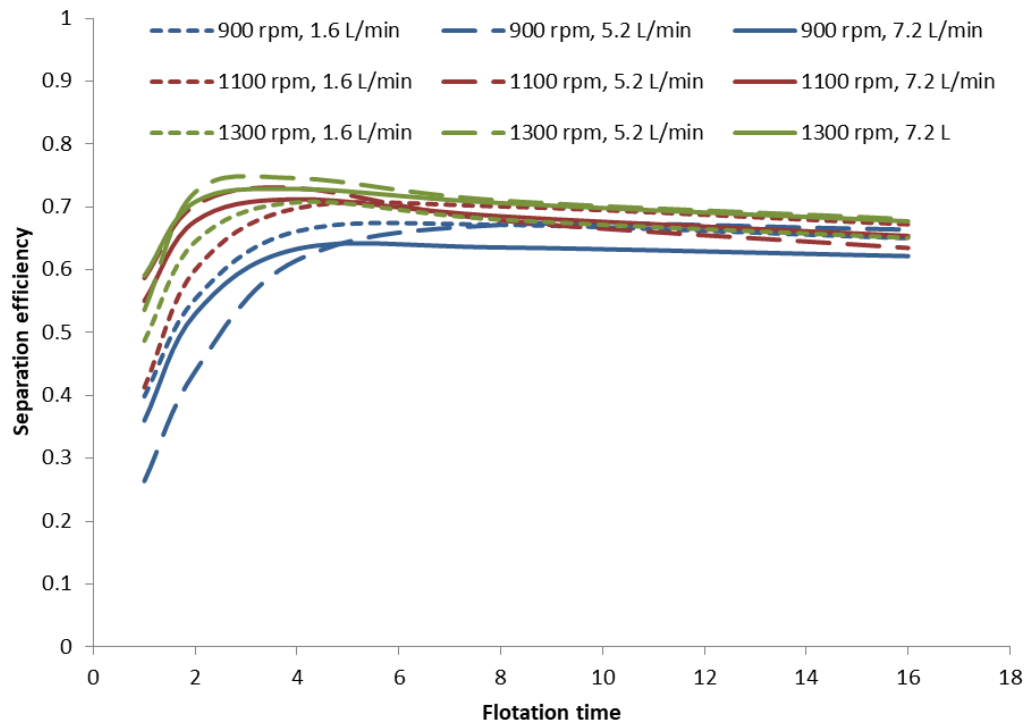


Figura 43 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.3

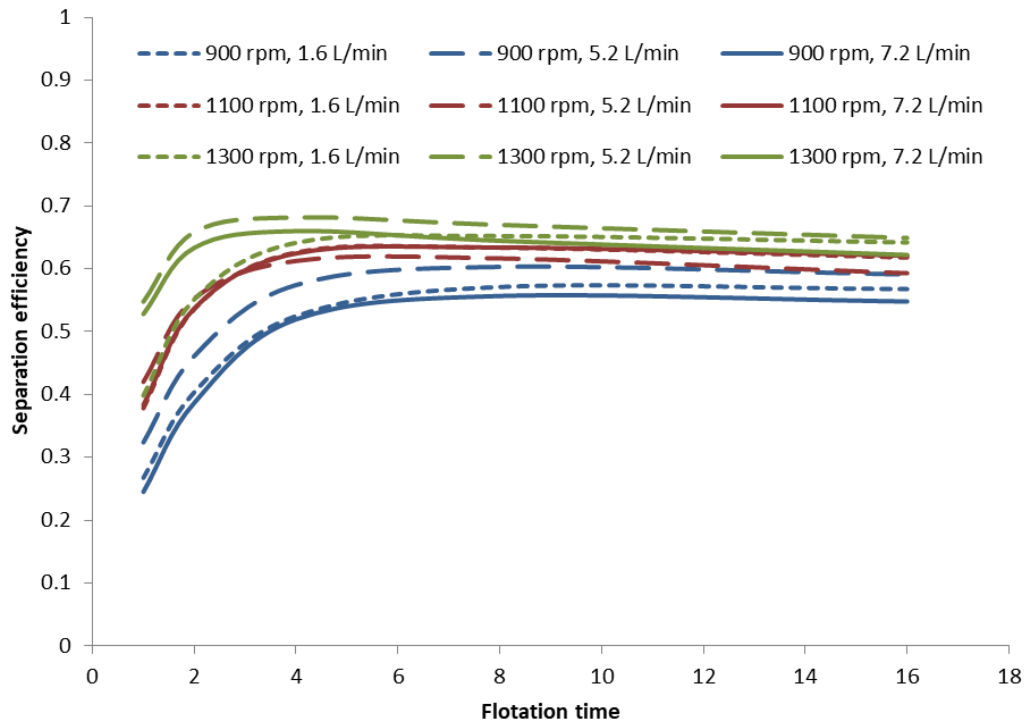


Figura 44 Las curvas de la eficiencia de separación de la muestra No.4

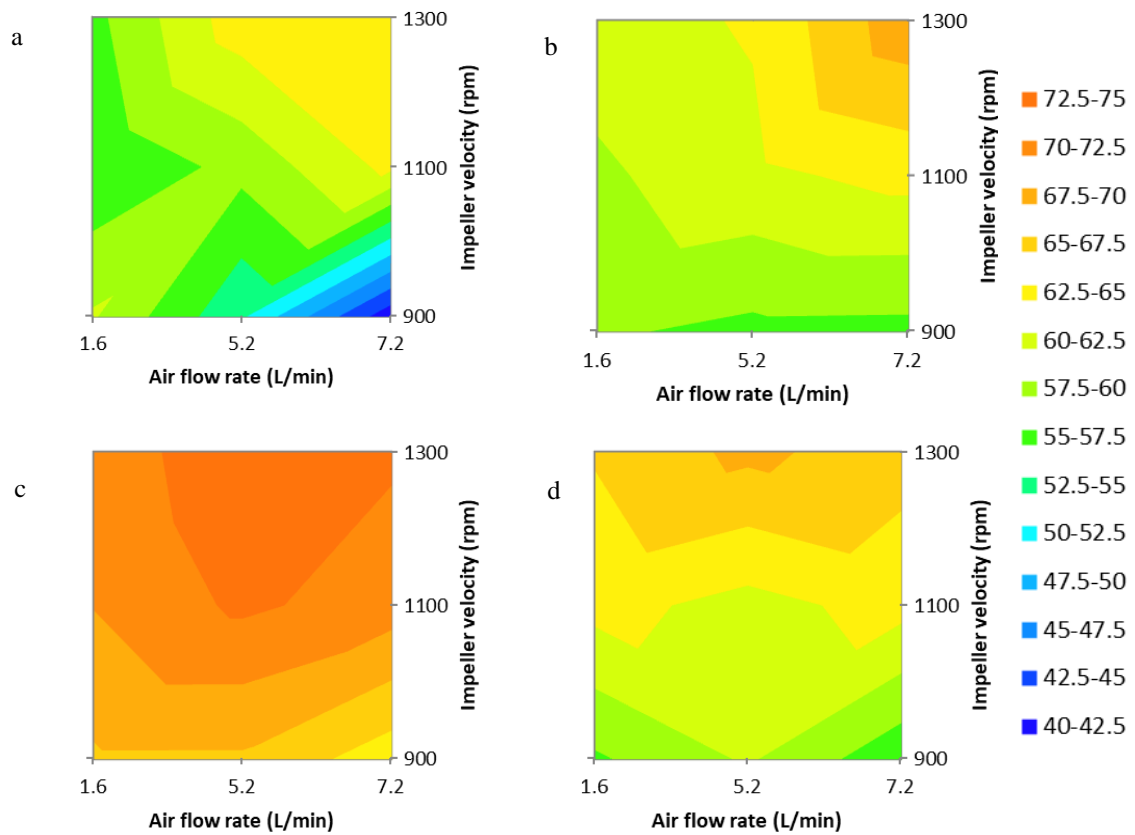


Figura45 Efectos de la agitación y el flujo del aire a la eficiencia de separación  
 Números de muestra (a: No.1, b: No.2, c: No.3, d: No.4)

### 6.3.2. Resultados de análisis por MLA

Como se refirió en el capítulo anterior, se ejecutó una serie de análisis para revelar los comportamientos de los minerales dependiendo de su liberación y tamaño de partículas.

#### 6.3.2.1. Resultados de muestra No.1 por especie mineral

En la figura 46 se muestran las constantes cinéticas calculadas de cada especie mineral en la muestra No.1 por los resultados de MLA. Y en la figura 47 se muestran las recuperaciones máximas. Aquí los resultados de tennantita no está mostrado por su cantidad muy poca ( $< 0.1\%$ ).

Comparando los gráficos de la constante cinética y la recuperación máxima, hay una gran diferencia. En la figura 46 se indica una tendencia común que con mayor agitación y aireación la constante cinética se mejora y además la diferencia (el valor de mejoramiento) es la mayor en la calcosina. En otro lado, en la figura 47 no se observa una tendencia tan clara y el punto que da la mayor recuperación es distinto depende de la especie mineral.

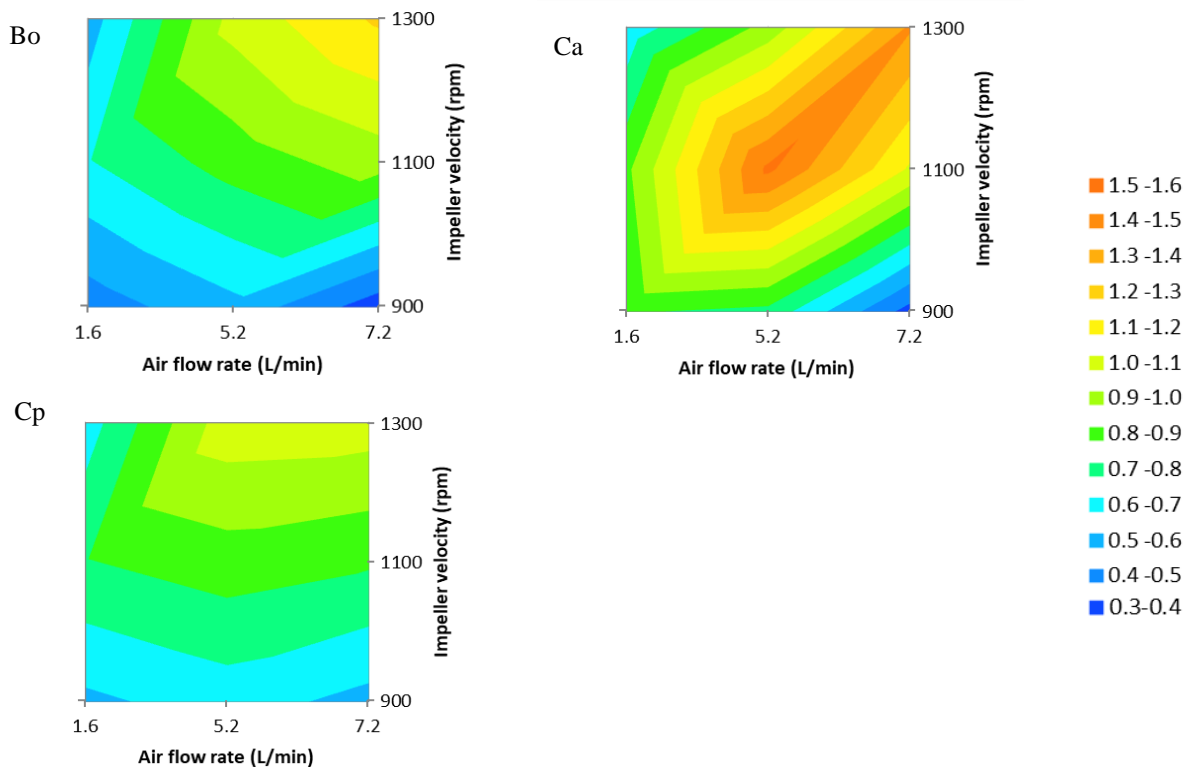


Figura 46 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita)

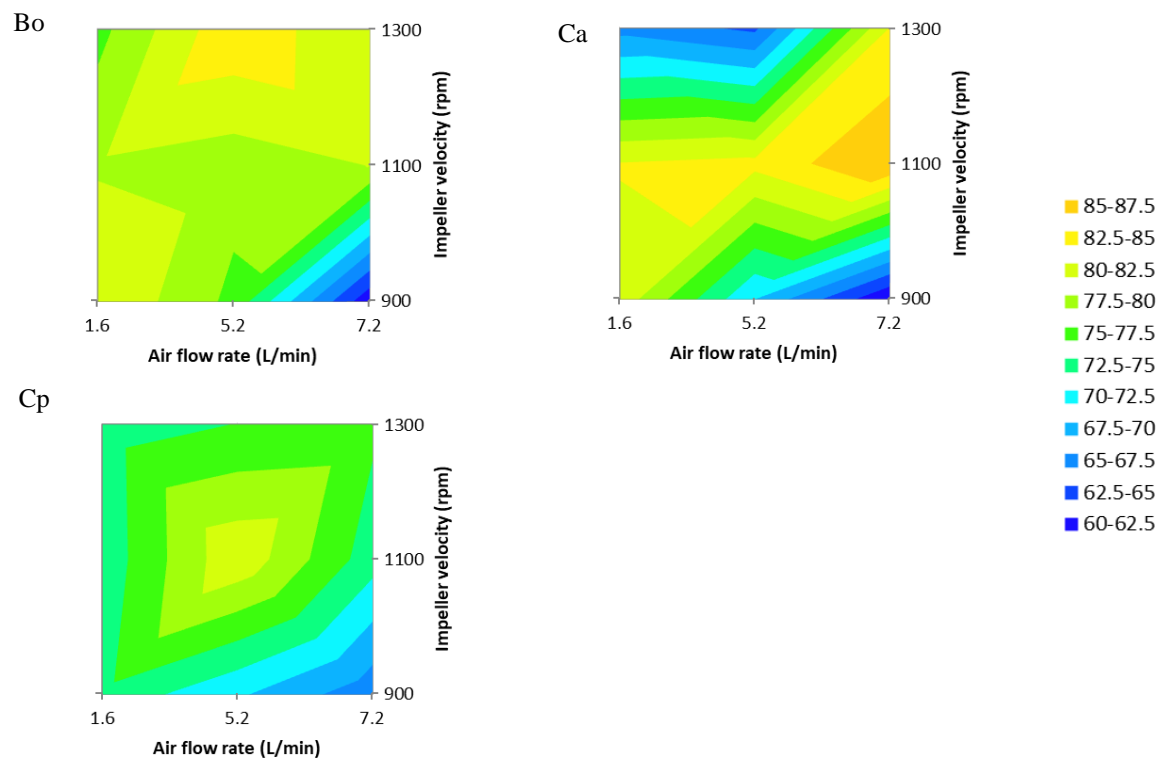


Figura 47 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita)

### 6.3.2.2. Resultados de muestra No.1 (minerales en las partículas de $-4,7 \mu\text{m}$ )

En las figuras 48-51 se muestran las constantes cinéticas y las recuperaciones máximas de minerales de cobre liberados en las partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.1. Aquí “liberado” significa que más que 70 % de la superficie de la partícula es del mineral de cobre. Comparando los gráficos se nota la diferencia entre la constante cinética y la recuperación máxima y entre las especies minerales. Aquí las mismas tendencias son mostradas; que la constante cinética es la mayor en la condición de 1300 rpm y 7,2 L/min mientras la recuperación máxima en la de 1100 rpm y 5,2 L/min y que la calcosina se flota más rápido que las otras especies. Comparando la figura 39-(a) y la 48 la constante cinética de partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) es más baja que la global. Esto muestra la dificultad de flotación de las partículas pequeñas. Mirando la recuperación máxima (figura 51) la condición mejor no es cerca del punto de 1100 rpm con 5,2 L/min en vez de la máxima agitación con la máxima aireación.

