



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DEL TIPO Y
CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE EN LA
SELECTIVIDAD DEL PROCESO DE FLOTACIÓN A
ESCALA LABORATORIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

YASNA ROMINA OROZCO LÓPEZ

PROFESOR GUÍA:

WILLY KRACHT GAJARDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

TOMÁS VARGAS VALERO

GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DEL TIPO Y
CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE EN LA
SELECTIVIDAD DEL PROCESO DE FLOTACIÓN A
ESCALA LABORATORIO

YASNA ROMINA OROZCO LÓPEZ

2012

RESUMEN EJECUTIVO

La flotación de minerales es una técnica de separación selectiva de partículas en base a su hidrofobicidad. En ella se utiliza una serie de reactivos, entre los que se encuentran los espumantes, cuya función principal es la de contribuir a la formación de burbujas de tamaño pequeño y una fase de espuma estable.

En este trabajo se estudia el efecto que tienen los espumantes sobre la relación entre recuperación de agua y recuperación por arrastre de partículas hidrofílicas en una celda de flotación a escala laboratorio. Para estudiar este efecto se realizaron pruebas con espumantes de distinta estructura molecular (alcoholes y polietilenglicoles), primero en ausencia de partículas, para caracterizar el sistema, y posteriormente en presencia de partículas hidrofílicas de cuarzo.

Los resultados muestran diferencias de comportamiento entre alcoholes y polietilenglicoles. Para la recuperación de agua, los polietilenglicoles estudiados (PEG400, PEG300 y PEG200) llevan más agua al concentrado que los alcoholes. En el caso de la recuperación por arrastre, son los alcoholes (octanol, heptanol, MIBC y hexanol) los que arrastran más partículas de sólido al concentrado. Los factores de arrastre (ENT) muestran menor valor para polietilenglicoles que para alcoholes, es decir, a igual recuperación de agua, estos últimos arrastran mayor cantidad de partículas, lo que se podría traducir en un efecto diferenciado sobre la selectividad del proceso de flotación. Esto puede deberse a que alcoholes y polietilenglicoles generan distintas estructuras de espuma, las que a su vez afectan tanto recuperación de agua como recuperación por arrastre. Se observa que tanto para alcoholes como para polietilenglicoles el factor ENT aumenta con el peso molecular de los espumantes.

Para corroborar si existe un efecto sobre la selectividad del proceso de flotación, se realizaron pruebas de flotación con polietilenglicol (PEG300) y octanol con un mineral preparado de cuarzo más calcopirita, obteniéndose una mayor ley acumulada de cobre en el caso de PEG300, lo cual es consistente con la diferencia observada en factores de arrastre. Se observó también una gran diferencia en las constantes cinéticas de flotación ($0,414 \text{ [min}^{-1}]$ para PEG300 y $0,184 \text{ [min}^{-1}]$ para octanol) que podría estar relacionada con un aumento en el espesor de película de líquido asociado a la superficie de burbuja.

AGRADECIMIENTOS

A mi equipo de trabajo encabezado por mi profesor guía Willy Kracht y personal del laboratorio de procesamiento de minerales por hacerme el trabajo más llevadero.

Un especial agradecimiento también al Departamento de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile por financiar este proyecto.

A mis padres, Óscar y Norma, por la confianza y apoyo que he recibido durante toda mi vida y por el cariño incondicional que me demuestran cada día. Los amo.

A mis hermanas, Daniela y Marcia, por estos años de universidad en los que tuve toda su paciencia. Las quiero mucho.

A Juan, por estar siempre a mi lado y contenerme en momentos difíciles. Por todo el amor, cariño y comprensión que siempre encuentro en ti, mil gracias.

A mis amigas Ivette, Alessandra y María José que me acompañaron en el día a día estos seis años de carrera.

A Dios por dejarme vivir esta experiencia junto a los que más amo en el mundo....

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	8
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	8
1.2. OBJETIVOS	10
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	10
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	10
1.3. ESTRUCTURA Y ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	10
CAPÍTULO II: CONSIDERACIONES TEÓRICAS	11
2.1. FENÓMENOS INVOLUCRADOS	11
2.2. MEDIDAS DE DISPERSIÓN DE GAS	12
2.2.1. <i>Gas Holdup</i>	13
2.2.1.1. Medición por presión	13
2.2.1.2. Medición por conductividad	14
2.2.2. <i>Velocidad superficial de gas</i>	15
2.2.3. <i>Flujo areal superficial de burbujas</i>	15
2.2.4. <i>Distribución de tamaños de burbuja</i>	17
2.2.4.1. Efecto del espumante en el tamaño de burbuja	17
2.3. EQUIPOS DE FLOTACIÓN	18
2.3.1. <i>Celdas mecánicas</i>	18
2.3.2. <i>Celdas columnares</i>	20
2.4. REACTIVOS DE FLOTACIÓN	21
2.4.1. <i>Colectores</i>	21
2.4.2. <i>Modificadores</i>	22
2.4.3. <i>Espumantes</i>	22
2.5. ARRASTRE DE PARTÍCULAS EN LA FLOTACIÓN	27
2.5.1. <i>Efecto del flujo de gas en el transporte de agua y arrastre de partículas</i>	37
2.5.2. <i>Efecto de la profundidad de espuma en el arrastre de partículas</i>	37
2.5.3. <i>Efecto del tamaño de partícula sobre el arrastre de sólidos</i>	38
2.5.4. <i>Efecto del tipo y concentración de espumante en el transporte de agua</i>	39
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	39
3.1. MATERIALES	39
3.1.1. <i>Muestras</i>	39
3.1.1.1. Sílice	39
3.1.1.2. Concentrado	40

3.1.2.	Reactivos	40
3.2.	EQUIPOS Y MEDICIONES	42
3.2.1.	Equipos	42
3.2.2.	Medición de parámetros	44
3.2.2.1.	Medición de gas holdup	44
3.2.2.2.	Medición de recuperación de agua	45
3.2.2.3.	Medición de recuperación de partículas finas	46
3.3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	46
3.3.1.	Pruebas en sistema bifásico (agua-aire)	47
3.3.2.	Pruebas con sílice (aire-sólido-agua)	47
3.3.3.	Pruebas con sílice y colector	48
3.3.4.	Pruebas con sílice, concentrado y colector	48
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		49
4.1.	MUESTRAS DE ALIMENTACIÓN DE SÍLICE	49
4.2.	CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO	50
4.3.	CURVAS $Jg-\varepsilon g$	51
4.4.	PRUEBAS CON SÍLICE	59
4.5.	PRUEBAS CON SÍLICE Y COLECTOR	63
4.6.	PRUEBAS CON SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR	65
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN		68
5.1.	CURVAS $Jg-\varepsilon g$	68
5.2.	PRUEBAS CON SÍLICE	68
5.3.	PRUEBAS CON SÍLICE Y COLECTOR	71
5.4.	PRUEBAS CON SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR	71
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES		72
REFERENCIAS		73
ANEXOS		76
A.	TABLAS DE DATOS	76
B.	FIGURAS	93
C.	EJEMPLOS DE CÁLCULO	102
a.	Cálculo de Qg real	102
b.	Cálculo de Jg real	102
c.	Cálculo de εg	102
d.	Cálculo de la recuperación de agua	103
e.	Cálculo de la recuperación de cuarzo	103
f.	Cálculo de recuperación de cobre por modelo García-Zúñiga	103

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ÁNGULO DE CONTACTO DE SÓLIDO HIDRÓFILO EN SISTEMA AIRE-AGUA. (B) ÁNGULO DE CONTACTO DE SÓLIDO HIDRÓFOTO EN SISTEMA AIRE-AGUA [26].	11
FIGURA 2. ATAQUE SELECTIVO DE BURBUJAS DE AIRE A PARTÍCULAS HIDROFÓBICAS [34].	12
FIGURA 3. MEDICIÓN DE GAS HOLDUP POR PRESIÓN [4].	14
FIGURA 4. MEDICIÓN DE GAS HOLDUP POR CONDUCTIVIDAD [4].	14
FIGURA 5. VALORES DE SB PARA CELDAS COLUMNARES Y MECÁNICAS [34].	16
FIGURA 6. TAMAÑO DE BURBUJA V/S CONCENTRACIÓN DE ESPUMANTE [6].	17
FIGURA 7. ZONAS TÍPICAS EN UNA CELDA DE FLOTACIÓN [24].	19
FIGURA 8. ESQUEMA DE UNA CELDA DE FLOTACIÓN COLUMNAR [12].	20
FIGURA 9. ADHESIÓN DEL COLECTOR A LA SUPERFICIE DEL MINERAL [33].	21
FIGURA 10. ADHESIÓN DEL ESPUMANTE A LA PARTÍCULA DE AIRE [33].	23
FIGURA 11. (A) MOLÉCULAS DE ESPUMANTE ADSORBIDAS EN LA SUPERFICIE DE LA BURBUJA Y LOS PUENTES DE HIDROGENO RESULTANTES (B) CAPA DE AGUA SOBRE LA BURBUJA [12].	24
FIGURA 12. ASCENSO DE UNA BURBUJA CON LA CAPA DE AGUA LIGADA Y LA TURBULENCIA A SU PASO [28].	28
FIGURA 13. ESTRUCTURA DE LA ESPUMA [31].	29
FIGURA 14. CLASIFICACIÓN DE ESPUMANTES BASADO EN LA VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE AGUA [20].	30
FIGURA 15. FORMAS DE GRÁFICOS DE ARRASTRE [15].	31
FIGURA 16. ARRASTRE DE CUARZO (<5 μm) OBSERVADO PARA 27% DE CONTENIDO DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN EN PRESENCIA DE ESPUMANTE PPG400. ADAPTADO DE TRAHAR (1981). [15]	32
FIGURA 17. RECUPERACIÓN DE DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE CUARZO COMO FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA OBTENIDA EN PRESENCIA DE DOWFROTH 250. FLOTACIÓN CONTINUA HECHA EN UNA MÁQUINA DE FLOTACIÓN EQUIPADA CON UNA CELDA DE FLOTACIÓN DE 30 [DM ³]. ADAPTADO DE EGELEBRECHT Y WOODBURN (1975). [15]	33
FIGURA 18. TIPO 3 DE CURVA DE SEPARACIÓN POR ARRASTRE. RESULTADOS DE FLOTACIÓN BATCH CON ADICIÓN DE AGUA PARA CUARZO -40 [μm] EN PRESENCIA DE ESPUMANTE PPG EN UNA MÁQUINA DE LABORATORIO DENVER (3 [DM ³]). ADAPTADO DE KIRJAVAINEN (1989). [15]	34
FIGURA 19. RELACIÓN ENTRE RECUPERACIÓN DE PARTÍCULAS DE CUARZO Y RECUPERACIÓN DE AGUA. LA RELACIÓN REPRESENTA EL TIPO 4 DE CURVA DE SEPARACIÓN POR ARRASTRE. LOS EXPERIMENTOS FUERON LLEVADOS EN UNA MÁQUINA DE FLOTACIÓN EQUIPADA CON UNA CELDA DE FLOTACIÓN DE 30 [DM ³]. ESPUMANTE: DOWFROTH 250. ADAPTADO DE EGELEBRECHT Y WOODBURN (1975). [15]	34
FIGURA 20. TIPO 5 DE CURVAS DE SEPARACIÓN POR ARRASTRE PARA RELACIONAR LA RECUPERACIÓN DE PARTÍCULAS Y LA RECUPERACIÓN DE AGUA. ADAPTADO DE WARREN (1985). [15]	35
FIGURA 21. RECUPERACIÓN DE AGUA VS. RECUPERACIÓN DE GANGA [30].	36