Se nota que el aumento de la constante cinética por el aumento de la agitación y aireación es aparente y mayor que lo del capítulo 6.3.2.4. y eso significa que el incremento de los dos parámetros son eficientes para mejorar la recuperación. Las tendencias de las constantes cinéticas de las especie de minerales son similares excepto la de la calcosina. Esta diferencia puede ser por la cantidad poca de la especie. Mirando las recuperaciones, no son tan altas considerando su liberación.

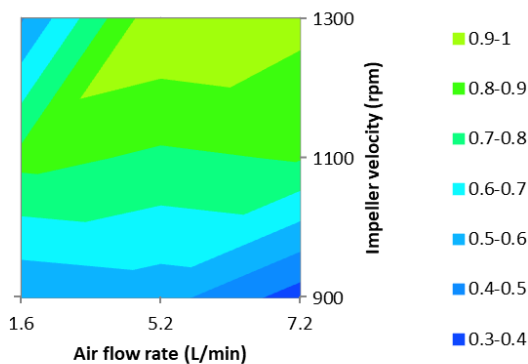


Figura 48 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.1)

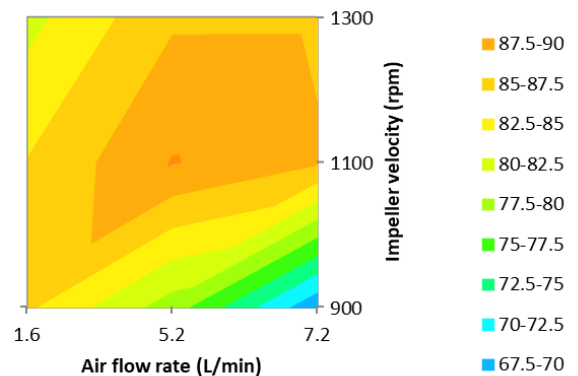


Figura 49 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.1)



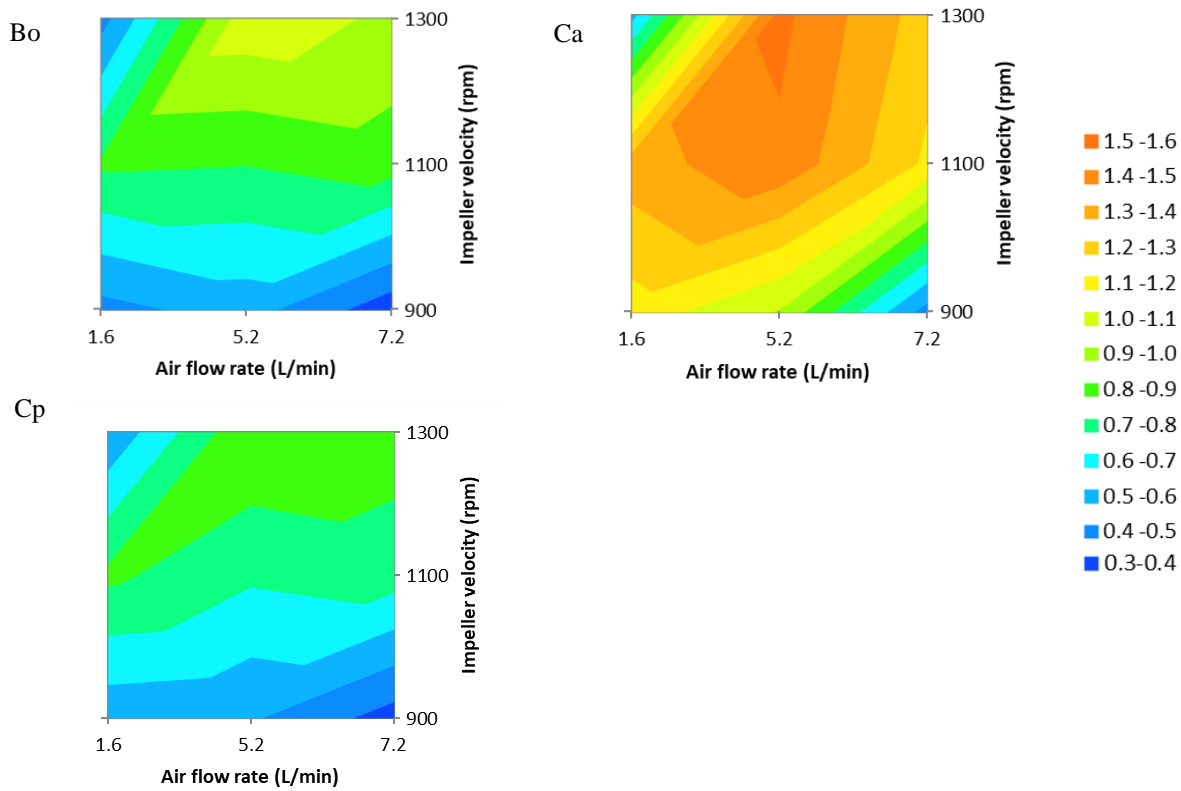


Figura 50 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita)

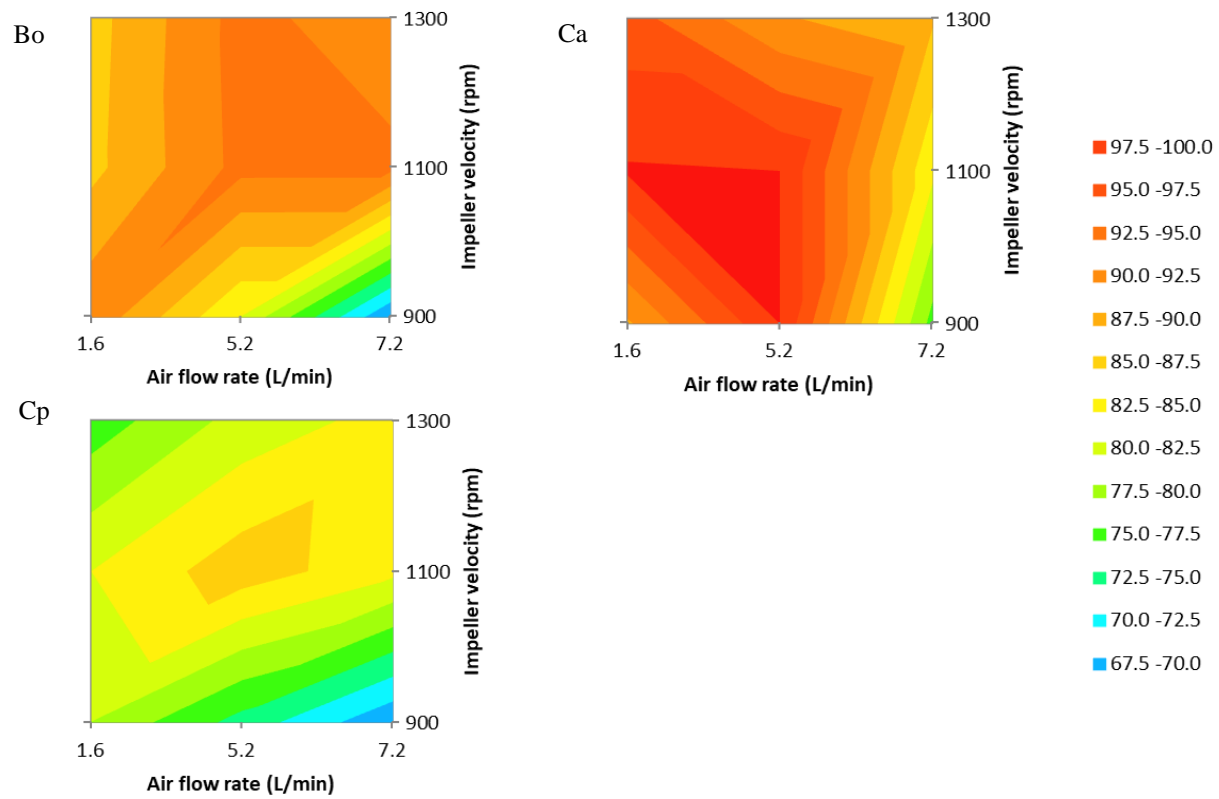


Figura 51 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.2.3. Resultados de muestra No.1 (minerales en las partículas de 4,7 a 18,8 $\mu\text{m}$ )

En las figuras 52-55 se muestran los resultados de los minerales de cobre liberados en las partículas finas ( $-18,8+4,7 \mu\text{m}$ ). La definición de “liberado” es lo mismo que la parte anterior.

La diferencia más grande entre las partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) es el valor de la recuperación. Este rango de tamaño de partículas ( $-18,8+4,7 \mu\text{m}$ ) no son tan difícil de flotar como las partículas más finas. Además el mejoramiento de cinéticas por el aumento de agitación y aireación es más grande en las partículas de  $-18,8+4,7 \mu\text{m}$ .

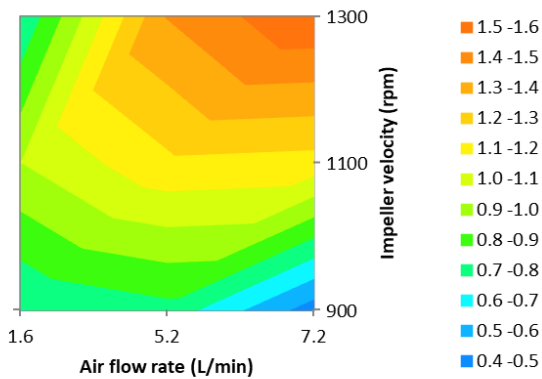


Figura52 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.1)

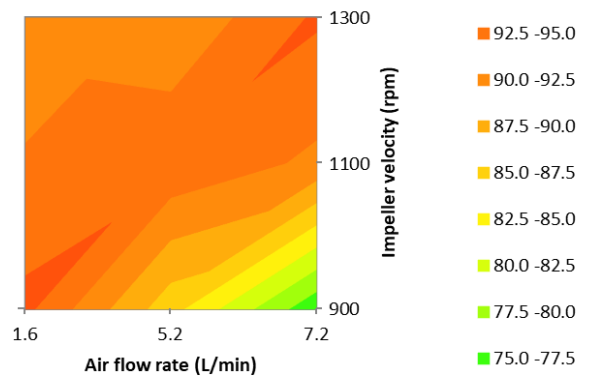


Figura53 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.1)

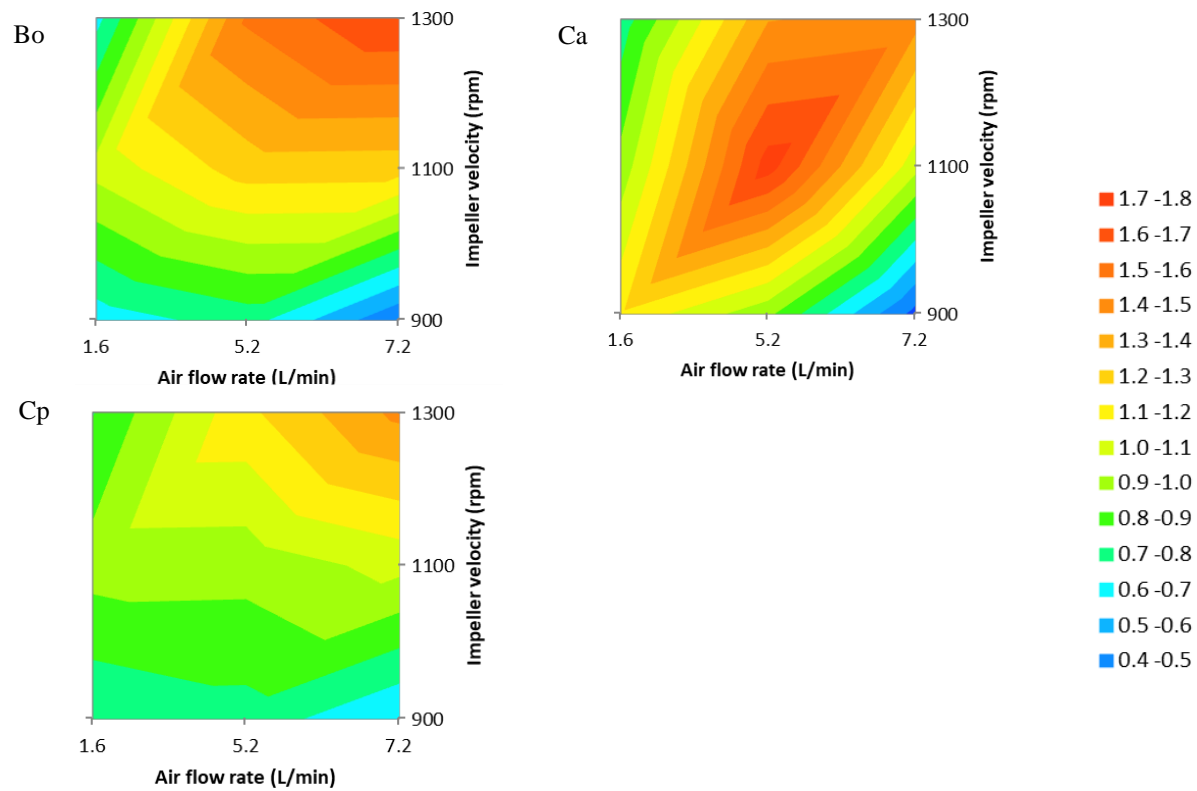


Figura 54 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita)

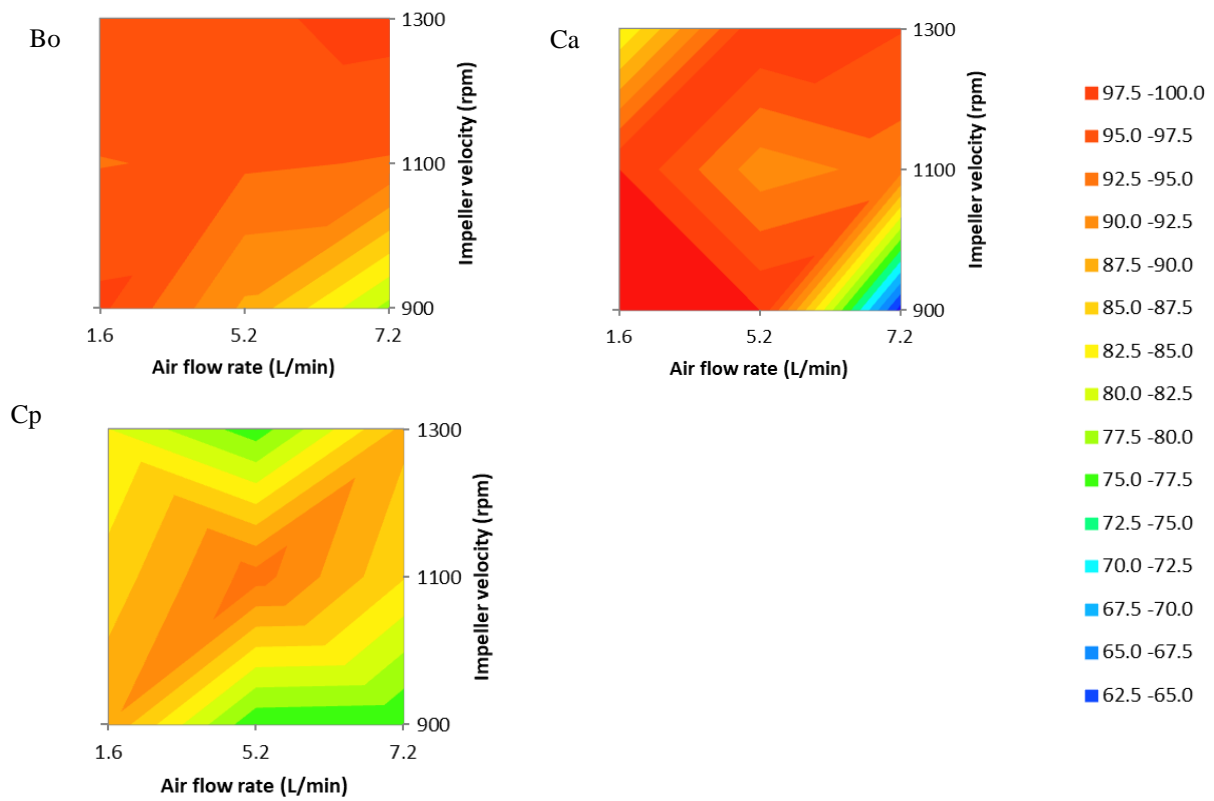


Figura 55 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.1 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita)

### 6.3.2.4. Resultados de muestra No.2 por especie mineral

En la figura 56 se muestran las constantes cinéticas calculadas de cada especie mineral en la muestra No.2 por los resultados de MLA. Aquí se eliminaron los datos de calcosina por la escasez. Se observan unas tendencias interesantes:

- Las constantes se aumentan con el incremento del flujo de aire y la velocidad de agitación.
- Comparando los efectos del aire y agitación, sobreaireación no mejora mucho la cinética, mientras sobreagitación la mejora un poco.
- Tennantita se suele flotar un poco más rápido que las otras especies.

Las primeras dos son las tendencias similares a los resultados del capítulo anterior, pero la última es una nueva, que se encontró por MLA.

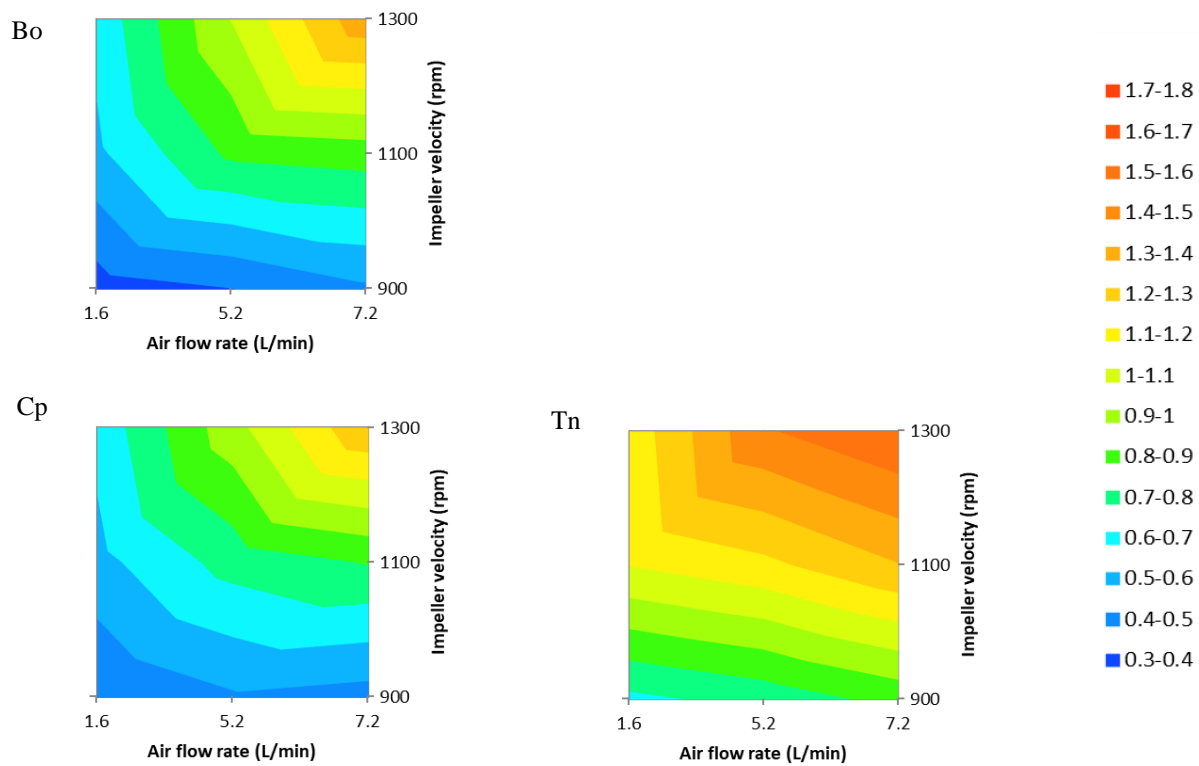


Figura 56 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

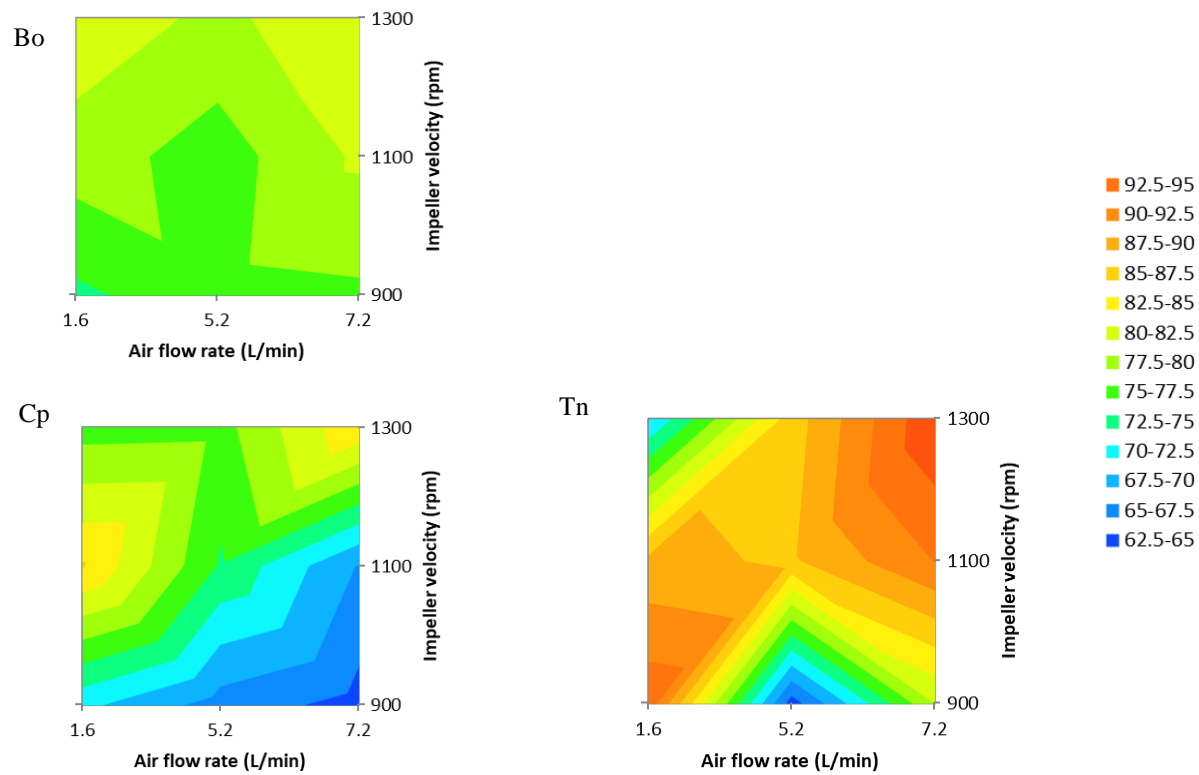


Figura 57 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

En la figura 57 se muestran las recuperaciones máximas de especies minerales en la muestra No.2. Es difícil encontrar una tendencia clara pero cada mineral tiene su comportamiento distinto.

Bornita se flota más rápido con la mayor agitación mientras tennantita y calcopirita no muestra tendencias aparentes. Comparando los valores, las recuperaciones de tennantita son mayores que bornita y calcopirita.

### 6.3.2.5. Resultados de muestra No.2 (minerales en las partículas de $-4,7 \mu\text{m}$ )

En las figuras 58-61 se muestran las constantes cinéticas y las recuperaciones máximas de minerales de cobre liberados en las partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No. 2. Aquí “liberado” significa que más que 70 % de la superficie de la partícula es del mineral. Se nota que el aumento de la constante cinética por el aumento de la agitación y aireación es aparente y mayor que lo del capítulo 6.3.2.4. y eso significa que el incremento de los dos parámetros son eficientes para mejorar la recuperación. Las tendencias de las constantes cinéticas de las especie de minerales son similares. Mirando las recuperaciones, no son tan altas considerando su liberación. Esto muestra la dificultad de flotación de las partículas pequeñas.

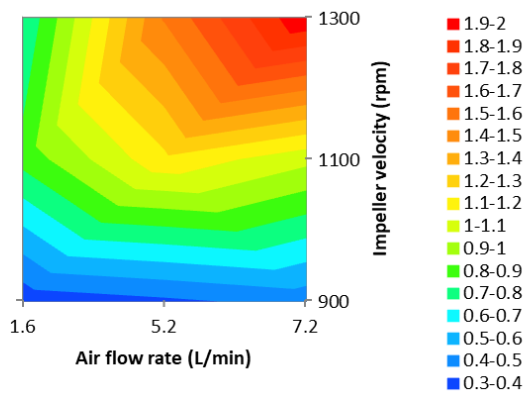


Figura58 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.2)

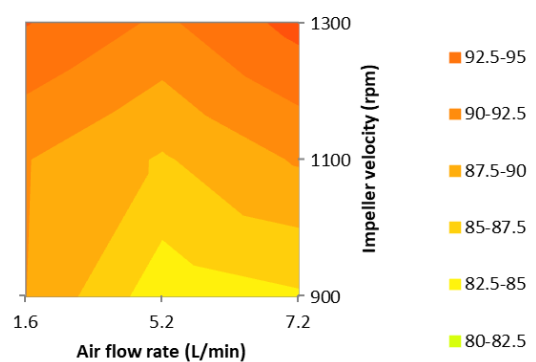


Figura59 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.2)