FIGURA 22. RECUPERACIÓN DE CUARZO FINO (<5 μm) POR ARRASTRE COMPARADO CON LA RECUPERACIÓN DE AGUA ($\circ = \text{MIBC}$; $\blacksquare = \text{PPG}$; $\triangle = \text{DAA}$) [30].	37
FIGURA 23. RECUPERACIÓN DE CUARZO POR ARRASTRE EN LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE CALCOPIRITA [30].	38
FIGURA 24. INTERPRETACIÓN DE LA FORMACIÓN DEL ESPESOR DE AGUA EN PRESENCIA DE ESPUMANTE [8].	39
FIGURA 25. ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN EN EL DESARROLLO EXPERIMENTAL.	44
FIGURA 26. DIAGRAMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN LA CELDA MECÁNICA.	45
FIGURA 27. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MUESTRAS DE SÍLICE DE ALIMENTACIÓN.	49
FIGURA 28. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO ($R^2=0,9916$)	50
FIGURA 29. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA HEXANOL A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	52
FIGURA 30. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA HEPTANOL A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	52
FIGURA 31. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA OCTANOL A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	53
FIGURA 32. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA PEG400 A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	53
FIGURA 33. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA PEG200 A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	54
FIGURA 34. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA X133 A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	54
FIGURA 35. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA PENTANOL A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	55
FIGURA 36. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA AEROFROTH 70 A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	55
FIGURA 37. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA MIBC A DISTINTAS CONCENTRACIONES.	56
FIGURA 38. CURVA $Jg-\epsilon g$ PARA PEG300 A 0,5 [MMOL/L].	56
FIGURA 39. CURVAS $Jg-\epsilon g$ PARA DISTINTOS ESPUMANTES A 0,2 [MMOL/L].	57
FIGURA 40. CURVAS $Jg-\epsilon g$ PARA DISTINTOS ESPUMANTES A 0,3 [MMOL/L].	58
FIGURA 41. CURVAS $Jg-\epsilon g$ PARA DISTINTOS ESPUMANTES A 0,4 [MMOL/L]	58
FIGURA 42. CURVAS $Jg-\epsilon g$ PARA DISTINTOS ESPUMANTES A 0,5 [MMOL/L].	59
FIGURA 43. RECUPERACIÓN DE AGUA EN CINÉTICA DE FLOTACIÓN DE CUARZO CON DIFERENTES ESPUMANTES.	60
FIGURA 44. RECUPERACIÓN POR ARRASTRE EN CINÉTICA DE FLOTACIÓN DE CUARZO CON DIFERENTES ESPUMANTES.	60
FIGURA 45. REC. POR ARRASTRE EN FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA PARA LAS PRUEBAS CON HEXANOL, MIBC, HEPTANOL, PEG200 Y PEG400.	61
FIGURA 46. REC. POR ARRASTRE EN FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA PARA LA PRUEBA CON OCTANOL Y PEG300 EN TRIPLICADO.	61
FIGURA 47. RECUPERACIÓN DE CUARZO EN FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA PARA PRUEBAS CON OCTANOL CON Y SIN COLECTOR.	64
FIGURA 48. RECUPERACIÓN DE CUARZO EN FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA PARA PRUEBAS CON PEG300 CON Y SIN COLECTOR.	64
FIGURA 49. RECUPERACIÓN DE CUARZO EN FUNCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE AGUA PARA LAS PRUEBAS DE OCTANOL, PEG300 Y MINERAL PREPARADO.	65
FIGURA 50. LEY ACUMULADA DE COBRE EN EL TIEMPO PARA PEG300 Y OCTANOL.	66
FIGURA 51. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA OCTANOL Y PEG300 CON APROXIMACIÓN DE GARCÍA- ZÚÑIGA (G-Z).	67

FIGURA B. 1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DEL CONCENTRADO DE LAS TÓRTOLAS.	93
FIGURA B. 2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA MUESTRA DE SÍLICE UTILIZADA.	94
FIGURA B. 3. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA CONCENTRADO DE PRUEBA CON HEPTANOL (IZQUIERDA) Y HEXANOL (DERECHA).	95
FIGURA B. 4. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA CONCENTRADO DE PRUEBA CON MIBC (IZQUIERDA) Y PEG200 (DERECHA).	95
FIGURA B. 5. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA CONCENTRADO DE PRUEBA PEG400.	95
FIGURA B. 6. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA PRIMERA PRUEBA CON OCTANOL.	96
FIGURA B. 7. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) MINUTOS PARA PRIMERA PRUEBA CON OCTANOL.	96
FIGURA B. 8. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 PARA PRIMERA PRUEBA CON OCTANOL.	96
FIGURA B. 9. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA SEGUNDA PRUEBA CON OCTANOL.	97
FIGURA B. 10. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) MINUTOS PARA SEGUNDA PRUEBA CON OCTANOL.	97
FIGURA B. 11. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 PARA SEGUNDA PRUEBA CON OCTANOL.	97
FIGURA B. 12. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA TERCERA PRUEBA CON OCTANOL.	98
FIGURA B. 13. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) PARA TERCERA PRUEBA CON OCTANOL.	98
FIGURA B. 14. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 PARA TERCERA PRUEBA CON OCTANOL.	98
FIGURA B. 15. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA PRIMERA PRUEBA CON PEG300.	99
FIGURA B. 16. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) MINUTOS PARA PRIMERA PRUEBA CON PEG300.	99
FIGURA B. 17. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 PARA PRIMERA PRUEBA CON PEG300.	99
FIGURA B. 18. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA SEGUNDA PRUEBA CON PEG300.	100
FIGURA B. 19. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) MINUTOS PARA SEGUNDA PRUEBA CON PEG300.	100
FIGURA B. 20. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 MINUTOS PARA SEGUNDA PRUEBA CON PEG300.	100
FIGURA B. 21. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 0-1 (IZQUIERDA) Y 1-2 (DERECHA) MINUTOS PARA TERCERA PRUEBA CON PEG300.	101
FIGURA B. 22. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 2-4 (IZQUIERDA) Y 4-8 (DERECHA) MINUTOS PARA TERCERA PRUEBA CON PEG300.	101
FIGURA B. 23. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CONCENTRADO DEL INTERVALO DE TIEMPO 8-12 PARA TERCERA PRUEBA CON PEG300.	101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE ESPUMANTES [1].	26
TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE REACTIVOS UTILIZADOS	40
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DE COLECTOR UTILIZADO.	42
TABLA 4. VALORES CALCULADOS DE J_g	51
TABLA 5. VALORES OBTENIDOS DEL FACTOR DE ARRASTRE (ENT) PARA DISTINTOS ESPUMANTES.	62
TABLA 6. RESULTADOS PRUEBAS EN TRIPLICADO PARA OCTANOL	62
TABLA 7. RESULTADOS PRUEBAS EN TRIPLICADO PARA PEG300.	63
TABLA A. 1. TRIPLICADO DE GRANULOMETRÍA LÁSER DE LAS MUESTRAS DE SÍLICE DE ALIMENTACIÓN	76
TABLA A. 2. ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRA DE CONCENTRADO LAS TÓRTOLAS.	76
TABLA A. 3. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE SÍLICE UTILIZADO.	76
TABLA A. 4. DATOS DE CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO.	76
TABLA A. 5. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD CON DISTINTOS J_g SIN ESPUMANTE.	77
TABLA A. 6. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE X133.	77
TABLA A. 7. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE PEG400.	78
TABLA A. 8. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE OCTANOL.	78
TABLA A. 9. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE PENTANOL.	79
TABLA A. 10. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE HEXANOL.	80
TABLA A. 11. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE HEPTANOL.	81
TABLA A. 12. DATOS εg - J_g PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE AEROFROTH 70.	81
TABLA A. 13. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD A DISTINTOS J_g PARA PEG300 A 0,5 [MMOL/L].	82
TABLA A. 14. εg PROMEDIO PARA MIBC A DISTINTAS CONCENTRACIONES PARA DISTINTOS J_g	83
TABLA A. 15. εg PROMEDIO PARA PEG300 A DISTINTAS CONCENTRACIONES PARA DISTINTOS J_g .	83
TABLA A. 16. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA MIBC 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO.	84
TABLA A. 17. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA HEPTANOL 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	84
TABLA A. 18. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PEG 400 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	85

TABLA A. 19. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PEG 200 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	85
TABLA A. 20. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA HEXANOL 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	85
TABLA A. 21. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PEG300 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	86
TABLA A. 22. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA OCTANOL 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO	86
TABLA A. 23. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PEG300 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO (PRUEBA 2)	86
TABLA A. 24. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PEG300 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO (PRUEBA 3)	87
TABLA A. 25. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA OCTANOL 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO (PRUEBA 2)	87
TABLA A. 26. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA OCTANOL 0,5 [MMOL/L] Y CUARZO (PRUEBA 3)	87
TABLA A. 27. RESULTADOS TRIPLICADO OCTANOL 0,5 [MMOL/L] PARA REC. DE AGUA Y REC. POR ARRASTRE.	87
TABLA A. 28. RESULTADOS TRIPLICADO PEG 300 0,5 [MMOL/L] PARA REC. DE AGUA Y REC. POR ARRASTRE	88
TABLA A. 29. TAMAÑO MEDIO DE LOS CONCENTRADOS PARA CADA ESPUMANTE.	89
TABLA A. 30. VALORES REALES DE AGUA Y CUARZO ALIMENTADO A LAS PRUEBAS CON DISTINTOS ESPUMANTES.	89
TABLA A. 31. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA CON OCTANOL, SÍLICE Y COLECTOR.	89
TABLA A. 32. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA PEG300, SÍLICE Y COLECTOR.	90
TABLA A. 33. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA CON OCTANOL, SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR.	90
TABLA A. 34. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA CON OCTANOL, SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR.	90
TABLA A. 35. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA CON PEG300, SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR.	91
TABLA A. 36. CINÉTICA DE FLOTACIÓN PARA PRUEBA CON PEG300, SÍLICE, CONCENTRADO Y COLECTOR.	91
TABLA A. 37. ANÁLISIS QUÍMICO DE CONCENTRADOS POR INTERVALO DE TIEMPO PARA PRUEBA CON OCTANOL.	91
TABLA A. 38. ANÁLISIS QUÍMICO DE CONCENTRADOS POR INTERVALO DE TIEMPO PARA PRUEBA CON PEG300.	92
TABLA A. 39. CINÉTICA DE FLOTACIÓN Y AJUSTE DE GARCÍA ZÚÑIGA PARA PRUEBA CON PEG300.	92
TABLA A. 40. CINÉTICA DE FLOTACIÓN Y AJUSTE DE GARCÍA ZÚÑIGA PARA PRUEBA CON OCTANOL.	92

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

La flotación es la técnica más utilizada en el procesamiento de minerales. Patentada originalmente en 1906 [27], es aplicable a casi la mayoría de los minerales de metales preciosos, como el oro o metales base como el plomo.

Este es un proceso basado en la química de superficies para separar sólido fino (típicamente $<200 \mu\text{m}$), tomando ventaja de las diferencias en la mojabilidad de minerales. En la operación, burbujas de aire son dispersadas en una celda conteniendo partículas de sólido suspendidas en un medio acuoso formando una pulpa. Mediante la adición de reactivos químicos conocidos como colectores, los minerales son hechos hidrofóbicos y se adhieren a las burbujas. El agregado partícula-burbuja asciende y forma la fase espuma, la cual es removida para recuperar el mineral.

Un tipo de celdas o máquinas de flotación son las celdas mecánicas, donde el aire pasa a través de un impeller rotatorio. La dispersión del aire en estas celdas envuelve parámetros de gas holdup, diámetro de burbuja, velocidad superficial del gas y flujo areal superficial de burbujas. Todas ellas son variables importantes en la flotación. Con la manipulación de ellas se pueden asociar distintas variables como lo son la recuperación de agua o de partículas hidrofílicas. Esta relación será el tema principal de esta memoria.

En la flotación comúnmente se requieren una serie de reactivos, donde los colectores tornan la superficie del mineral a hidrofóbico. Por otro lado se tienen los espumantes que son surfactantes usados para disminuir el tamaño de burbuja y promover la estabilidad de la espuma. Los espumantes tienen estructura heteropolar que los hace adsorberse en una superficie aire-agua o sea, en la superficie de las burbujas, para satisfacer tanto su parte polar como su parte apolar.

El criterio para seleccionar el espumante ha cambiado con los años. En el pasado, el foco de atención era principalmente el costo, disponibilidad y ser ambientalmente amigable. Si bien sigue siendo importante, otros factores relativos al desempeño como las condiciones de aire o la calidad de la espuma producida han ido tomando importancia [1].

A la fecha, no se ha establecido una técnica única en la caracterización de espumantes. Como resultado de ello, términos como poderoso o selectivo, los cuales tienen un significado más práctico que científico, han seguido siendo comúnmente usados para describir espumantes.

Reconociendo la importancia del agua transportada por las burbujas en la flotación, Moyo [20] clasificó los espumantes basándose en la tasa de transporte de agua. El método mostró que la cantidad de agua arrastrada estaba relacionada con el gas holdup y el tipo de espumante.

Trahar [30], por otro lado, relacionó la recuperación por arrastre y la recuperación de agua obteniendo una tendencia lineal entre ambas. No obstante, según su estudio esta relación no depende del tipo ni la concentración de espumante en presencia y ausencia de mineral flotable.

Esta memoria examina el efecto del tipo de espumante en la selectividad del proceso de flotación. Al aumentar el gas holdup, se lleva más agua al concentrado, por lo que al no ser selectiva, también se lleva más partículas hidrofílicas, disminuyendo el grado del producto concentrado.

Este proyecto busca complementar un set de datos en celdas agitadas mecánicamente. Para distintos tipos y concentraciones de espumante se medirá la recuperación de agua y la recuperación de partículas hidrofílicas (sílice) en una celda de flotación de laboratorio agitada mecánicamente. Se espera que los resultados permitan relacionar las observaciones reportadas en la literatura sobre el arrastre de agua en función del tipo y concentración de espumante y aquellas que dicen relación con la flotación no selectiva y su dependencia de la recuperación de agua.

En trabajos anteriores ([2],[20]) se han propuesto procedimientos experimentales para clasificar espumantes basándose principalmente en sus efectos en la disminución del tamaño de burbuja y el arrastre de agua. En ellos sólo se hace referencia a columnas de flotación, por lo que en este proyecto se pretende analizar el efecto de la química de diferentes espumantes sobre la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio en celdas agitadas mecánicamente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Estudiar el efecto de los espumantes en la flotación por arrastre y la selectividad del proceso de flotación a escala laboratorio.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Implementar un protocolo que permita determinar la recuperación de agua en pruebas de flotación a escala de laboratorio (batch) en celdas agitadas mecánicamente.
- Clasificar los distintos tipos de espumantes en función de sus propiedades selectivas sobre el proceso de flotación.

1.3. Estructura y organización de la memoria

- En el Capítulo I se entregan antecedentes generales de la flotación y se introducen los objetivos de este trabajo de titulación.
- El Capítulo II es una revisión de las consideraciones teóricas del proceso de flotación, sus variables, reactivos y los efectos sobre el transporte de agua, para entender la acción de los espumantes en el arrastre de finos.
- En el Capítulo III se detallan tanto las mediciones realizadas en las distintas pruebas como los equipos involucrados en ellas, tanto para el sistema bifásico (agua-aire) como para el sistema trifásico (agua-aire-sólido).
- En el Capítulo IV se dan a conocer los resultados obtenidos de las experiencias realizadas en la celda mecánica batch con distintos espumantes, para un sistema bifásico aire-agua – aire y uno simulado con finos

- En el Capítulo V y Capítulo VI se analizan los resultados reportados en el Capítulo IV. En estos capítulos se discute y concluye acerca del trabajo de titulación.

CAPÍTULO II: CONSIDERACIONES TEÓRICAS

2.1. Fenómenos involucrados

Cuando dos fluidos están en contacto con un sólido se puede definir la mojabilidad del sólido respecto a cada uno de los fluidos mediante el ángulo de contacto, lo cual resulta de un equilibrio de fuerzas. En el presente caso los dos fluidos son el aire (A) y el agua (W) y por lo tanto se hablará de mojabilidad hidrófila o hidrófoba [26].

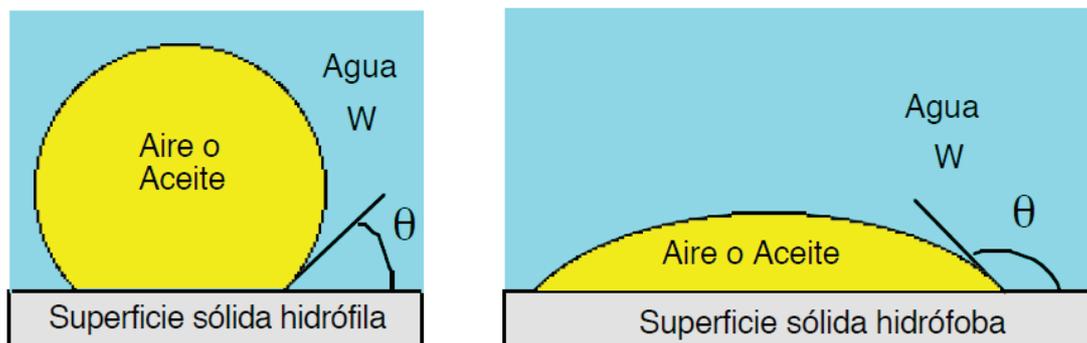


Figura 1. Ángulo de contacto de sólido hidrófilo en sistema aire-agua. (b) Ángulo de contacto de sólido hidrófobo en sistema aire-agua [26].

Si el ángulo de contacto con el agua, definido como lo indica la Figura 1 es netamente inferior a 90° , la superficie es hidrófila o hidrofílica; si es netamente mayor que 90° , la superficie es hidrófoba. En este último caso, es el ángulo de contacto con el aire que es netamente inferior a 90° . Cuando una superficie es hidrófoba las burbujas de aire tienen tendencia a "pegarse", es decir, a adherirse a la superficie sólida. Este es el principio básico de la flotación de minerales.

La flotación es una técnica de concentración que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral, o especies de valor, y la

ganga. Se basa en la adhesión de algunos sólidos, que son hidrofóbicos a burbujas de gas generadas en la pulpa por algún medio externo, en la celda de flotación. Las burbujas de aire transportan los sólidos a la superficie donde son recolectados y recuperados como concentrado. La fracción que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y constituye la cola o relave, la cual está constituida por partículas hidrofílicas. El mecanismo de adhesión de las partículas hidrofóbicas a la burbuja de aire es mostrado en la Figura 2.

El proceso se produce por la unión de una o más partículas hidrofóbicas a las burbujas en la celda. En la mayoría de los sistemas de flotación, la superficie de la partícula se torna hidrofóbica por la adsorción selectiva de los surfactantes llamados colectores.

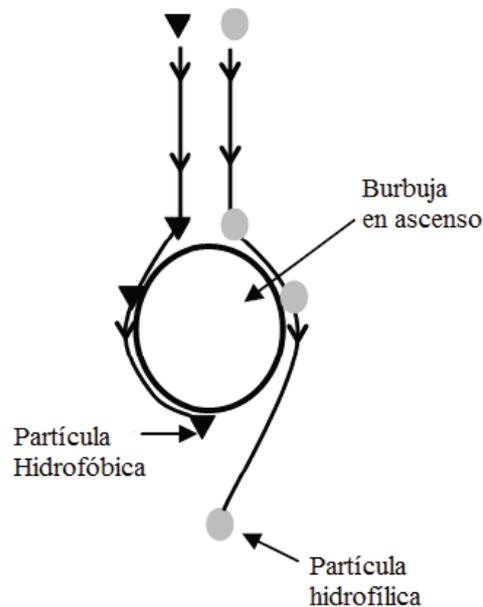


Figura 2. Ataque selectivo de burbujas de aire a partículas hidrofóbicas [34].

2.2. Medidas de Dispersión de gas

En el proceso de flotación las variables aero-hidrodinámicas que caracterizan la dispersión del gas en la pulpa y correlacionan el comportamiento metalúrgico son: el contenido de gas o gas holdup, la velocidad superficial de gas, la distribución de tamaño de burbuja y el flujo areal superficial de burbujas.

2.2.1. Gas Holdup

El gas holdup (ε_g) o contenido de aire corresponde a la fracción volumétrica de la celda ocupada por aire y se expresa en % [16].

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_t} * 100\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

ε_g : Gas Holdup [%]

V_g : Volumen de aire en celda [cm^3]

V_t : Volumen total de celda [cm^3]

El gas holdup es considerado uno de los más importantes parámetros en flotación, ya que se puede traducir en pistas sobre las condiciones hidrodinámicas en la operación de una columna o celda de flotación. Depende de factores químicos (tipo y concentración de espumante), operacionales (flujo de aire) y mecánicos (sistema de generación de burbujas).

El contenido de gas puede ser medido de diversas formas. Algunas de ellas son las mediciones por presión diferencial y conductividad que se explicarán a continuación.

2.2.1.1. Medición por presión

La medición por presión diferencial se puede utilizar si se conoce la densidad de la pulpa sin aire. Si se tienen dos medidas de presión a distinta profundidad dentro de la celda, se puede estimar el contenido de gas con la Ecuación 2 [4].

$$\varepsilon_g = \left(1 - \frac{\Delta P}{\rho_{SL} \cdot g \cdot L}\right) * 100\% \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la ecuación, L es la diferencia de altura entre las dos posiciones donde se miden las presiones, ΔP es la diferencia de presiones entre los dos puntos y ρ_{SL} es la densidad de la pulpa. En la Figura 3 puede observarse esquemáticamente los parámetros de la Ecuación 2.

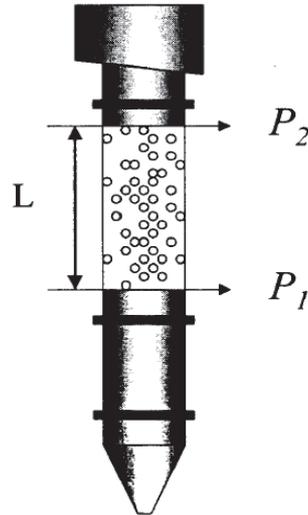


Figura 3. Medición de gas holdup por presión [4].

2.2.1.2. Medición por conductividad

La conductividad eléctrica es función de la concentración de diferentes fases en una dispersión. De acuerdo al modelo de Maxwell, cuando se tiene una dispersión (pulpa más aire), se puede determinar la concentración volumétrica de la fase no conductora, en este caso aire, si se sabe la conductividad de la dispersión y la conductividad de la pulpa. En la Figura 4 puede verse una descripción conceptual del modelo de Maxwell [4].

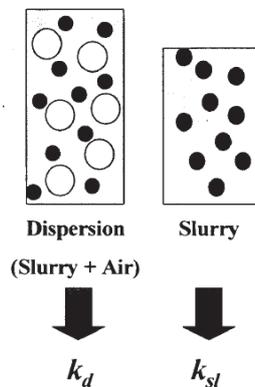


Figura 4. Medición de gas holdup por conductividad [4].

Así, el holdup de gas puede obtenerse de la siguiente relación, conocida como ecuación de Maxwell.

$$\varepsilon_g = \left(\frac{1 - \left(\frac{k_d}{k_{SL}}\right)}{1 + 0,5 \cdot \left(\frac{k_d}{k_{SL}}\right)} \right) * 100\% \quad (\text{Ecuación 3}).$$

Donde k_d es la conductividad de la dispersión (pulpa+aire) y k_{SL} la conductividad de la pulpa sin aire.