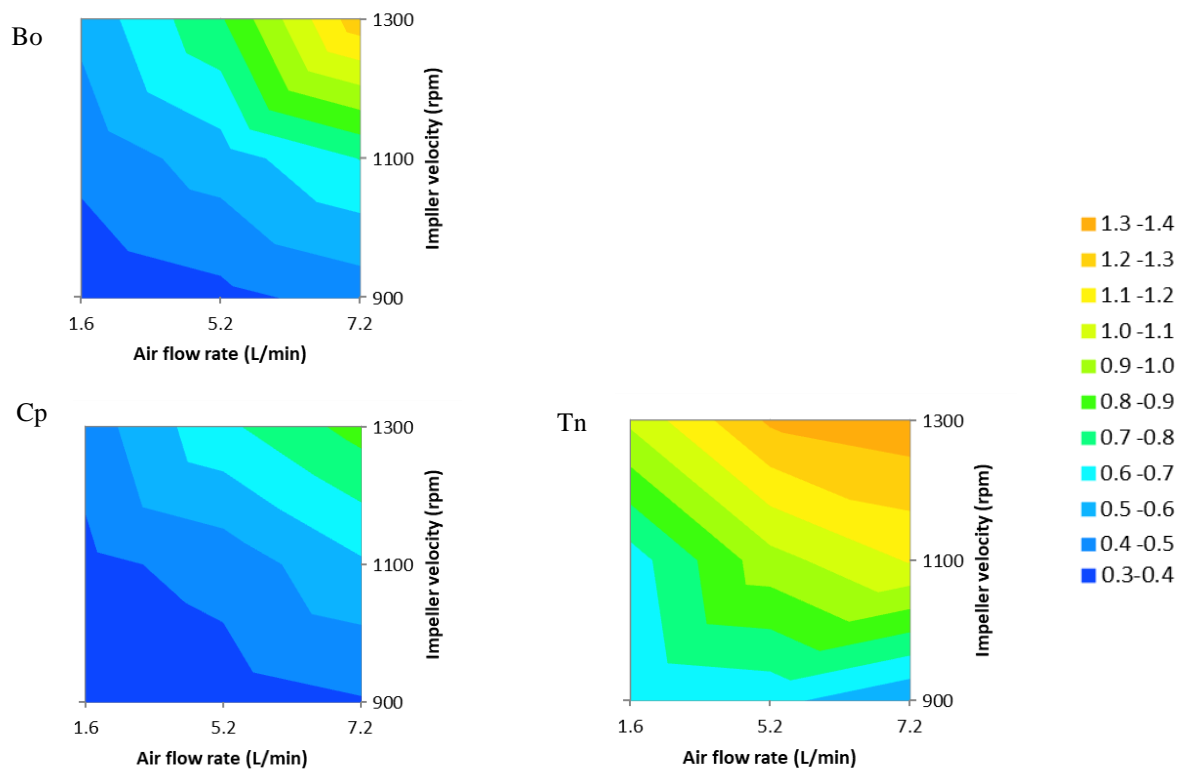


Figura 60 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

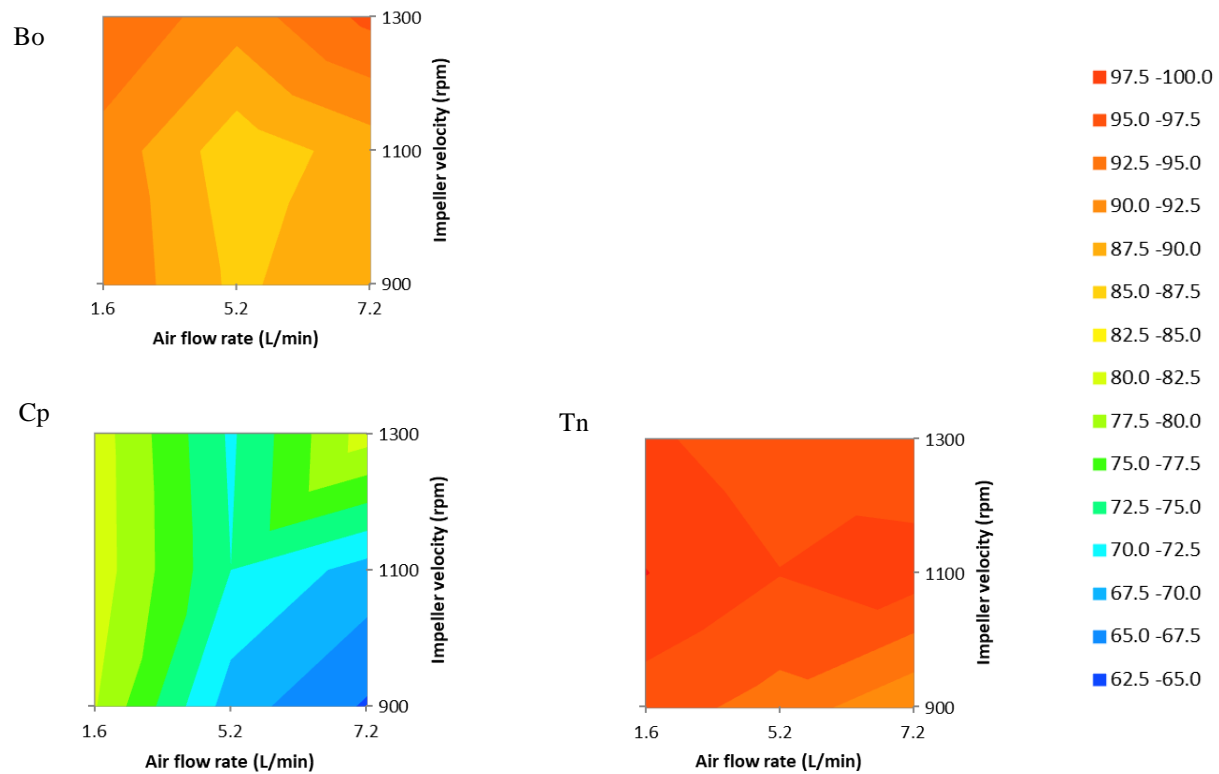


Figura 61 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.2.6. Resultados de muestra No.2 (minerales en las partículas de 4,7 a 18,8 $\mu\text{m}$ )

En las figuras 62-65 se muestran los resultados de los minerales de cobre liberados en las partículas finas ( $-18,8 +4,7 \mu\text{m}$ ). La definición de “liberado” es lo mismo que la parte anterior. Mirando la figura 62 el mejoramiento de la constante cinética global no es tanto como las partículas de menos de 4,7 micrones. En otro lado los valores de recuperación máxima es significamente mayor. Este hecho significa que las partículas muy finas se flotan lento y poco. Desde el punto de vista del efecto de la agitación y aireación, se muestran las tendencias similares. Para la constante cinética el aumento de la agitación afecta más que el aumento de la aireación, pero el mejor resultado se obtiene cuando ambos parámetros se aumentan. Sobre las recuperaciones máximas estos parámetros no afectan tanto como para las partículas más finas. Se considera que esto es por la alta flotabilidad de las partículas de esta fracción de tamaño incluso con poca espumación.

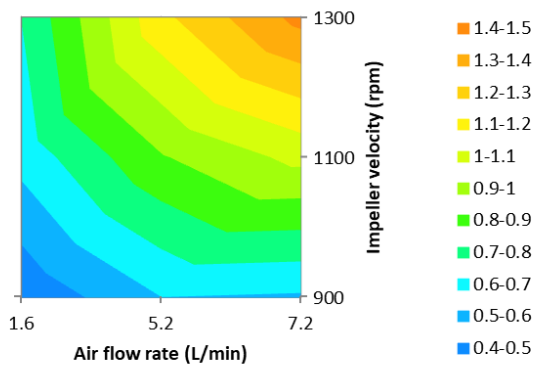


Figura62 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.2)

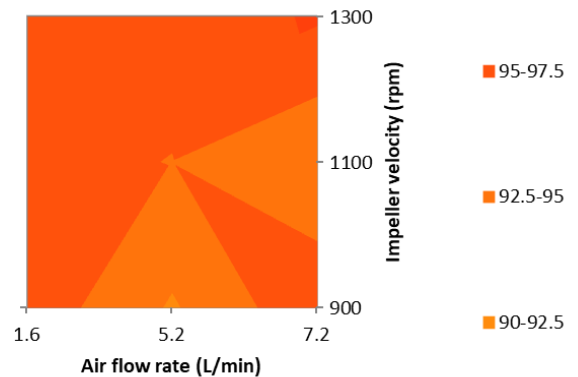


Figura63 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.2)

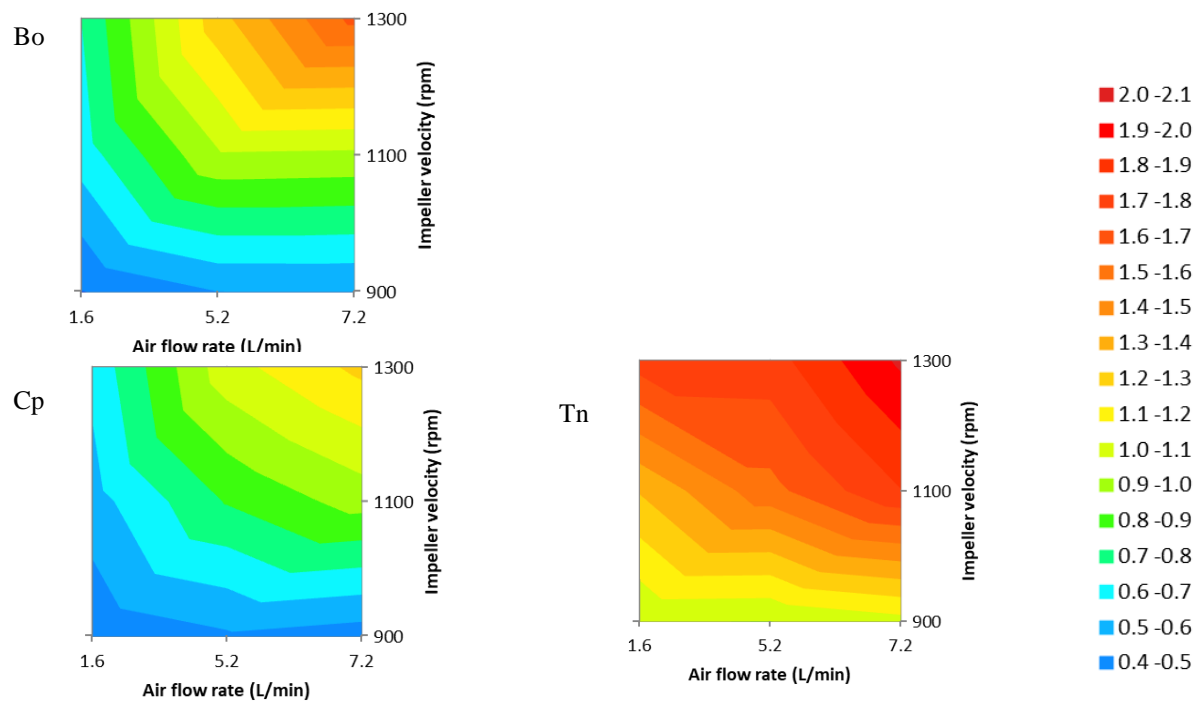


Figura 64 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

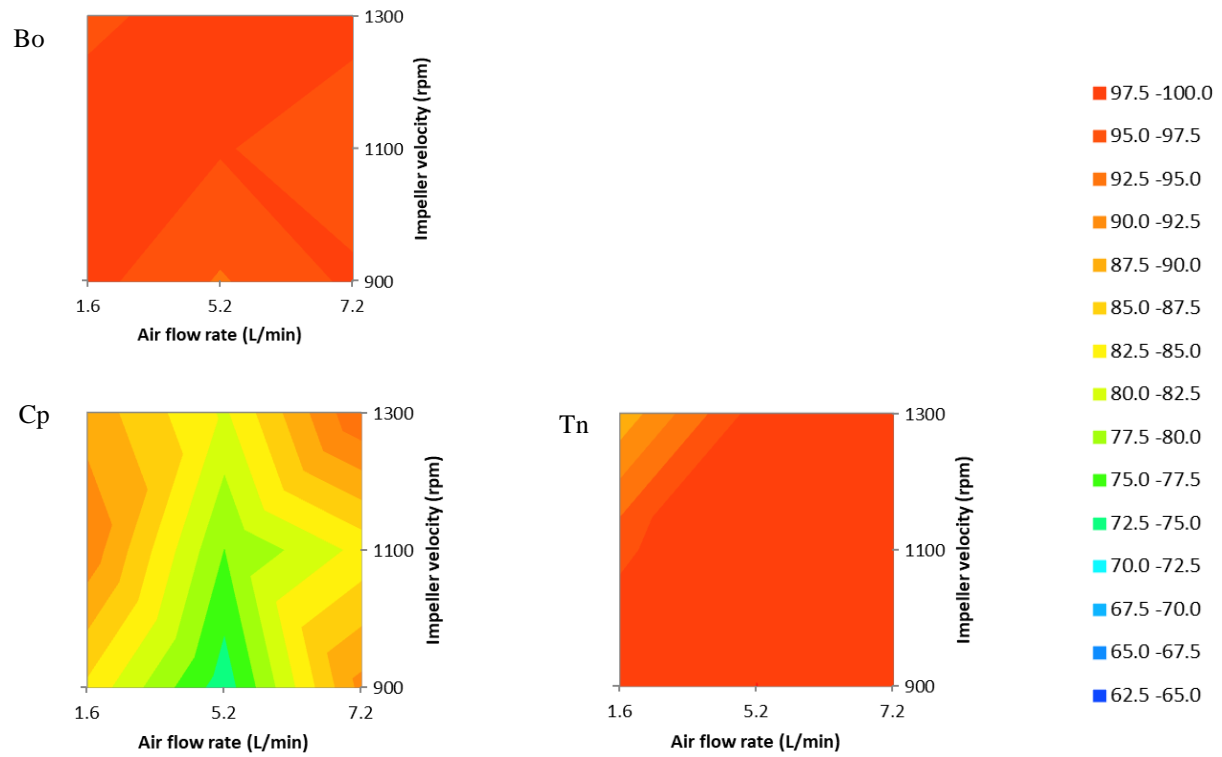


Figura 65 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.2 (Bo: bornita, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.2.7. Resultados de muestra No.3 por especie mineral

En la figura 66 se muestran las constantes cinéticas de cada especie mineral en la muestra No.3. En general se observa la misma tendencia que la muestra 2. El aumento de ambas condiciones aumenta las constantes cinéticas y comparando los efectos de ambos parámetros la velocidad de agitación es más importante. En otra palabra, sobreaireación no provee el mejoramiento de la velocidad de flotación. La diferencia entre estos resultados y los de la muestra 2 es la relación entre las especies minerales. En la muestra 2 el mineral que se flota más rápido es calcosina, pero en la muestra 3 es la tennantita. Sin embargo, la tendencia que la calcosina y la tennantita se flotan más rápido que bornita, y la calcopirita más lento se observa en la muestra 3 también.