2.2.2. Velocidad superficial de gas

Corresponde al flujo volumétrico de gas por sección transversal de área en una celda de flotación. Es útil porque permite comparar columnas de diferentes diámetros, ya que representa un flujo normalizado por unidad de área [16].

$$J_g = \frac{Q_g}{A} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde

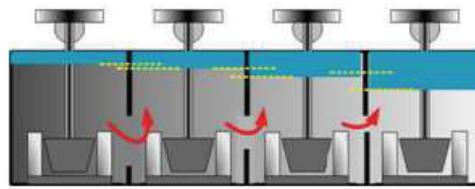
J_g : Velocidad Superficial de gas [cm/s]

Q_g : Flujo de aire [cm³/s]

A : Área transversal de la celda [cm²]

2.2.3. Flujo areal superficial de burbujas

El flujo areal superficial de burbujas (S_b), es un parámetro derivado de la dispersión de gas, comúnmente usado en flotación para correlacionar la razón de flotación con las variables hidrodinámicas. Es formalmente definido como el área superficial de burbujas por unidad de área transversal de la celda de flotación por unidad de tiempo [34]. Dependiendo del tipo de celda, se tienen distintos rangos de S_b , como lo muestra la Figura 5.



Celdas mecánicas industriales continuas

($30 < S_b < 80$)



Celdas columnares (20 < S_b < 80) continuas

Figura 5. Valores de S_b para celdas columnares y mecánicas [34].

La constante cinética de flotación ha sido correlacionada con el flujo areal superficial de burbujas, y es expresado, para la zona de pulpa, como:

$$k = PS_b \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde

P: Factor de flotabilidad

S_b : Flujo areal superficial del gas

K: Constante de razón de flotación

El parámetro P abarca la contribución del tamaño de partícula e hidrofobicidad. El gas holdup puede ser correlacionado con la constante, siguiendo la relación con S_b propuesta [9].

$$S_b = \frac{6 * J_g}{d_b} \approx 5,5 * \varepsilon_g \quad (\text{Ecuación 6})$$

Con S_b en s^{-1} y ε_g en %.

2.2.4. Distribución de tamaños de burbuja

La distribución de tamaños de burbuja (d_b) es un factor determinante en el proceso de flotación. En virtud del mecanismo de colisión de partículas y atrapamiento, las burbujas no deben ser ni excesivamente grandes o pequeñas. Cuando las burbujas son demasiado pequeñas, las partículas no tienen el tiempo de contacto suficiente para colisionar, o si la colisión ocurre, la flotabilidad de la burbujas puede ser muy baja para recuperación práctica. Por otro lado, mientras el tamaño de burbuja aumenta, aumenta la fuerza de las líneas de flujo, haciendo más dificultosa la colisión partícula-burbuja [1].

El tamaño medio de la burbuja esta principalmente influenciado por el flujo de gas, la presencia de espumante, el dispositivo de generación de burbujas y la presión de operación.

2.2.4.1. Efecto del espumante en el tamaño de burbuja

Los espumantes contribuyen a la reducción del tamaño de burbuja, sobrepasando cierta concentración. Una disminución en la coalescencia es la explicación de la reducción del tamaño de burbuja ante incrementos en la concentración del espumante. Después de cierta concentración, denominada como concentración crítica de coalescencia (CCC), se logra un tamaño de burbuja casi constante, con una coalescencia mínima, lo que se puede observar en la Figura 6. Los espumantes alcanzan la CCC a diferentes concentraciones.

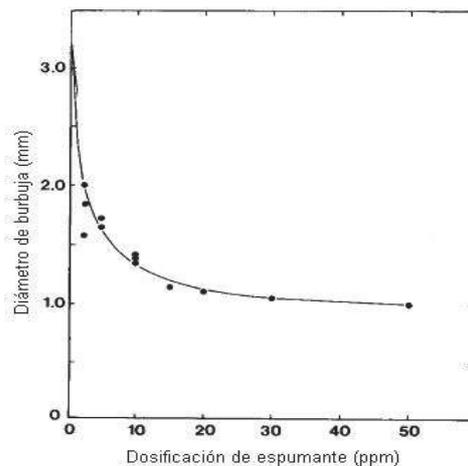


Figura 6. Tamaño de burbuja v/s concentración de espumante [6].

2.3. Equipos de flotación

La separación por flotación se lleva a cabo en máquinas donde se dispersa y distribuye aire o nitrógeno en forma de pequeñas burbujas. En las celdas de flotación se debe mantener la pulpa en estado de suspensión sin ocurrir sedimentación y se debe poder separar adecuadamente el concentrado del relave, entre otras características.

Las principales funciones de una celda de flotación son: [24]

- Mantener todas las partículas en suspensión dentro de las pulpas en forma efectiva, con el fin de prevenir la sedimentación de éstas.
- Producir una buena aireación, que permita la diseminación de burbujas de aire a través de la celda.
- Promover las colisiones y adhesiones de partícula-burbuja.
- Mantener quietud en la pulpa inmediatamente bajo la columna de espuma.
- Proveer un eficiente transporte de la pulpa alimentada a la celda, del concentrado y del relave.
- Proveer un mecanismo de control de la altura de la pulpa y de la espuma, la aireación de la pulpa y del grado de agitación, en el caso de celdas agitadas.

La eficiencia de las celdas de flotación se puede evaluar en base a diversos factores como el tonelaje que se puede tratar por unidad de volumen, la calidad de los productos obtenidos y recuperaciones, el consumo de energía eléctrica, reactivos, espumantes y otros reactivos, con el fin de obtener los resultados óptimos y el gasto de operación y mantención por tonelada de mineral tratado [11].

Las celdas pueden ser clasificadas en dos grandes familias: las celdas mecánicas o convencionales y las celdas columnares.

2.3.1. Celdas mecánicas

La celda mecánica está constituida por un depósito en forma de paralelepípedo, cubo o cilindro de distintas capacidades, con un mecanismo rotor-estator para la dispersión del sólido y el aire donde existe una gran agitación de la pulpa. Las

celdas se juntan en serie y forman un banco de flotación agrupándose de diferentes formas.

En la flotación de minerales pueden identificarse tres zonas en la celda como lo muestra la Figura 7.



Figura 7. Zonas típicas en una celda de flotación [24].

i) Zona de mezclado o de agitación: Se producen las colisiones para la adhesión partícula- burbuja. Las burbujas son generadas y dispersadas en la pulpa, llevando a cabo la colisión y formación del agregado partícula-burbuja. En esta zona deben existir las condiciones hidrodinámicas y fisicoquímicas que favorezcan este contacto.

ii) Zona intermedia o de mineralización: Se caracteriza por ser una zona de relativa calma, lo que favorece la migración de las burbujas hacia la parte superior de la celda. Las partículas hidrofóbicas adheridas a la burbuja se elevan hasta la superficie de la pulpa donde se acumulan para formar la zona de espuma. Las partículas hidrofílicas abandonan la celda como relave.

iii) Zona superior o de espuma: Está formada por burbujas separadas por finos canales de pulpa. En ella el agregado burbuja-partícula es transportado al tope de la celda de flotación y es colectado como concentrado. Por otro lado, las partículas hidrofóbicas se separan de la burbuja y las partículas desprendidas pueden drenar a través de la espuma hacia la zona de mineralización.

Según el tipo de aireación estas celdas se clasifican en auto aspirante si utiliza el vacío creado por el movimiento del rotor para inducir o succionar el aire desde la atmósfera hacia abajo por el tubo concéntrico alrededor del eje del rotor, o celdas con aire forzado que reciben aire desde un soplador.

2.3.2. Celdas columnares

Las celdas columnares son los equipos neumáticos más usados en la industria en especial en etapas de limpieza de concentrado, desde su aparición a nivel industrial en 1961 [27]. Se caracterizan por la producción de concentrados de mayor ley que las celdas mecánicas aunque con una recuperación menor. Esto proviene de la mejora que se consigue en la selectividad combinada con el lavado de espuma, que remueve la ganga arrastrada que generalmente está asociada con la pulpa de alimentación. La introducción del agua asegura que cualquier partícula de ganga liberada será reportada preferencialmente a la cola de la columna.

Pueden ser cilíndricas o estar compuestas por secciones cuadradas o rectangulares. Un esquema de este tipo de celda se muestra en la Figura 8.

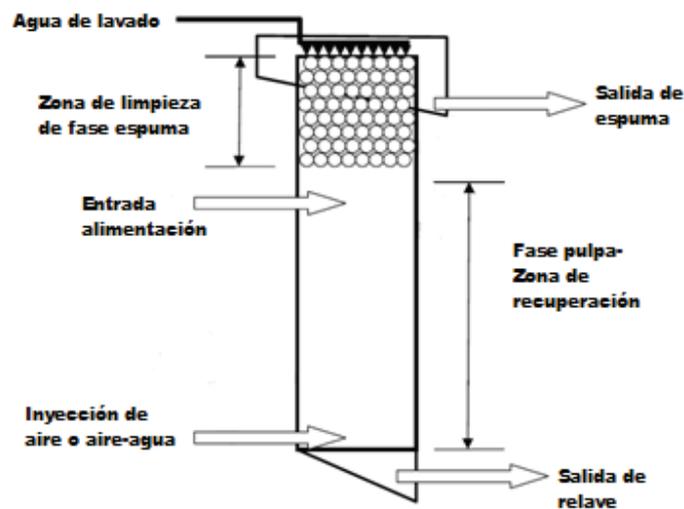


Figura 8 .Esquema de una celda de flotación columnar [12].

En las celdas columnares se pueden distinguir dos zonas: una zona de colección y otra de limpieza. La zona de colección va desde la entrada del aire

hasta la interfase pulpa-espuma, mientras que la zona de limpieza desde la interfase pulpa-espuma hasta el rebalse de espuma [33].

No se entrará en mayor detalle en este tipo de celda, pues el estudio se centrará en las celdas mecánicas, descritas anteriormente.

2.4. Reactivos de flotación

Existen distintos tipos de reactivos utilizados en el proceso de flotación de minerales, entre los cuales destacan los colectores, los espumantes y los modificadores.

2.4.1. Colectores

Los colectores son sustancias orgánicas cuyo anión o catión tiene una estructura integrada por una parte polar y otra apolar. La parte polar del ión se adsorbe en la superficie del mineral. Por otro lado, la parte apolar, constituida por una cadena de hidrocarburos, queda orientada hacia la fase acuosa, dando el carácter hidrófobo al mineral como lo muestra la Figura 9 [33].

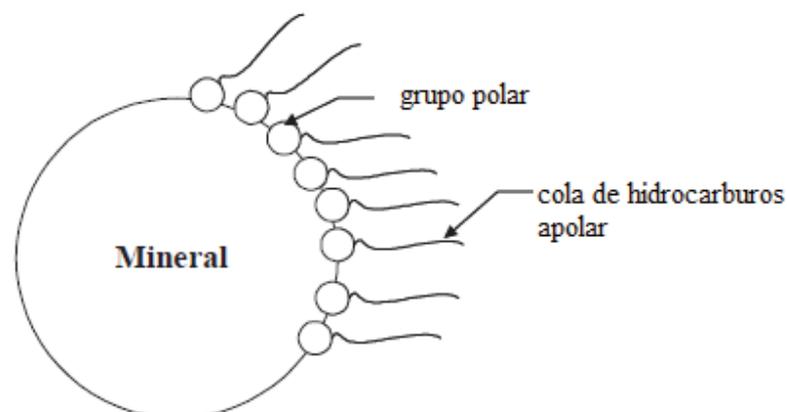


Figura 9. Adhesión del colector a la superficie del mineral [33].

El largo de la cadena de hidrocarburos está asociado a la mayor o menor repelencia al agua. La parte que se adhiere al mineral dará la fuerza y selectividad. Lo anterior explica la diferencia de comportamiento de los diferentes colectores. Por lo tanto, la colección estará íntimamente condicionada por la

naturaleza de la superficie del mineral y la estructura química del colector. La unión química entre el colector y el mineral deberá ser más fuerte que la que pueda existir entre el mineral y el agua.

2.4.2. Modificadores

Tienen como función mejorar las condiciones de colección y/o la selectividad del proceso. En esta categoría se incluyen [16]:

- Activadores: Aumentan la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales para fortalecer el enlace entre la superficie y el colector.
- Depresantes: Disminuyen la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarla.
- Reguladores de pH: Se agrega para operar en medio alcalino o ácido. En el primer caso se utiliza soda ash, cal o soda caústica, mientras que en el segundo caso se usa ácido sulfúrico.

2.4.3. Espumantes

Los espumantes son agentes tenso-activos o surfactantes que consisten en una parte polar (hidrofílica) y una parte apolar (hidrofóbica). La parte apolar es una cadena hidrocarbonada y la parte polar es típicamente un grupo OH. En la superficie de la burbuja (interfase aire-agua), la cadena hidrocarbonada se orienta hacia el lado del aire y el grupo polar hacia el lado del agua. La estabilidad de la burbuja contra la coalescencia es incrementada por la fuerte interacción del grupo polar/dipolo del agua (hidratación) en la interfase aire-líquido, que produce la capa de enlace [2].

Su estructura heteropolar causa preferencia en la adsorción en la interfase agua-aire. En el momento de la generación de burbujas, las moléculas de espumante se adsorben en la superficie de las burbujas con la cadena hidrocarbonada en el lado del aire y el grupo polar en el lado del agua donde su hidrógeno enlaza con las moléculas de agua [18].

Tienen la capacidad de reducir el tamaño de burbuja previniendo la coalescencia [3] y generar una espuma estable capaz de contener el mineral enriquecido captado por las burbujas. La Figura 10 muestra la acción del espumante en la formación de burbujas.

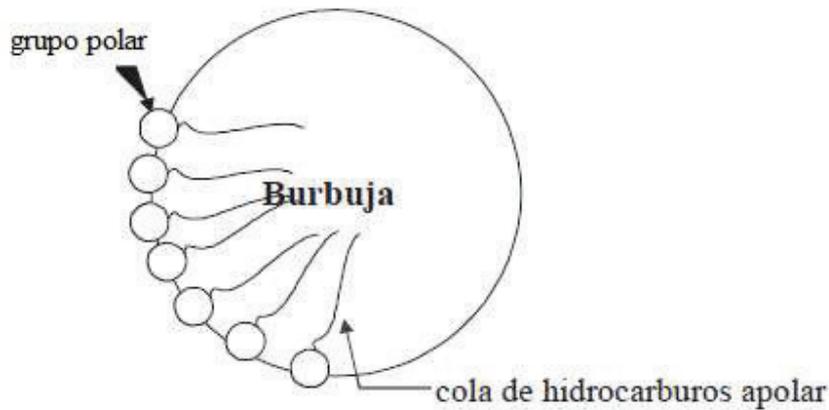


Figura 10. Adhesión del espumante a la partícula de aire [33].

Una manifestación de la adsorción en la burbuja es la disminución de la tensión superficial con un incremento en la concentración de sólidos. El cambio en la tensión superficial está relacionado con la densidad de adsorción definida por la ecuación de Gibbs (Ecuación 7).

$$\Gamma = \frac{-C}{RT} * \frac{d\sigma}{dC} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Γ : Concentración en exceso de moléculas adsorbidas en la interfase (densidad de adsorción).

C: Concentración del bulk de moléculas de soluto.

σ : Tensión superficial.

R: Constante de los gases

T: Temperatura absoluta.

La disminución de la tensión superficial también previene la coalescencia por la formación de los puentes de hidrógeno con las moléculas de agua, provocando la estabilización de una capa o "film" de agua alrededor de la burbuja. Este film resiste el drenaje y esto retarda la coalescencia [9].

Esta capa de agua está dividida en dos partes (Figura 11):

- Una capa que fluye libremente, como una capa más débil.
- Una capa límite o película capilar, provee a la burbuja un límite estable.

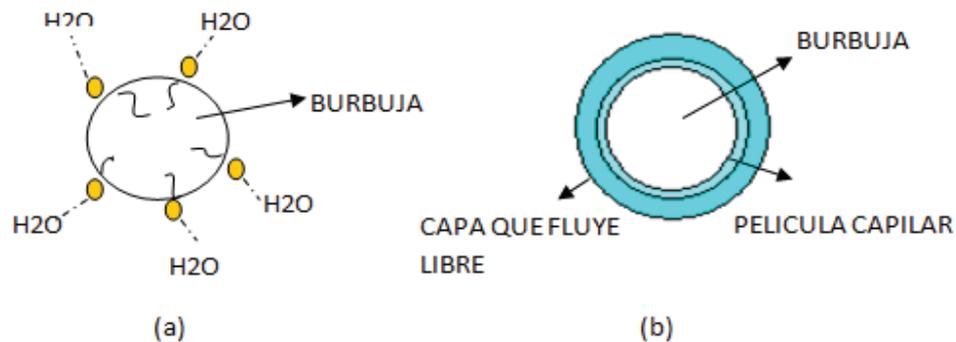


Figura 11. (a) Moléculas de espumante adsorbidas en la superficie de la burbuja y los puentes de hidrógeno resultantes (b) capa de agua sobre la burbuja [12].

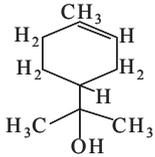
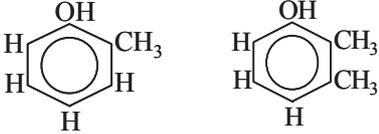
Las características más importantes al momento de elegir un espumante son [6]:

- Producir una espuma que permita una buena separación del mineral de interés de los que conforman la ganga.
- Debe formar una espuma lo suficientemente estable para soportar el peso del mineral y suficientemente móvil para transportarlo a la descarga de la celda.
- La espuma debe ser lo suficientemente persistente para que las burbujas al romperse se vuelvan a formar continuamente, para que de esa forma el agua y la ganga tengan la posibilidad de drenar.
- El espumante debe ser capaz de formar de nuevo espuma si se introduce aire nuevamente en las siguientes etapas de flotación.
- Deben tener una baja sensibilidad a los cambios de pH, a los colectores y sales contenidas en la pulpa de flotación.
- Económicos, aptos para escala industrial y ambientalmente amigables.
- Que se dispersen en medios acuosos (no necesariamente que sean totalmente solubles).
- Que no presente propiedades colectoras
- Ser capaces de generar burbujas pequeñas de 1 a 2 [mm] [33].

Existen tres grupos de espumantes utilizados en la industria, como se muestra en la Tabla 1:

- Alcoholes: Son considerados espumantes débiles teniendo una baja actividad superficial. Con cinéticas rápidas (i.e. rápida recuperación de partículas), espuma menos estable, baja retención de agua, mayor selectividad y baja persistencia [1]. La actividad superficial de los espumantes alcoholes aumentan cuando aumenta el largo de la cadena, con un máximo alrededor de seis a siete carbonos [34]. Pueden identificarse en este grupo los alcoholes alifáticos lineales y ramificados, cíclicos y aromáticos. La preferencia en el uso de alcoholes cíclicos sobre los lineales es cuando se requiere de una espuma más persistente, es decir perdura en el tiempo, incluso más allá de la operación.
- Poliglicoles: Éstos forman una familia de gran variedad de estructura y pesos moleculares. Cuando el peso molecular aumenta, aumenta la recuperación de agua. Se logra una buena profundidad de espuma, una espuma más estable y persistente comparada a la lograda con alcoholes, una baja sensibilidad a los cambios de pH y una alta retención de agua por lo que produce una espuma más húmeda (mayor arrastre de agua) [18].

Tabla 1. Clasificación química de espumantes [1].

Espumantes	Fórmula	Solubilidad en Agua
<ul style="list-style-type: none"> Alcoholes Alifáticos <p>Metil isobutil carbinol (MIBC)</p> <p>2-Etil hexanol</p>	<p>R-OH</p> <p>-R= C_nH_{2n+1}</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{CHCH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{OH} \end{array}$ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{CH}_3$	<p>Baja</p> <p>Baja</p>
<ul style="list-style-type: none"> Alcoholes Cíclicos <p>α-Terpinol (C₁₀H₁₇OH)</p>		<p>Baja</p>
<ul style="list-style-type: none"> Alcoholes Aromáticos <p>Ácido Creólico (mezcla de cresoles y xilenoles)</p>	 <p>o-Cresol 2,3-Xylenol</p>	<p>Baja</p>
<ul style="list-style-type: none"> Poliglicoles <p>Dowfroth 250</p> <p>Dowfroth 1012</p> <p>Aerofroth 65 (Dowfroth 400)</p>	<p>R' (X)_nOH con: R'=H o C_nH_{2n+1} X=EO, PO ó BO BO= C₄H₈O</p> <p>CH₃(PO)₄OH</p> <p>CH₃(PO)_{6,3}OH</p> <p>CH₃(PO)_{6,5}OH con PO=C₃H₆O</p>	<p>Total</p> <p>Total</p> <p>Total</p>

Los espumantes tienen un reconocido efecto en el tamaño de burbuja (d_b) [28], parámetro esencial en la eficiencia de contacto partícula-burbuja. Así, las burbujas muy pequeñas tienen un tiempo de contacto muy corto y no se logra formar el agregado partícula-burbuja, y las partículas muy grandes dificultan la colisión partícula-burbuja por el aumento en la fuerza de la capa límite de la burbuja.

Hay muchos términos usados para describir las características de la espuma de flotación, por ejemplo, estable, efervescente, persistente, selectiva, móvil, seca o húmeda entre otros. Desde el punto de vista del operador, es probablemente suficiente para considerar la espuma en dos categorías [6]:

- Espumas en las que la película de la burbuja es relativamente delgada. Tales espumante tienden a llevar menos agua (son secas), a arrastrar menos ganga (son selectivas), y son relativamente menos estables y persistentes.
- Espumas donde la película de la burbuja es relativamente gruesa. Tales espumantes tienden a llevar más agua al concentrado (son húmedos), a arrastrar más ganga y a ser relativamente estables y persistentes.

2.5. Arrastre de partículas en la flotación

La flotación de minerales se lleva a cabo por dos mecanismos, que son la flotación verdadera y la flotación por arrastre.

La flotación verdadera ocurre cuando las partículas se unen a las burbujas de aire en la pulpa agitada y aireada y las burbujas mineralizadas ascienden y alcanzan la base de la espuma. Las burbujas continúan subiendo, volviéndose más grandes por coalescencia hasta alcanzar la cima de la espuma y son colectadas llevando su carga de partículas unidas a ellas [28].

La flotación por arrastre puede llevar al concentrado tanto partículas hidrofílicas como hidrofóbicas. El arrastre de partículas hidrofílicas al concentrado en la ascensión de la burbuja aumenta por ejemplo, con la adición de ganga en la alimentación [25] y ocurre por dos mecanismos como muestra la Figura 12:

- El transporte interno de agua en la burbuja (arrastre)
- Recuperación por la vía de colección con las burbujas de aire (atrapamiento):

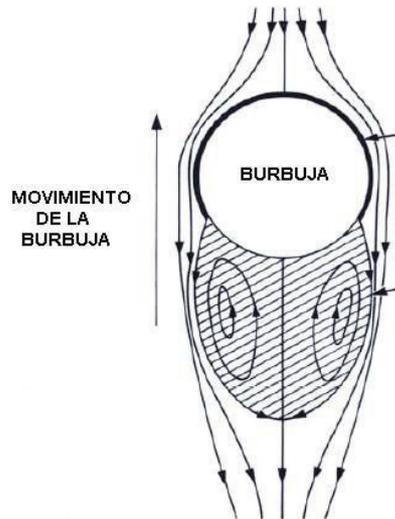


Figura 12. Ascenso de una burbuja con la capa de agua ligada y la turbulencia a su paso [28].