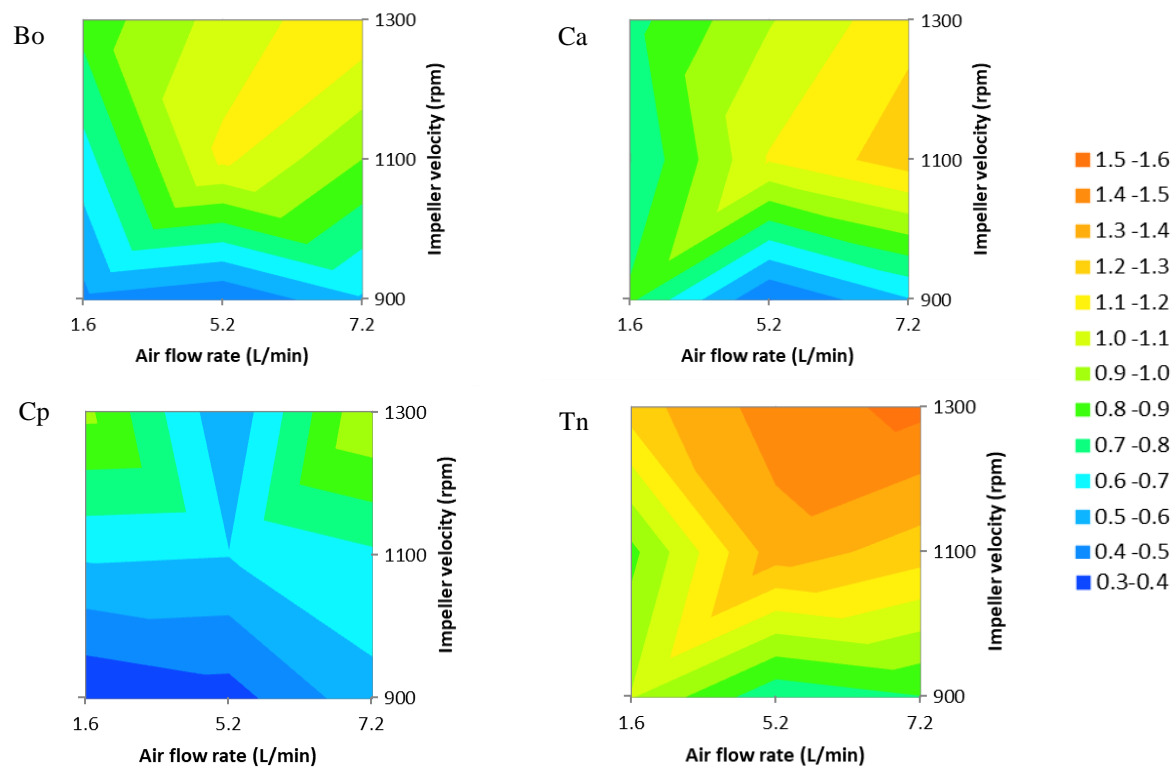


Figura66 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.3  
 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

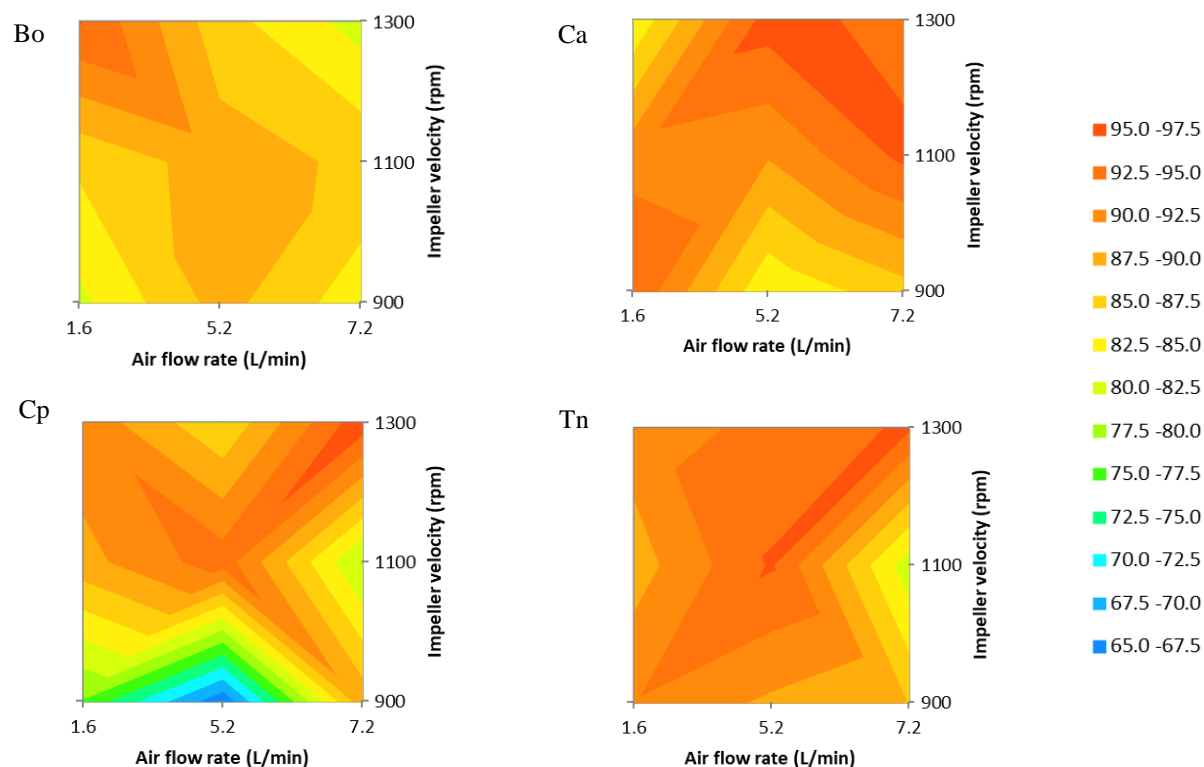


Figura 67 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.3  
(Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

En la figura 67 se muestran las recuperaciones máximas de especies minerales en la muestra 3. Se nota que en todos minerales las recuperaciones suelen ser más altas que las de la muestra 2. Y además con el aumento de la velocidad de agitación la recuperación se aumenta mientras el efecto del aumento de la aireación no es tan claro. Comparando las especies minerales las recuperaciones máximas no difieren mucho.



### 6.3.2.8. Resultados de muestra No.3 (minerales en las partículas de $-4,7 \mu\text{m}$ )

En las figuras 68-71 se muestran las constantes cinéticas y las recuperaciones máximas de minerales de cobre liberados en las partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra 3. En la figura 68 se observa claramente la tendencia que el aumento de la velocidad de agitación y el flujo del aire mejora la velocidad de flotación. Pero lo importante es el equilibrio de los dos parámetros y especialmente la sobre aireación no da mejoramiento de las constantes. Viendo las recuperaciones máximas se observa la misma tendencia sobre el efecto de las velocidades de agitación y el flujo del aire. Sobre la diferencia entre las especies minerales, la calcosina y la tennantita se flotan rápido y el mineral que se flota más lento es la calcopirita. Este es lo mismo que la muestra 2. Y además las recuperaciones máximas a veces llegan a menos que 70 %. Se observa el hecho que as partículas muy finas son difíciles de flotar.

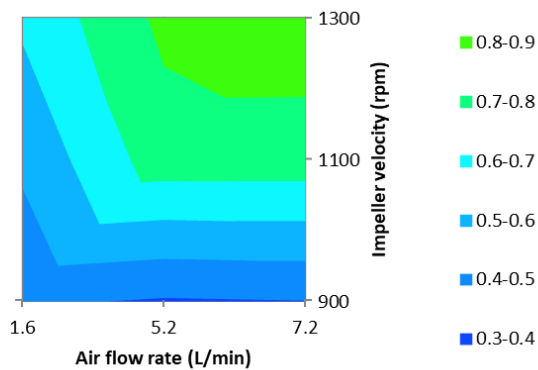


Figura68 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.3)

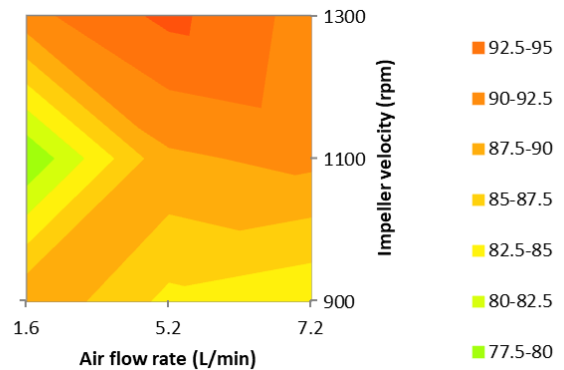


Figura69 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.3)

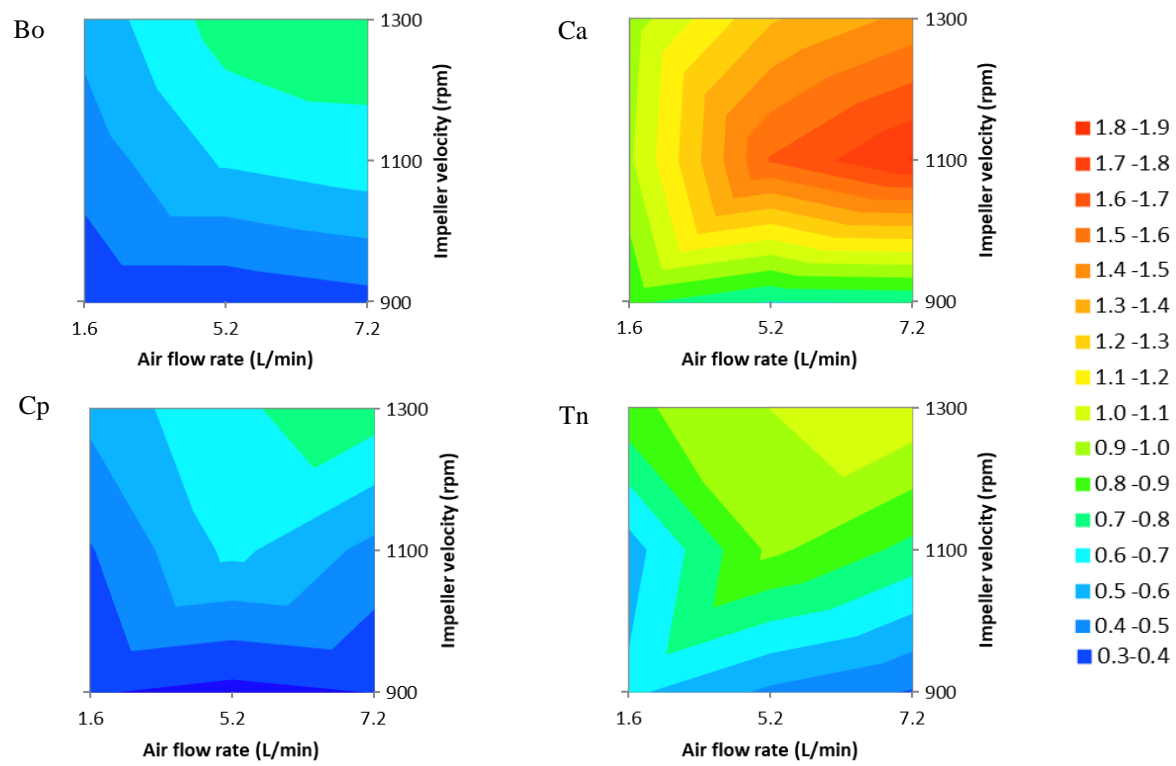


Figura 70 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

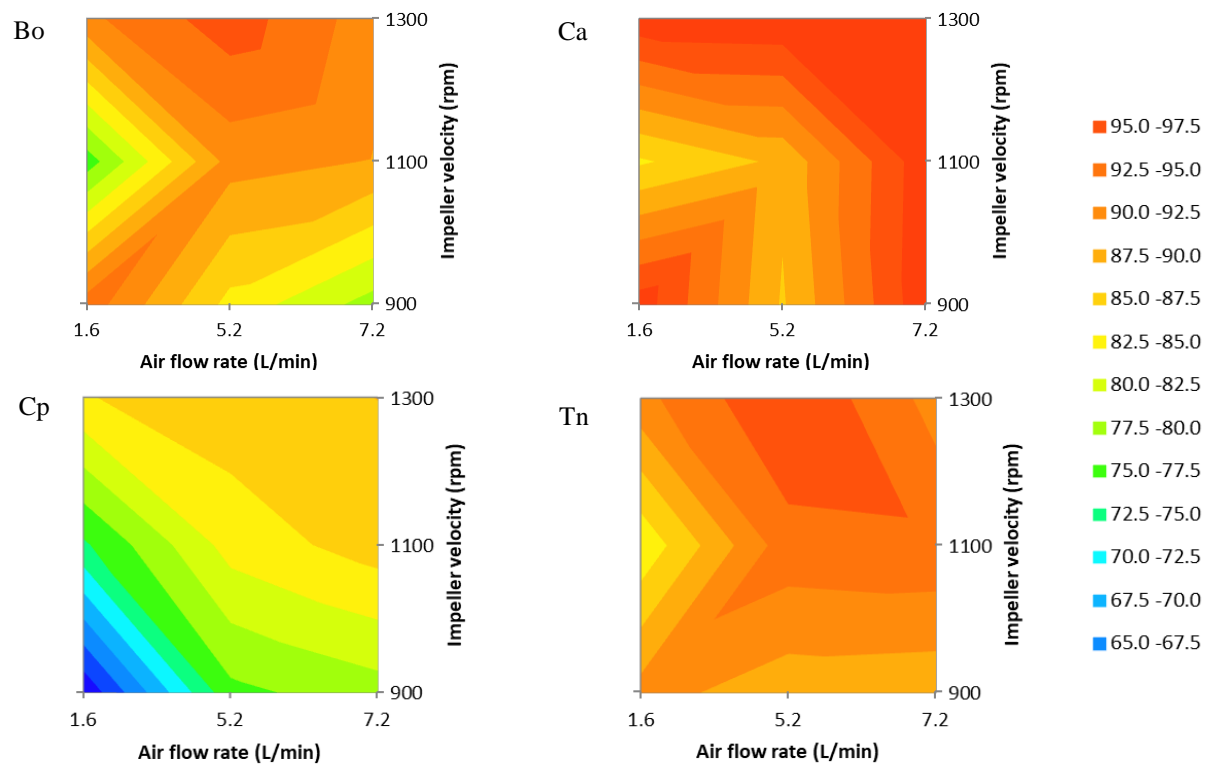


Figura 71 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.2.9. Resultados de muestra No.3 (minerales en las partículas de 4,7 a 18,8 $\mu\text{m}$ )

En las figuras 72-75 se muestran los resultados de los minerales de cobre liberados en las partículas finas ( $-18,8 +4,7 \mu\text{m}$ ). Sobre las recuperaciones máximas no se aumentan tanto como la parte anterior (las partículas más finas) y los valores son más altos. Esta tendencia se observa en la muestra 2.

Sobre las constantes cinéticas, el aumento por agitación y aireación es mayor que las partículas más finas. Este es diferente que la muestra 2. Además, en la muestra 2 por el escaso del contenido, los valores de calcosina suelen ser inestable. Pero en esta muestra la proporción de calcosina es mayor y se obtuvo el resultado estable. Comparando los resultados de cada especie, la calcopirita es más lento de flotar como en los otros capítulos.

Sobre los efectos de las variables, la misma tendencia se observa. Es decir, el equilibrio es importante, sobreagitación funciona un poco y sobreaireación no resulta mucho.

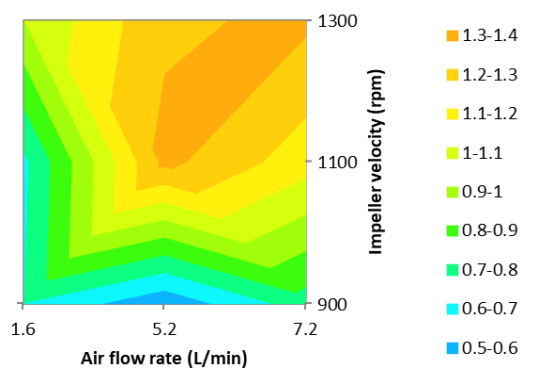


Figura72 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.3)

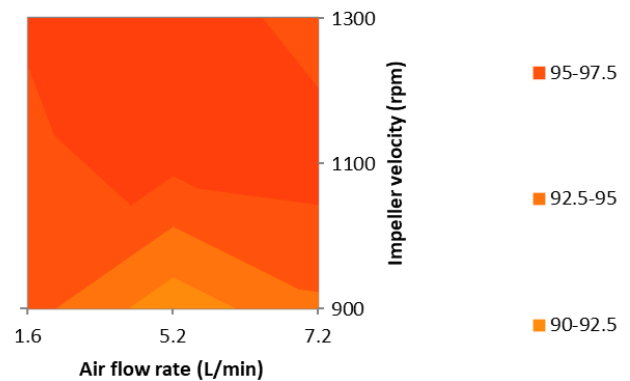


Figura73 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ , muestra No.3)

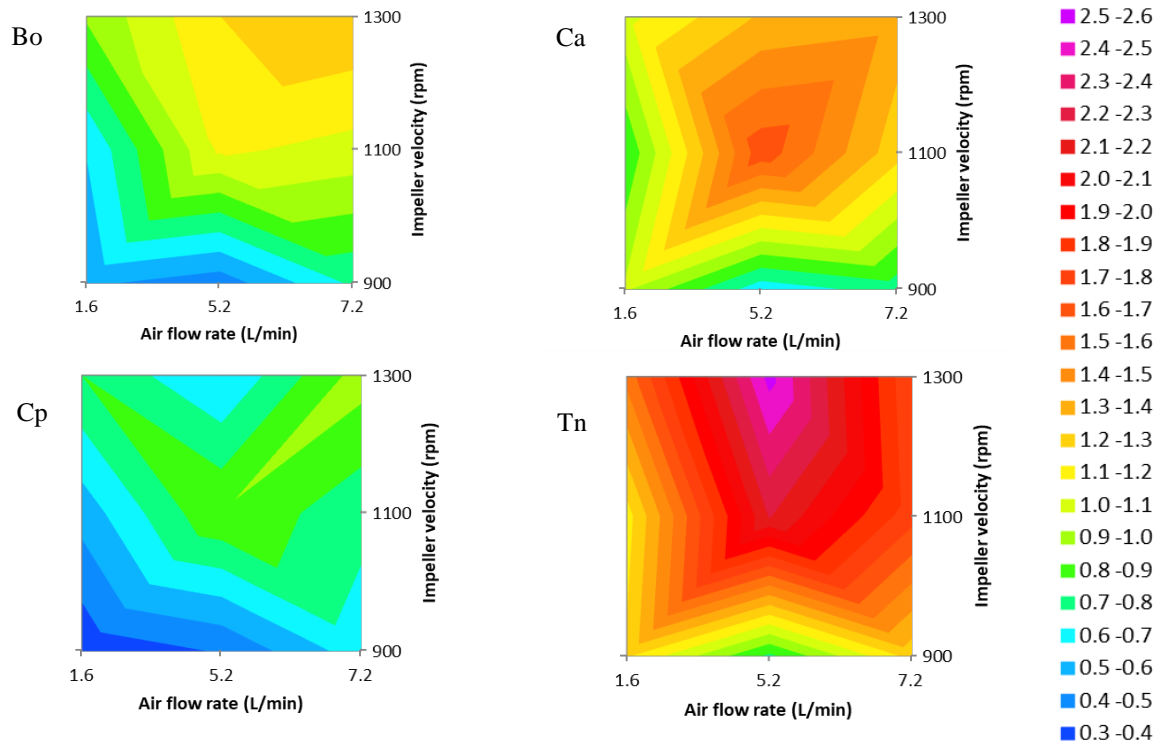


Figura 74 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

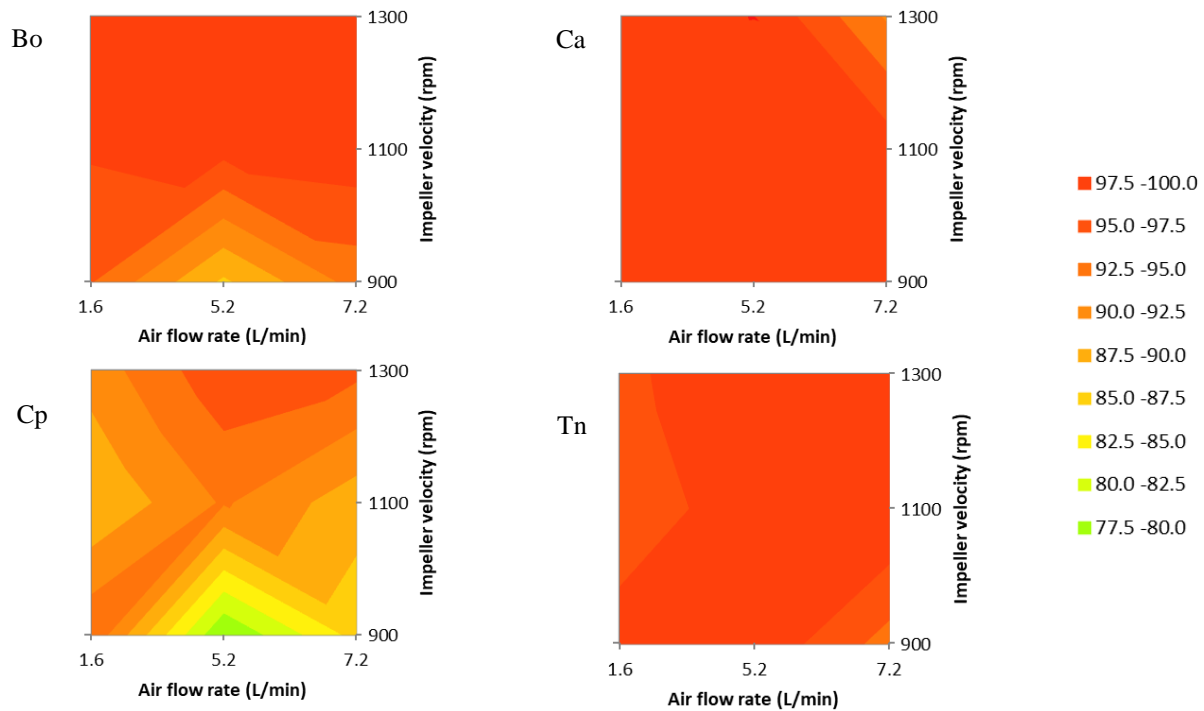


Figura 75 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.3 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

#### 6.3.2.10. Resultados de muestra No.4 por especie mineral

En la figura 76 se muestran las constantes cinéticas de cada especie mineral en la muestra No.4. Y en la figura 77 se muestran las recuperaciones máximas de especies minerales en la muestra No.4.

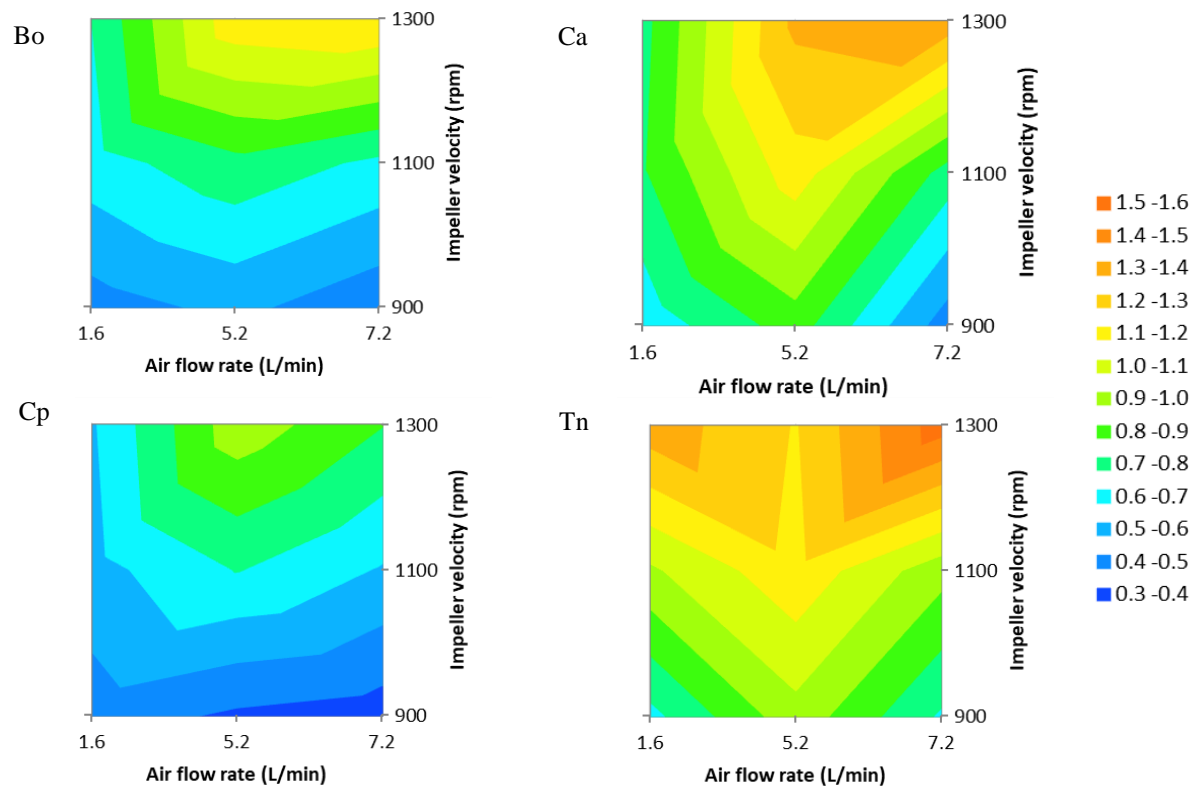


Figura 76 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética en muestra No.4  
(Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

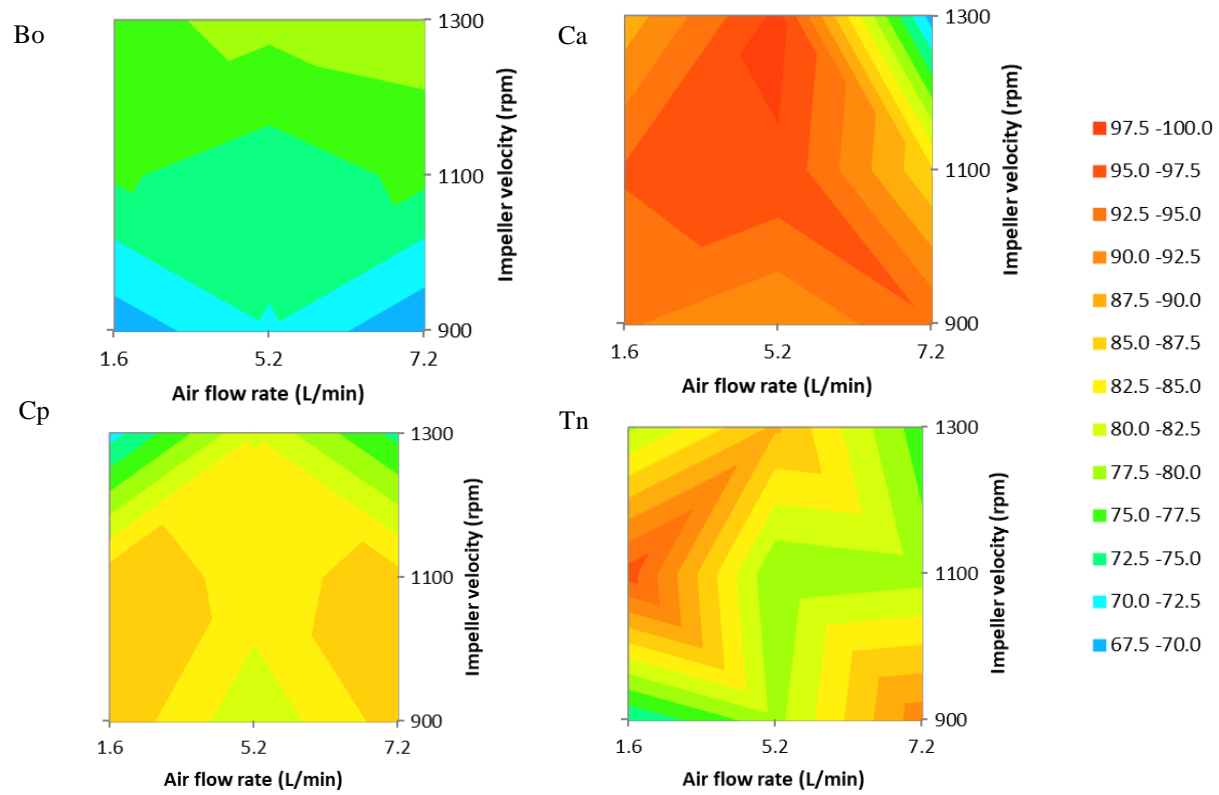


Figura 77 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima en muestra No.4  
 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)



6.3.2.11. Resultados de muestra No.4 (minerales en las partículas de  $-4,7 \mu\text{m}$ )

En las figuras 78-81 se muestran las constantes cinéticas y las recuperaciones máximas de minerales de cobre liberados en las partículas muy finas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.4. Comparando los gráficos de figura 78 y 79 con las otras muestras el rango del valor de la recuperación máxima no difiere mucho pero la constante cinética es un poco más baja. Y además no se mejora mucho por la agitación y aireación. Sobre la constante cinética y la recuperación máxima, el orden ente las especies minerales es lo mismo que las otras muestras, que es calcosina, tennantita, bornita y calcopirita.