A la vez, el transporte de agua a la espuma tiene dos fuentes que son el aumento del film de agua que rodea a la burbuja y el agua transportada por el ascenso de la burbuja de aire, mecanismos usados para explicar este fenómeno.

Cada una de estas burbujas empuja agua y partículas tanto de ganga como de la especie de interés a la espuma. Las partículas más susceptibles a ser llevadas a la fase espuma por estos mecanismos son las fracciones de la alimentación más finas, mientras que no es relevante en los tamaños de sólido más grueso [30]. Sin embargo, desde la espuma puede retornar material a la pulpa por drenaje a través de distintas partes que forman la estructura de la espuma como lo muestra la Figura 13.

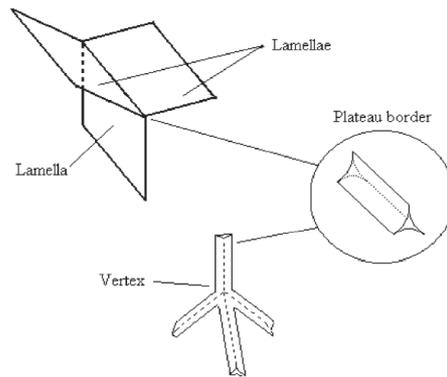


Figura 13. Estructura de la espuma [31].

En una espuma común, las burbujas toman forma poliedral, en la cual films delgados son las caras (lamellae) de las burbujas. Los films delgados se juntan en tres líneas en un ángulo de 120° (plateau borders) y éstos a su vez se juntan en un ángulo de $109,6^\circ$ para formar los vértices. Las lamellae corresponden a los films delgados de agua que separan dos burbujas adyacentes, mientras los plateau borders son el canal como resultado de la intersección de tres lamellae. (Figura 13). La intersección de cuatro plateau borders forman los vértices.

Los procesos que toman lugar en una espuma son el drenaje, la ruptura de film en la superficie y coalescencia y difusión. El drenaje de líquidos desde los films y plateau borders es influenciado por la acción de la gravedad y de fuerzas capilares. El líquido fluye desde los films hacia los plateau borders debido a la diferencia en la curvatura y desde allí a los vértices. Esto produce adelgazamiento del film que puede resultar en la ruptura de los films llevando a la coalescencia de dos burbujas adyacentes [31].

En la espuma, el líquido es encontrado principalmente en los plateau borders, los cuales forman una red continua, viéndose que tienen una forma más curva en la interfase gas-líquido que las lamellae. Esto significa que la tensión superficial causa una presión del líquido en los plateau borders más baja que en las lamellae, y esto lleva el líquido fuera de las lamellae. Siendo las lamellae muy delgadas comparadas con los plateau borders, casi todo el drenaje ocurre en los plateau borders [22].

Las mismas fuerzas que previenen coalescencia y mantienen una dispersión fina de burbujas en la zona de pulpa también promueven la formación de una espuma estable. En los sistemas de flotación, las partículas pegadas a la burbuja

evidentemente promueven la estabilidad de la espuma. En efecto, sin sólido raramente se forma espuma a las dosis de espumante usadas en la práctica. Las partículas pueden ser consideradas físicamente como bloqueo del drenaje de agua, la cual puede ser modelada como un incremento en la viscosidad del film interburbuja [19].

La importancia del control del transporte de agua a la espuma radica en que ésta también controla la cantidad de ganga que se arrastra, influyendo directamente en la recuperación total del proceso. En la zona de colección el agua es arrastrada como una capa en la superficie de la burbuja y además como un arrastre tras la burbuja. Puesto que el agua no es selectiva al arrastrar partículas, la cantidad de agua recuperada en el concentrado tiene un mayor impacto en la recuperación de ganga y en la ley final del concentrado ([28], [30], [32]). Los espumantes comercializados para la flotación al ser heteropolares afectan directamente en el agua arrastrada, es decir, hay una dependencia entre tipo de espumante y arrastre de agua. Por lo tanto es irremediable que a consecuencia del arrastre de agua ocurra un arrastre de partículas hidrofílicas no deseables (ganga) [13].

Moyo [20] sugirió un método para caracterizar espumantes basado en la tasa de agua llevada al concentrado usando el holdup de gas como la variable a correlacionar, el cual combina el efecto del tamaño de burbuja y velocidad del gas en el transporte de agua. Se descubrió que los espumantes comunes pueden ser agrupados en cuatro clases o familias basadas en el gas holdup versus la tasa de transporte de agua J_{w0} como lo muestra la Figura 14.

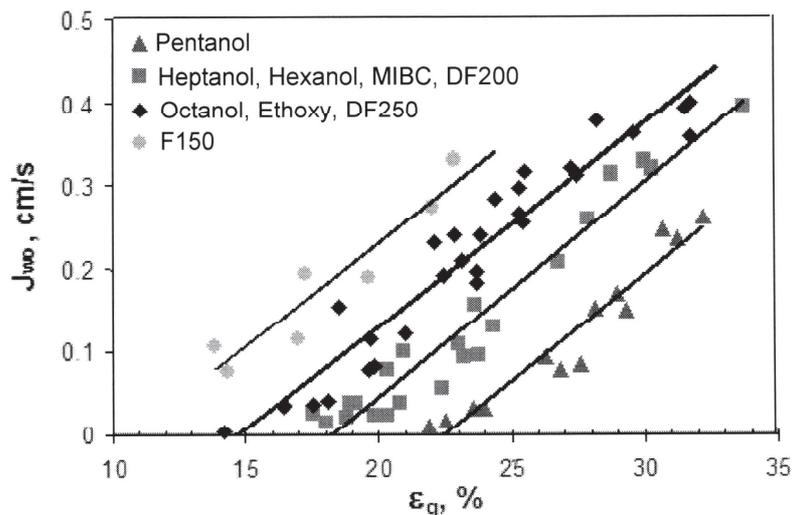


Figura 14. Clasificación de espumantes basado en la velocidad de transporte de agua [20].

Según Konopacka y Drzymala (2010) [15], hay cinco tipos de curvas de recuperación de agua versus recuperación de partículas por arrastre. La forma de estas curvas depende de muchos factores. Los más importantes son el tipo de flotación (batch o continua, la velocidad y tiempo de colección de espuma, propiedades de la espuma controladas por la dosis de espumante y velocidad del aire. Los cinco tipos de curvas pueden ser clasificados en lineal (Tipo 1), lineal desplazada hacia abajo (Tipo 2), creciente con estanco (Tipo 3), creciente (Tipo 4) y lineal desplazada hacia arriba (Tipo 5). Todas las caracterizaciones se harán a continuación y se muestran en la Figura 15. [15]

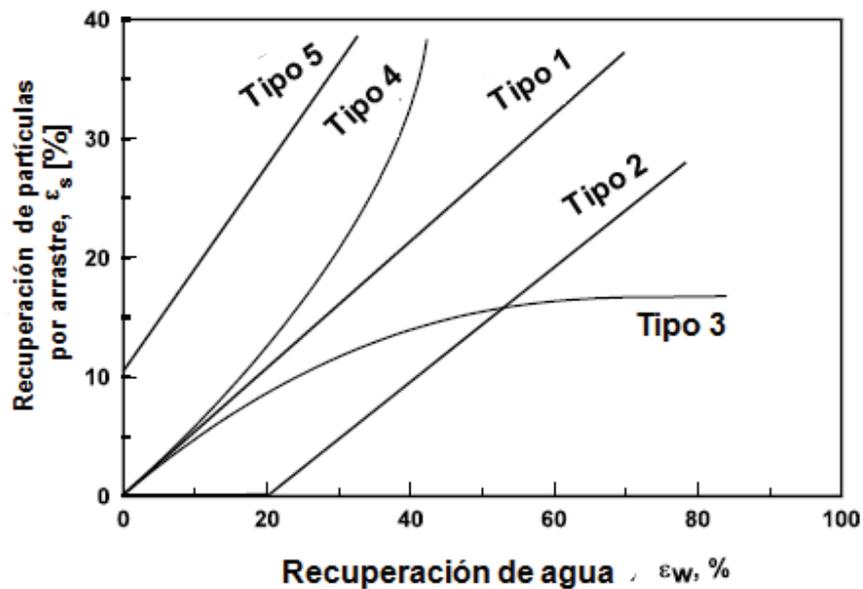


Figura 15. Formas de gráficos de arrastre [15].

- Tipo 1

Se caracteriza por un carácter lineal de la curva de recuperación de partículas finas versus recuperación de agua en el concentrado, que comienza desde el origen del gráfico (Figura 16). De acuerdo a Warren (1989), el arrastre de finos (ϵ_s) cuando la recuperación de partículas es lineal a la recuperación de agua (ϵ_w) puede ser caracterizado con la ecuación 8:

$$\epsilon_s = e \cdot \epsilon_w \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde e denota el coeficiente adimensional de arrastre (independiente de ε_s y ε_w), ε_s recuperación de partículas arrastradas en el concentrado y ε_w recuperación de agua arrastrada en la espuma. Mientras la recuperación de partículas es menor que la recuperación de agua, el factor e está en el rango de 0 a 1.

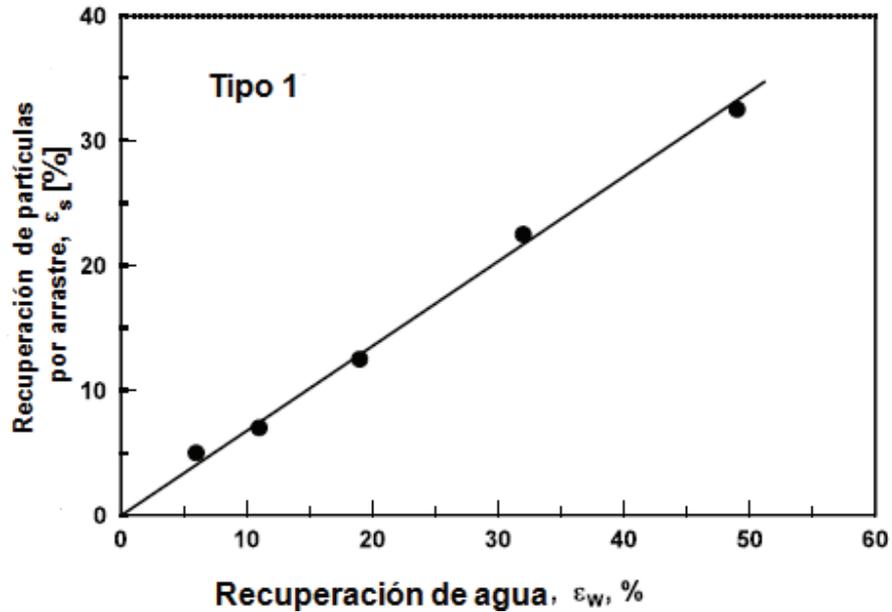


Figura 16. Arrastre de cuarzo ($<5 \mu\text{m}$) observado para 27% de contenido de sólidos en la alimentación en presencia de espumante PPG400. Adaptado de Trahar (1981). [15]

- Tipo 2

A veces las curvas ε_s versus ε_w se presentan como una relación lineal pero ésta está movida respecto al origen del gráfico (Figura 17). Este es el tipo 2 de las curvas de arrastre. Usualmente sucede cuando la alimentación contiene partículas gruesas y la altura de espuma es baja.