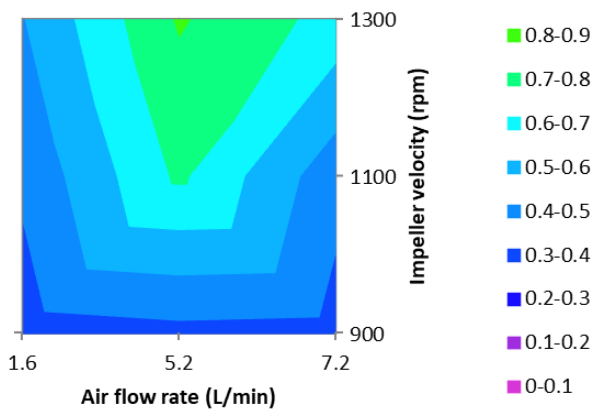


Figura78 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.4)

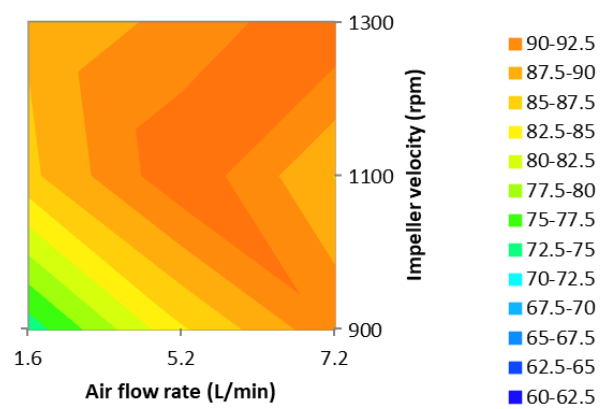


Figura79 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ , muestra No.4)

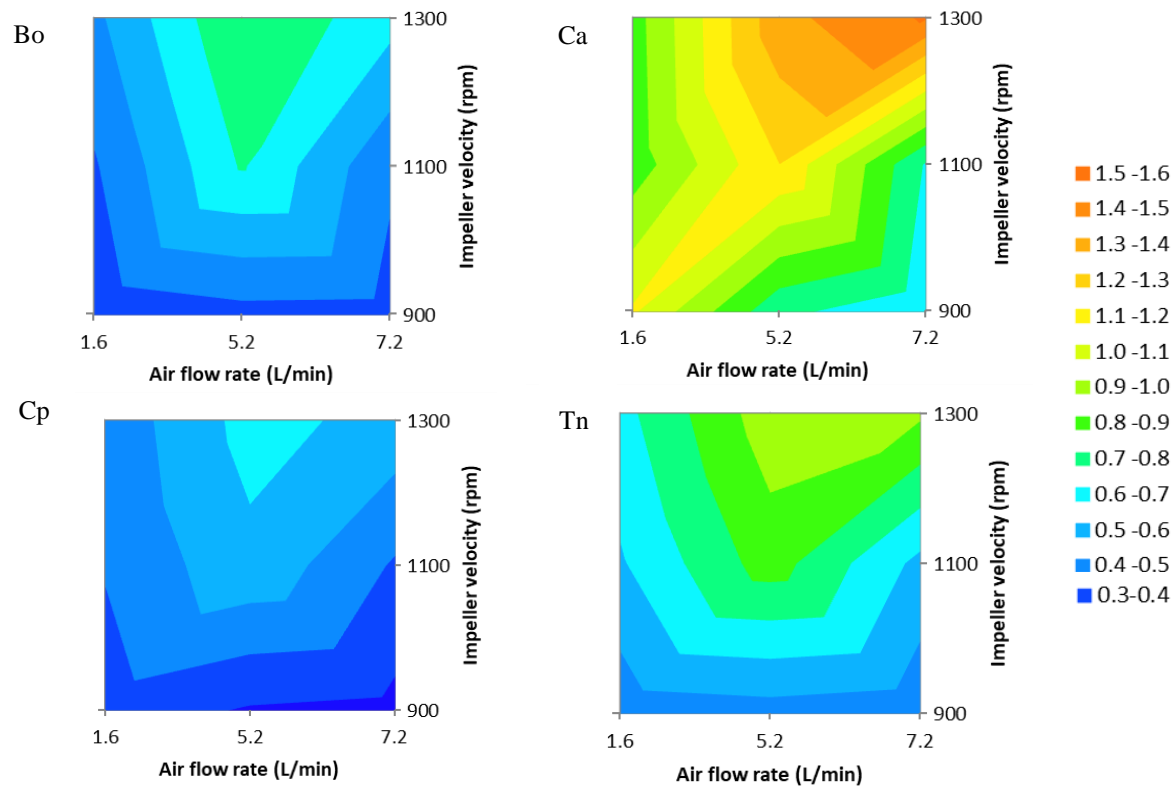


Figura 80 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

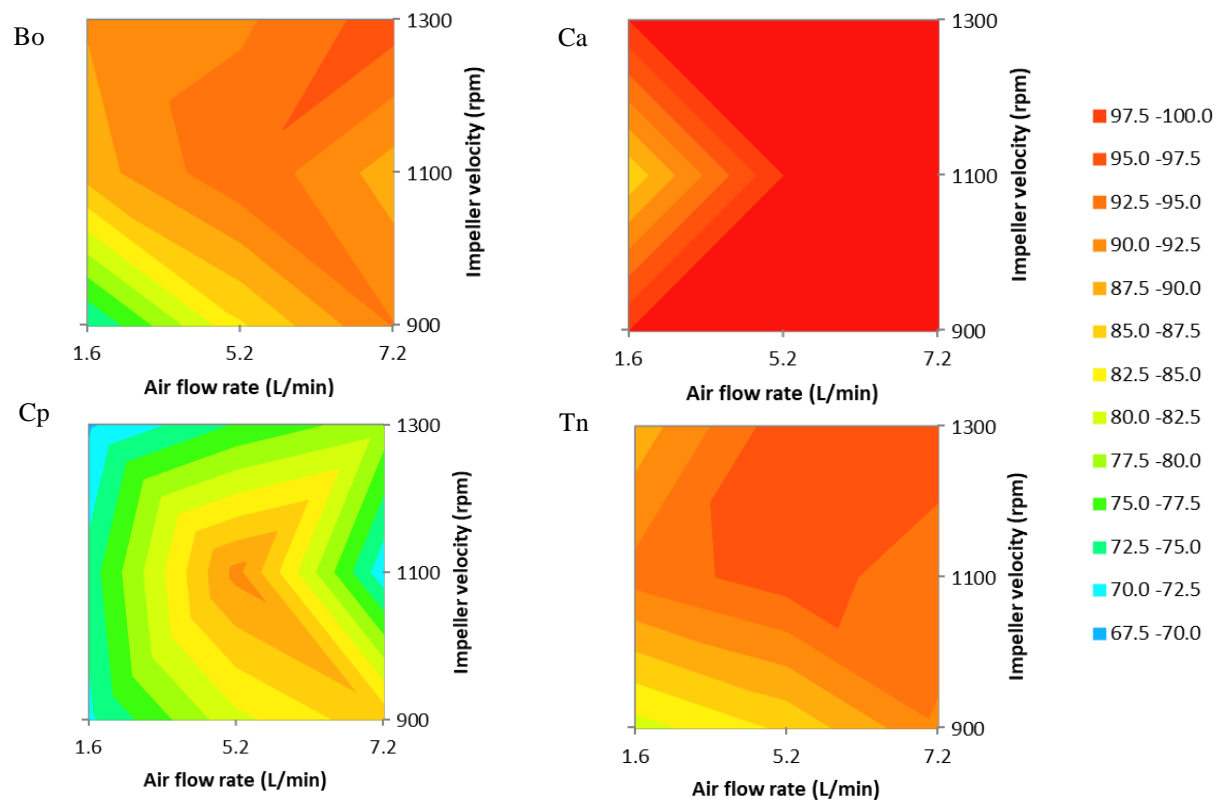


Figura81 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas ( $-4,7 \mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.2.12. Resultados de muestra No.4 (minerales en las partículas de 4,7 a 18,8 $\mu\text{m}$ )

En las figuras 82-85 se muestran los resultados de los minerales de cobre liberados en las partículas finas ( $-18,8 +4,7 \mu\text{m}$ ) de muestra No.4. Comparando la constante cinética (figura 82) con las otras muestras, la muestra No.4 es la única que marca el valor máximo en la condición de 1300 rpm, 5,2 L/min. Las otras llegan a su máximo con 1300 rpm y 7,2 L/min. La recuperación máxima es alta en todas las condiciones pero se aumenta por la agitación y aireación.

Comparando los resultados separados por especies minerales la misma tendencia que las otras muestras se observan. La recuperación de la calcopirita es relativamente baja que las otras especies minerales.

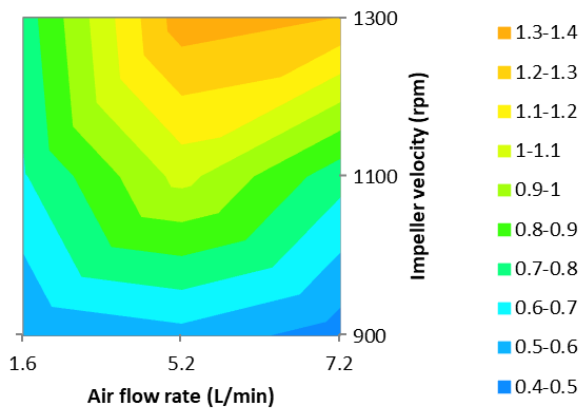


Figura82 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $+4,7-18,8 \mu\text{m}$ , muestra No.4)

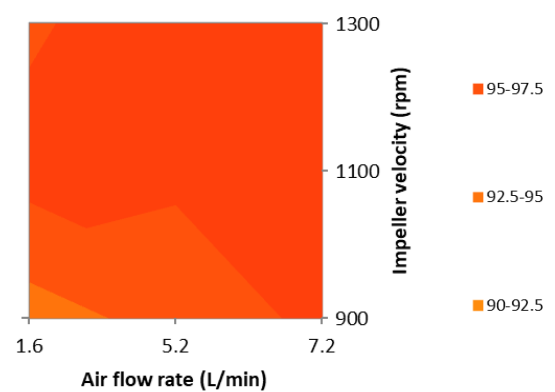


Figura83 El efecto de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de minerales de cobre liberados en las partículas pequeñas ( $+4,7-18,8 \mu\text{m}$ , muestra No.4)

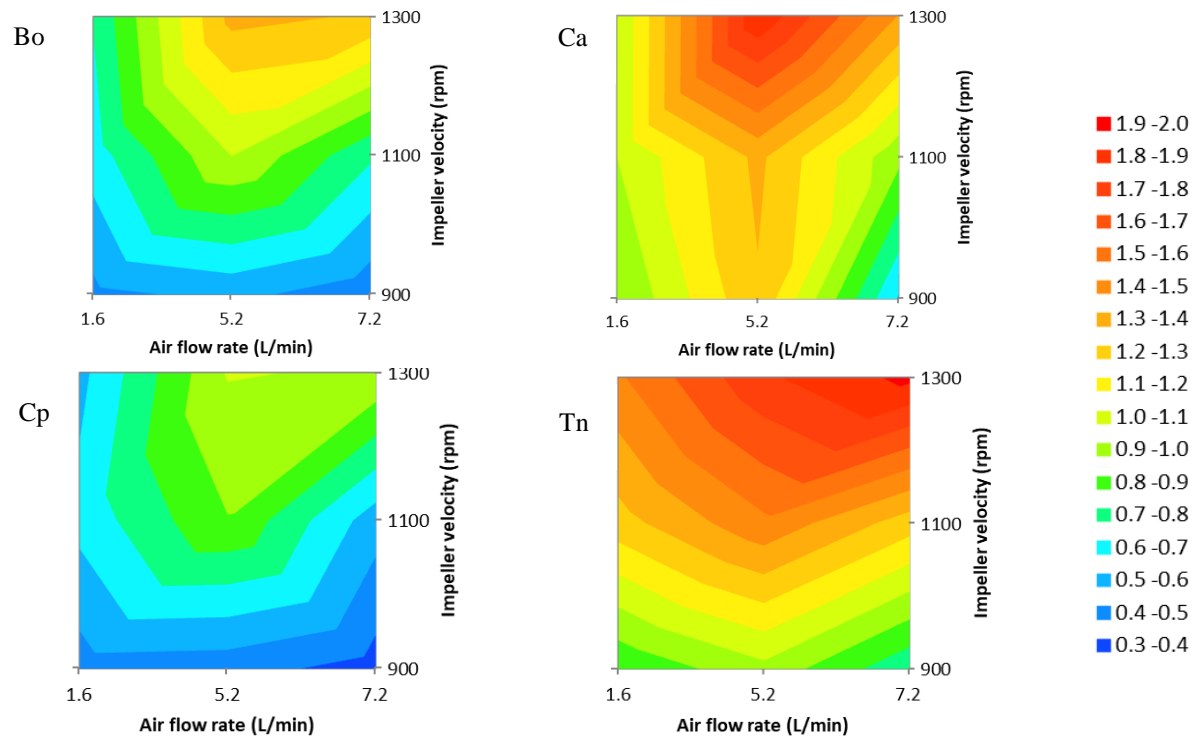


Figura 84 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la constante cinética de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

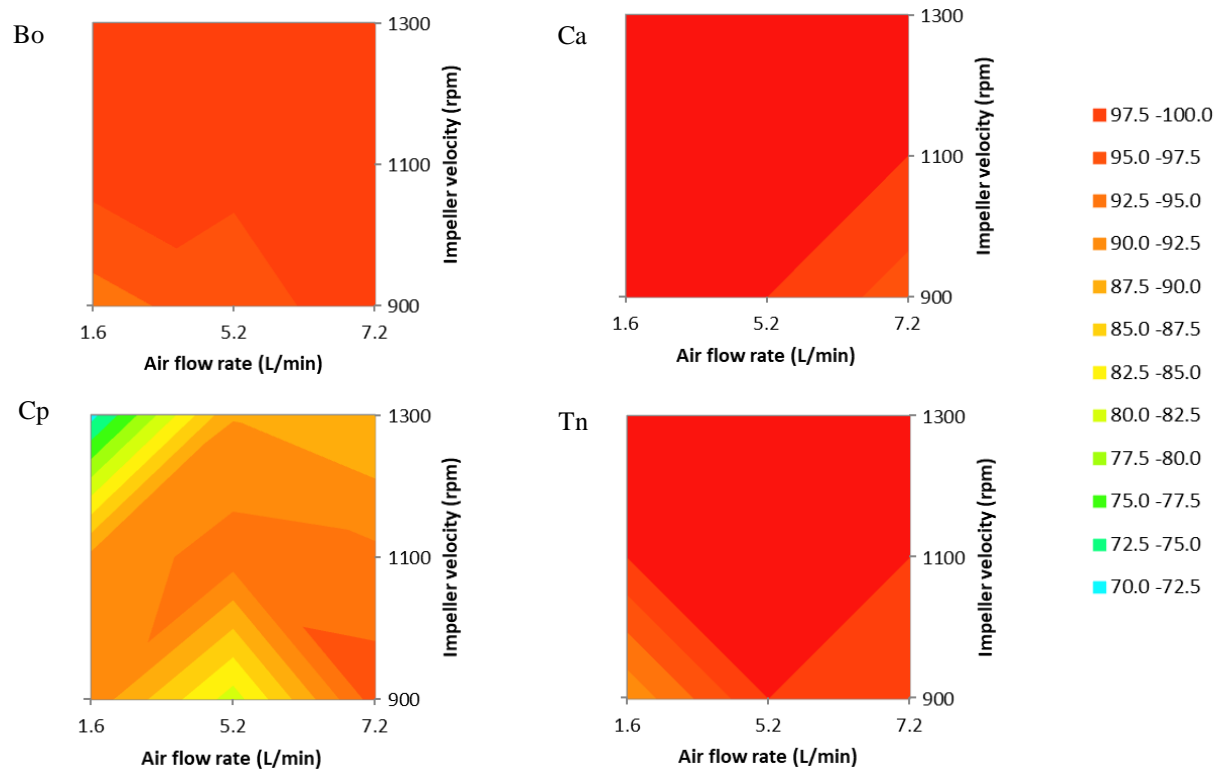


Figura 85 Los efectos de la velocidad de agitación y el flujo del aire a la recuperación máxima de cobre liberado en las partículas pequeñas (+4,7–18,8  $\mu\text{m}$ ) en muestra No.4 (Bo: bornita, Ca: calcosina, Cp: calcopirita, Tn: tennantita)

### 6.3.3. Consideraciones

En este capítulo se ejecutó una serie de experimentos sobre los cuatro tipos de muestras. Y cuatro en ellas se investigaron con MLA. Las cuatro muestras son distintas en su composición y tamaño de granos, así que mostraron distintos comportamientos en algunos puntos.