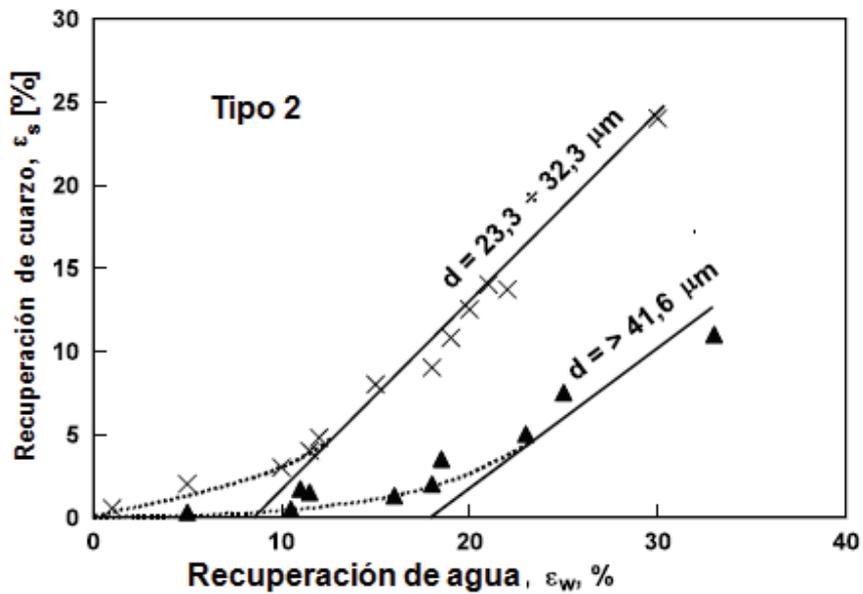


Figura 17. Recuperación de diferentes tamaños de partículas de cuarzo como función de la recuperación de agua obtenida en presencia de Dowfrtoh 250. Flotación continua hecha en una máquina de flotación equipada con una celda de flotación de 30 [dm³]. Adaptado de Egelbrecht y Woodburn (1975). [15]

- Tipo 3

Otro tipo de relación entre ε_s versus ε_w para arrastre de partículas durante la flotación es representado por curvas crecientes que finalmente se estancan (Figura 18). Este es el tipo 3 de las curvas de arrastre. Este tipo de curva de arrastre ocurre usualmente cuando la concentración de espumante es pequeña y la alimentación contiene partículas gruesas. Además, en la flotación batch, con agua continuamente agregada o recirculación para mantener constante el nivel de agua en la celda provee estas curvas.

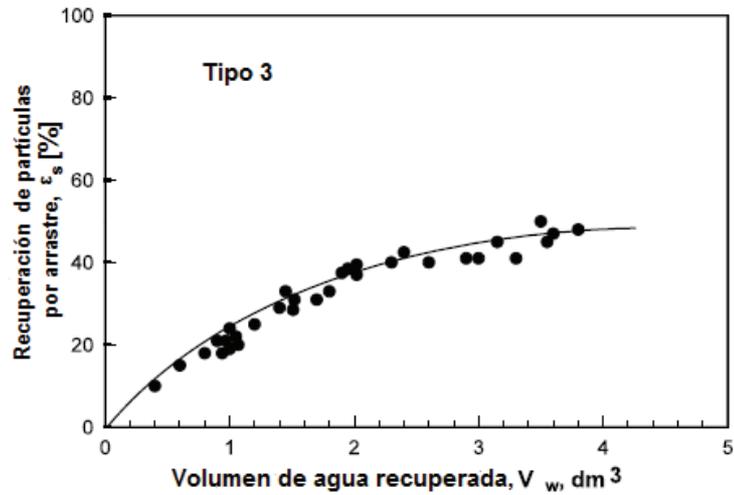


Figura 18. Tipo 3 de curva de separación por arrastre. Resultados de flotación batch con adición de agua para cuarzo -40 $[\mu\text{m}]$ en presencia de espumante PPG en una máquina de laboratorio Denver (3 $[\text{dm}^3]$). Adaptado de Kirjavainen (1989). [15]

- Tipo 4

La curva de arrastre expresada como recuperación de partículas versus recuperación de agua puede ser parabólica. Esto representa el tipo 4 de las curvas de arrastre (Figura 19).

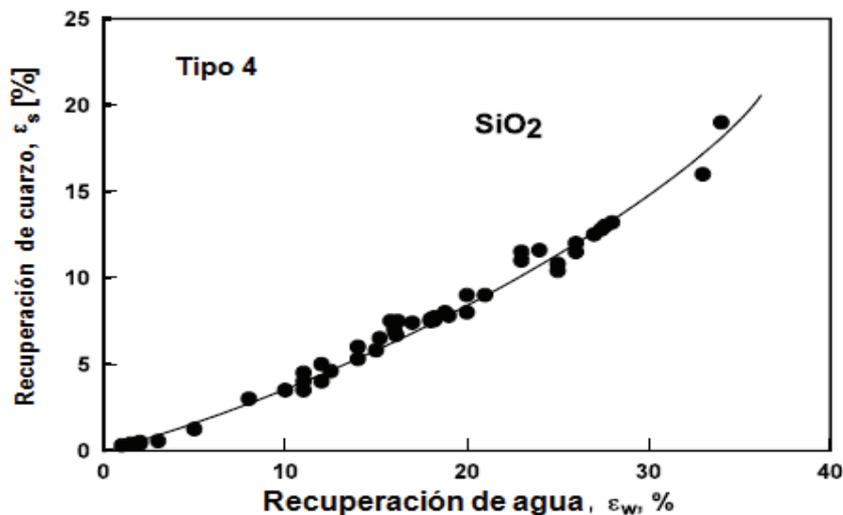


Figura 19. Relación entre recuperación de partículas de cuarzo y recuperación de agua. La relación representa el tipo 4 de curva de separación por arrastre. Los experimentos fueron llevados en una máquina de flotación equipada con una celda de flotación de 30 $[\text{dm}^3]$. Espumante: Dowfroth 250. Adaptado de Egelbrecht y Woodburn (1975). [15]

- Tipo 5

El tipo 5 de las curvas de arrastre se obtiene en sistemas de flotación en el cual las partículas flotan por arrastre y flotación verdadera. El intercepto de la línea de recuperación de partículas con el eje Y indica la recuperación debido a flotación verdadera. La forma de esta curva se muestra en la Figura 20.

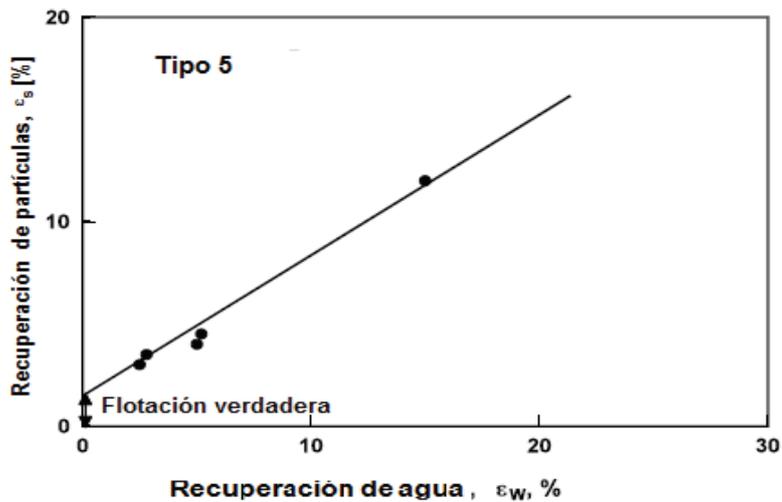


Figura 20. Tipo 5 de curvas de separación por arrastre para relacionar la recuperación de partículas y la recuperación de agua. Adaptado de Warren (1985). [15]

La relación entre recuperación de agua y recuperación por arrastre fue estudiada por Trahar [30], que es el tipo 1 de las curvas de arrastre según la clasificación anterior. La tendencia puede observarse en la Figura 21, la cual indica una relación lineal entre la recuperación de cuarzo bajo 5 μm (hidrofílico) y la recuperación de agua variando la densidad de la pulpa (16-27%) y la concentración de espumante (2,5-6 ppm), lo cual se traduce en una relación proporcional entre la recuperación por arrastre de ganga y la recuperación de ganga.

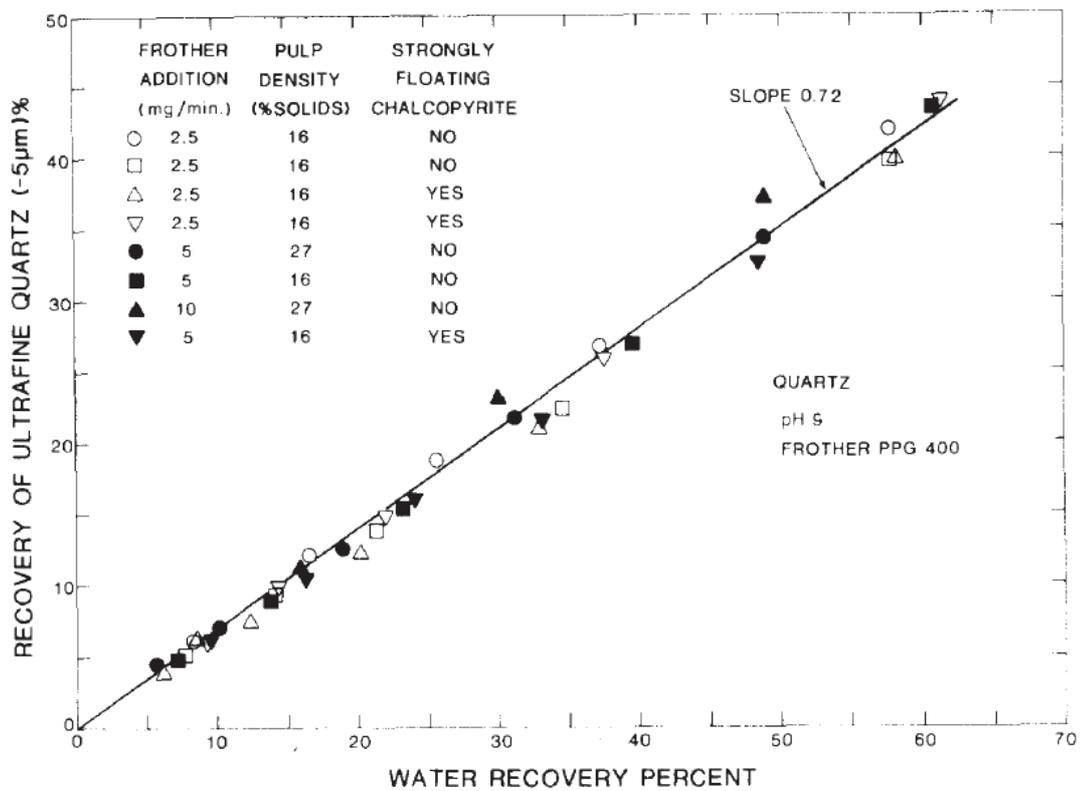


Figura 21. Recuperación de agua vs. Recuperación de ganga [30].

Según Trahar [30], la recuperación de cuarzo fino estaba relacionada con el flujo de agua al concentrado, más que la cantidad de espumante (Figura 21) y el tipo de espumante (Figura 22). Estas pruebas se realizaron en presencia de pirrotita fuertemente flotable y diferentes espumantes (MIBC, PPG 400, DAA).