Primero, el efecto de las variables hidrodinámicas para las cuatro muestras en general fue en una misma tendencia. La mayor agitación y mayor aireación resultaron en la mejor constante cinética. Para obtener mejor recuperación ambas de estas dos condiciones tienen que aumentarse juntos. En el caso que se aumenta una sola de ellas, el efecto no es significativo. Sin embargo, comparando los dos parámetros, si el flujo de aire se aumenta solo la recuperación no se mejora mucho mientras la velocidad de agitación tiene un cierto efecto. Este fenómeno se considera por el tamaño de burbujas. Cuando solo la aireación se aumenta las burbujas se vuelven grandes y lo cual resulta en menor superficie comparando con el aumento solo de la agitación. En el mecanismo de flotación la superficie de burbujas es muy importante porque es la parte donde capta las partículas. Por lo tanto la menor superficie resulta en el menor lugar de reacción y resulta en la baja recuperación relativamente. Las ecuaciones (4)-(7) explican el efecto del tamaño de burbujas a la constante cinética.

Aunque todas las muestras mostraron una misma tendencia, hay algunas diferencias entre muestras en los resultados no separados por tamaño (Figura 39). Las constantes cinéticas originales (en condición de 900 rpm, 1,6 L/min) son casi iguales en todas las muestras pero en la condición más activa (1300 rpm, 7,2 L/min) la muestra No.2 mostró un valor de constante mejor que las otras muestras. Las constantes de cada especie mineral mostró el mismo fenómeno que en la muestra No.2 que se mostró la mejor constante cinética. Este fenómeno puede ser por la distribución de tamaño de partícula y la composición mineralógica. En este punto, la composición mineralógica de la muestra No.2 es similar a la de la No.4 y se compone unos 70% de bornita pero  $P_{80}$  es distinto; No.2 = 50  $\mu\text{m}$  y No.4 = 100  $\mu\text{m}$ . Dado esto, se puede considerar como lo siguiente. La agitación y aireación adicional incrementa la velocidad de flotación de las partículas finas y además el exceso los minerales flotables (calcosina y tennantita) pueden molestar la flotación de bornita.

Segundo, mirando los resultados de análisis por tamaño por MLA, se observaron unas tendencias comunes para todas las muestras. Lo más importante en esta investigación es el mejoramiento de la recuperación de las partículas finas y liberadas. En este punto, el aumento de la agitación y aireación fue útil, aunque el grado de mejoramiento fue distinto depende de la muestra. Además de la velocidad de flotación, la recuperación máxima de las partículas muy finas también se mejoró. Se reveló que el aumento de la agitación y aireación mejora la velocidad de flotación y recuperación pero el aumento de una sola variable no resulta. Y comparando las partículas finas (-18,8+4,7  $\mu\text{m}$ ) con las partículas muy finas (-4,7  $\mu\text{m}$ ), no solamente el valor de constante cinética sino también el impacto a ella es mayor en las finas. Esto significa que el aumento de los parámetros mejoró la flotación de partículas finas como del tamaño menos de 20  $\mu\text{m}$  pero para las

partículas muy finas la dificultad sigue existiendo.

Sobre la diferencia entre las especies minerales, en general la flotabilidad fue en el orden como lo siguiente; calcosina > tennantita > bornita > calcopirita. Aunque se aumenta la agitación y aireación este orden no cambió. Pero como se refirió arriba se observó una tendencia que los minerales fáciles de flotar podían impedir la flotación de los minerales difíciles de flotar.



## 7. Discusiones

En el capítulo anterior se reveló la dificultad de flotación de partículas finas y la utilidad de aumento de agitación y aireación ante el problema. Y además, los resultados indicaron que hay diferencia entre los comportamientos de especies minerales. Por otro lado, en operación de la mina con este tipo de mineral, que se compone de varias especies minerales, posiblemente se varían la velocidad de flotación y la recuperación por la variedad de mineral que se alimenta a la planta. Para mantener las condiciones óptimas y los resultados mejores, sería una opción operar la planta modificando las condiciones por muestra. Se discute cómo se optimiza las condiciones en este capítulo.

En este trabajo se analizaron los efectos de la velocidad de agitación y del flujo del aire a los cuatro tipos de muestra de distintas composiciones. Por lo tanto los parámetros variables son; velocidad de agitación, flujo del aire, cantidad de calcopirita, bornita, calcosina y tennantita, y tamaño de partículas  $P_{80}$ .

Primero, el parámetro más difícil de cambiar es  $P_{80}$ . Para saber el tamaño de granos de mineral algunas investigaciones específicas son necesarias tales como microscopía y MLA. Y además para cambiar el  $P_{80}$  el tiempo de residencia en el molino tiene que ser modificado y lo cual resulta en el cambio del caudal de minerales. Por lo tanto la modificación del  $P_{80}$  no es aplicable en operación y es necesario elegir un valor óptimo por experimento con una muestra bien representativa del yacimiento.

Segundo, cuando la composición mineralógica se varía, se puede considerar es una mezcla de las cuatro muestras en una cierta proporción. Y según la proporción de la mezcla se puede presumir la condición operativa óptima como la mezcla de las condiciones óptimas para cada muestra.

En la figura 39 se muestran las constantes cinéticas cambiando los parámetros hidrodinámicos. En operación el tiempo de flotación no es variable así que la velocidad de flotación alta significa mejor recuperación, por lo tanto aquí se investiga los efectos a la constante. Todas las muestras mostraron una misma tendencia y dieron el mejor valor en la condición de 1300 rpm y 7,2 L/min. Una cosa que hay que considerar es el valor de la muestra No.4 en la condición de 1300 rpm y 5,2 L/min. En esta condición el valor de la constante es casi igual a lo en 7,2 L/min y no hay datos entre estos dos puntos. Este indica que una posibilidad de existencia de la mejor condición entre estas dos condiciones. Sin embargo según los datos obtenidos en este estudio, la mejor condición es 1300 rpm y 7,2 L/min comúnmente.

Por otro lado, aumento del flujo del aire significa aumento del holdup del gas en la celda y resulta en menor tiempo de residencia del mineral tratado en la celda. Aquí en adelante se calcula el impacto de disminución del tiempo de residencia por el aumento del flujo del aire. El tiempo de residencia se calcula con la ecuación (13) con el tiempo de residencia  $t_{res}$ , el flujo volumétrico de la pulpa  $C_{vol}$ , el número de la celda  $N$ , el volumen efectivo de la celda (el volumen total de la celda menos el de impeller etc.)  $V_{ef}$  y el holdup del gas  $H_{gas}$ .

$$t_{res} = \frac{N * V_{ef} * (1 - H_{gas})}{C_{vol}} \quad (13)$$

Se calcula el valor del tiempo de residencia con algunas consideraciones tales como que el holdup del gas es proporcional al valor del flujo del aire y que las condiciones aparte del holdup son iguales. Como que el valor normal del holdup es 15 % (Wills et al. 2016) y considerando la condición de 1300 rpm y 5,2 L/min como estándar, en la condición mejor de 1300 rpm el holdup es 20,8 %. Esta diferencia resulta en el tiempo de residencia 7,2 % menor que la condición original. Por ejemplo en la planta diseñada para la 1300 rpm y 5,2 L/min en la que el tiempo medio de residencia es 30 minutos, el aumento del flujo del aire a 7,2 L/min resulta en el tiempo unos dos minutos menor. El impacto de esta disminución depende del diseño de planta, por lo tanto se tiene que considerar bien. Como en la muestra No.4 no hay mucha diferencia en la constante cinética, la mejor condición será 1300 rpm y 5,2 L/min considerando el tiempo de residencia.

La razón posible de este fenómeno es la diferencia de  $P_{80}$ . Como se ha discutido, el  $P_{80}$  es difícil de variar así que el  $P_{80}$  definido es importante. En el caso de que  $P_{80}$  es mayor que 50  $\mu\text{m}$  posiblemente la condición óptima es 5,2 L/min y 1300 rpm.

## 8. Conclusiones

En este estudio se llevó a cabo una serie de experimentos de flotación con los minerales del proyecto arqueros con el objetivo de mejorar la recuperación con el enfoque de condiciones hidrodinámicas y se obtuvieron los próximos resultados.

- Se mejoraron la recuperación y la eficiencia de separación por el aumento de la agitación y el flujo del aire.
- Se mejoró la constante cinética por el aumento de la agitación y del flujo del aire.
- Se mostró que las partículas finas flotan muy lento.
- Se mejoraron la recuperación y la velocidad de flotación de las partículas finas ( $-18,4 \mu\text{m}$ ) con el aumento de la agitación y del flujo del aire.
- Se encontró el orden de la flotabilidad de minerales; calcosina>tennantita>bornita>calcopirita.
- El proceso de flotación es competitivo entre partículas.
- La condición óptima es 1300 rpm y 7,2 L/min mientras el P80 es unos 50  $\mu\text{m}$ .
- En el caso del P80 cerca de 100  $\mu\text{m}$ , el flujo del aire óptimo puede ser 5,2 L/min.

## 9. Bibliografia

Batchelor, A.R., Jones, D.A., Plint, S., Kingman, S.W., “Increasing the grind size for effective liberation and flotation of a porphyry copper ore by microwave treatment”, *Minerals Engineering* 94 (2016) 61–75

Cytec , “Mining chemicals handbook 2010 Edition ver. 2,” (2010), 80-81

Chipfunhu, D., Zanina, M., Grano S., “Flotation behaviour of fine particles with respect to contact angle”, *Chemical Engineering Research and Design* 90 (2012) 26–32

Gorain, B.K., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., “Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 3: Effect on superficial gas velocity”, *Minerals Engineering*, 9 (1996), 639–654

Gorain, B.K., Napier-Munn, T.J., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., “Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 4: effect of bubble surface area flux on flotation performance”, *Minerals Engineering*, 10 (1997), 367-379

Gorain, B.K., Harris, M.C., Franzidis, J.P., Manlapig E.V., “The effect of froth residence time on the kinetics of flotation”, *Minerals Engineering*, 11 (1998a), 627–638

Gorain, B.K., Napier-Munn, T.J., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., “Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 5: Validation of k-sb relationship and effect of froth depth”, *Minerals Engineering*, 11 (1998b), 615–626

Grano S.R., Wong, P., Skinner, W., Johnson, N.W., Ralston, J., “The effect of autogenous and ball mill grinding on the chemical environment and flotation of the copper ore of Mount Isa Mines Limited.” In: III Latin-American Congress on Froth Flotation (University of Concepcion Publ.), Concepcion, Chile, 1994, 351–388

Hassanzadeha, A., Hassas, B. V., Kouachi, S., Brabcova, Z., Celik, M. S., “Effect of bubble size and velocity on collision efficiency in calcopirita flotation”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 498 (2016) 258–267

Hewitt, D., Fornasiero, D., Ralston, J., “Aqueous film drainage at quartz/water/air interface”, *Journal of Chemistry Society, Faraday Transactions*, 89 (1993), 817–822

Jameson, G. J., “The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants”, *Minerals Engineering* 36-38 (2012) 132-137

Jávor, Z., Schreithofer, N., Heiskanen, K., “Micro- and nano-scale phenomena effect on bubble size in mechanical flotation cell”, *Minerals Engineering* 70 (2015) 109–118

Leistner, T., Peuker, U. A., Rudolph, M., “How gangue particle size can affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation”, *Minerals Engineering* (2017) 1-9

Leiva, J., Vinnett, L., Contreras, F., Yianatos, J., “Estimation of the actual bubble surface area flux in flotation”, *Minerals Engineering* 23 (2010) 888-894

Miettinen, T., Ralston, J., Fornasiero, D., “The limits of fine particle flotation”, *Minerals Engineering* 23 (2010) 420-437

Muganda, S., Zanin, M., Grano, S.R., “Influence of particle size and contact angle on the flotation of calcopirita in a laboratory batch flotation cell”, *International Journal of Mineral Processing* 98 (2011) 150–162

Pérez-Garibay, R., Ramírez-Aguilera, N., Bouchard, J., Rubio, J., “Froth flotation of sphalerite: Collector concentration, gas dispersion and particle size effects” *Minerals Engineering* 57 (2014) 72–78

Rahman, A., Ahmad, K.D., Mahmoud, A., Maoming, F., “Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine calcopirita particles”, *International Journal of Mining Science and Technology* 24 (2014) 559–566

Shahbazi, B., Rezai, B., Javad Koleini S.M., “Bubble–particle collision and attachment probability on fine particles flotation”, *Chemical Engineering and Processing* 49 (2010) 622–627

Spedden, H.R., Hannan, W.S., “Attachment of mineral particles to air bubbles in flotation”, *Mineral Technology* 12 (1984) T.P. 2354

Tabosa, E., Runge, K., Holtham, P., “The effect of cell hydrodynamics on flotation performance”, *International Journal of Mineral Processing* 156 (2016) 99-107

Tao, D., “Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – a review”, *Separation Science and Technology*, 39 (4) (2004), 741–760

Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., “Will’s Mineral Processing Technology (Eighth edition)”, Chap. 12, (2016), 265-380