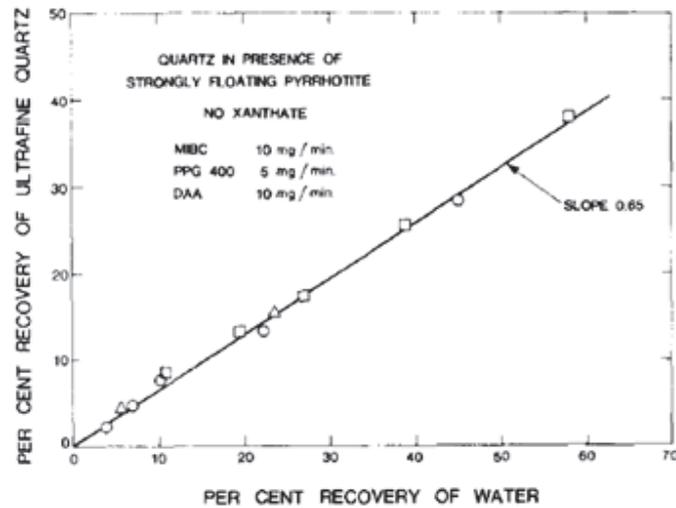


Figura 22. Recuperación de cuarzo fino (<5 μm) por arrastre comparado con la recuperación de agua (\circ = MIBC; \blacksquare = PPG; \triangle = DAA) [30].

Son diversos los factores que pueden aumentar o disminuir este efecto. A continuación se verán las distintas variables que afectan la recuperación de agua y por ende la recuperación de partículas hidrofílicas.

2.5.1. Efecto del flujo de gas en el transporte de agua y arrastre de partículas

Un incremento de la cantidad de gas ingresado a la celda de flotación resulta en un aumento del número de burbujas que cruzan la interfase entre la zona de colección y de espuma. Cada una de estas burbujas empuja más agua y partículas de ganga a la espuma. El aumento del flujo de gas provoca un efecto en la distribución de tamaño de las burbujas o en el espesor efectivo del límite de la capa. Altos flujos de gas están asociados con mayor turbulencia y un mayor contenido de agua en la espuma, permitiendo que partículas drenen más fácilmente. No obstante, generalmente el conjunto de agua recuperada y el arrastre de partículas se incrementan con el flujo de gas, lo que hace decrecer la ley del concentrado [35].

2.5.2. Efecto de la profundidad de espuma en el arrastre de partículas

Generalmente en circuitos industriales de flotación la profundidad de espuma depende del objetivo de la etapa de flotación [17]. Variando esta altura se puede obtener un control en la ley del concentrado. Un incremento de la profundidad

provoca un aumento del tiempo de residencia de las burbujas en la espuma, con mayor drenaje de partículas gruesas, y por lo tanto, un menor grado de arrastre [17]. Además, a una recuperación de agua constante, el arrastre hidráulico es minimizado aumentando el flujo de gas y la profundidad de espuma.

En general, las espumas gruesas aumentan el rechazo de partículas hidrofílicas de ganga desde la espuma, mejorando la selectividad.

2.5.3. Efecto del tamaño de partícula sobre el arrastre de sólidos

La recuperación de partículas finas por arrastre a la espuma en el proceso de flotación ha atraído la atención durante varios años. Aunque se implementen mecanismos para disminuir el arrastre, éstos siempre están limitados por el tamaño inferior de las partículas afectando la eficiencia de separación. Existe una relación cualitativa pero clara y fundamental entre el grado de hidrofobicidad necesario para la flotación y el tamaño de partícula.

La Figura 23 muestra una curva de recuperación basada en tamaño de partículas que representa el arrastre de cuarzo en una prueba de flotación batch con la ausencia y presencia de material fuertemente flotable como es la calcopirita [30].

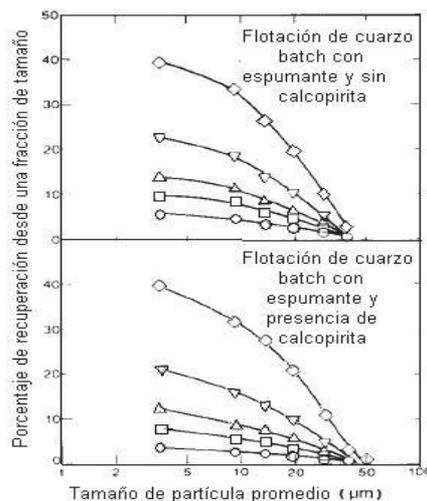


Figura 23. Recuperación de cuarzo por arrastre en la presencia y ausencia de calcopirita [30].

2.5.4. Efecto del tipo y concentración de espumante en el transporte de agua

El tipo y concentración de espumante afecta el espesor de la película de agua. Finch, Gelinas y Moyo [8] midieron el espesor de la película de agua de una burbuja de aire en solución de dos espumantes industriales, MIBC y Dowfroth 250. Descubrieron que Dowfroth 250 genera una película de agua más grueso que MIBC como se observa en la Figura 24. La diferencia fue atribuida a la estructura molecular de los espumantes que influencia la manera en que los enlaces de hidrógeno se ordenan con las moléculas de agua, llevando más agua al concentrado con el grosor de la película de agua.

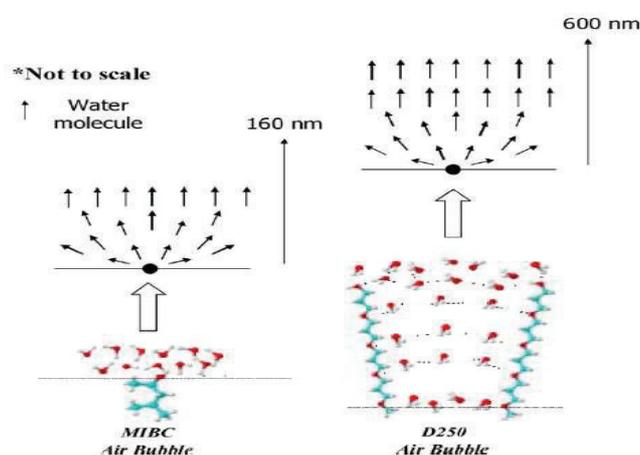


Figura 24. Interpretación de la formación del espesor de agua en presencia de espumante [8].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Materiales

3.1.1. Muestras

3.1.1.1. Sílice

Se utilizó sílice, la cual se preparó pasándola inicialmente bajo malla #6 en un chancador para dejarla posteriormente con un 90% bajo malla #400. Esto se obtuvo en un tiempo de siete minutos en el pulverizador. Se realizó granulometría láser para determinar el d_{50} de las muestras de alimentación y la composición se obtuvo por análisis químico y difracción de rayos X. Los resultados de éstos se encuentran en la sección anexos, Tabla A.3 y Figura B.2 respectivamente.

3.1.1.2. Concentrado

Se utilizó concentrado correspondiente a concentrado final de la planta Las Tórtolas de Anglo American Chile. Se realizaron dos análisis para la caracterización de la muestra: difracción por rayos X y análisis químico. De la difracción se puede observar la calcopirita como especie predominante, junto a compuestos sulfurados como piritita y silicatos (cuarzo), entre otros. Del análisis químico se obtuvo una ley de cobre de la muestra de 29,3%. Estos análisis por difracción de rayos X y análisis químico pueden verse en la Figura B.1 y la Tabla A.2 de los anexos respectivamente.

3.1.2. Reactivos

Los espumantes utilizados en este trabajo de titulación fueron seleccionados de forma que se expusieran las propiedades de los extremos químicos de cada familia de espumante. Basándose en sus composiciones químicas se seleccionaron los siguientes espumantes producidos por CYTEC Chile Limitada o Sigma Aldrich mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de reactivos utilizados

Espumante	Características	
1- Hexanol	Composición	Hexanol 98%
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	156-157°C
	Gravedad Específica	0,814 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
OREPREP® X-133	Composición	Mezcla de alcoholes, aldehídos pesados, ésteres y glicoles.
	Color	Paja a café
	Aspecto	Líquido

	T° de Ebullición	
	Gravedad Específica	0,89-0,95 a 25 °C
	Proveedor	Cytec Chile.
1- Heptanol	Composición	Heptanol 98%
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	176°C
	Gravedad Específica	0,822 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
1-Octanol	Composición	Octanol $\geq 99\%$
	Color	incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	196°C
	Gravedad Específica	0,827 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
AEROFROTH ® 70	Composición	Metil Isobutil Carbinol, mezcla de alcohol alifático, butanol
	Color	Ambar oscuro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	
	Gravedad Específica	0,854- 0,95 a 25°C
	Proveedor	Cytec Chile.
1- Pentanol	Composición	Pentanol $\geq 99\%$
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	136-138°C
	Gravedad Específica	0,811 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
MIBC	Composición	4 –Metil 2-pentanol 98%
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	138°C
	Gravedad Específica	0,802 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
Polietilenglicol 200	Composición	Pentanol $\geq 99\%$
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	
	Gravedad	1,124 a 20°C

	Específica	
	Proveedor	Sigma Aldrich
Polietilenglicol 400	Composición	Polietilenglicol
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	
	Gravedad Específica	1,126 a 20°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
Polietilenglicol 300	Composición	Polietilenglicol
	Color	Incoloro
	Aspecto	Líquido
	T° de Ebullición	220°C
	Gravedad Específica	1,125 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich

Además se utilizó colector xantato, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de colector utilizado.

Nombre comercial	Aero 343 xanthate
Composición	Sodium isopropil xanthate
Aspecto	Pellets o polvo
Color	Amarillo pálido a verde
Gravedad Específica	1,35 a 20°C
Proveedor	Cytec.

Para el ajuste de pH se contó con cal apagada (hidróxido de calcio).

3.2. Equipos y mediciones

3.2.1. Equipos

Se utilizó la siguiente instrumentación en el desarrollo experimental de este trabajo. El esquema de instalación de éstos se ve representado en la Figura 25, a excepción del equipo de granulometría láser.

- 1) Medidor de conductividad modificado: Se diseñó un dispositivo en el laboratorio, que consiste en un medidor de conductividad-temperatura marca Extech 407303 con un rango de medición de 0,1 [mS] a 20 [mS], con la adición de dos cables caimanes unidos a los carbones del electrodo. Estos caimanes fueron conectados a dos pernos metálicos para medir la conductividad dentro de la celda, pues el utilizar directamente el electrodo en la celda generaba que la medición se viera interferida por el ingreso de burbujas a él.
- 2) Bomba Peristáltica: Se utilizó una bomba con variador de frecuencia para el ingreso del agua de lavado desde un recipiente anexo a la celda de flotación.
- 3) Recipiente de agua de lavado: Para alimentar por costado izquierdo a la celda bajo el nivel de espuma. Se utilizó agua con igual concentración de espumante que la celda.
- 4) Celda mecánica de flotación: Se utilizó una celda Labtech-ESSA de diseño cuadrado de 20 cm de lado de acrílico con agitación mecánica y con inyección de aire forzado. Su capacidad es de 5 [lts] y presenta dos orificios en el costado izquierdo para el ingreso de agua de lavado. La celda además cuenta con difusores radiales en su base para mejorar el mezclamiento. El área de la celda, medida en la región interfase pulpa-espuma, corresponde a 397 [cm²].
- 5) Variador de rpm: La celda cuenta con un variador de las rpm del impeller. Corresponde a un sensor digital para medir la velocidad de agitación con una precisión, informada por el fabricante de +/- 2%. La velocidad máxima de agitación es de 1200 [rpm].
- 6) Rotámetro: La celda cuenta con un rotámetro para el ingreso del aire (Dwyer) graduado de 5 a 25 [l/min] anexo a un manómetro (Festo) para medir la presión de aire, graduado de 0 a 36 [psi].
- 7) Medidor de granulometría láser: Se utilizó un analizador de tamaño de partículas marca Mastersizer 2000 de rango 0,02 [μm] a 2000 [μm] para medir tamaño medio de partículas.

Además de los equipos antes mencionados, se utilizaron los siguientes equipos auxiliares para la realización de los experimentos.

- Medidor de pH CORNING pH-meter 445, con electrodo CORNING cat N° 476436.
- Balanzas de precisión SARTORIOUS, modelos: BL-1500-S, BL-6100, 2842.
- Compresor de Aire JOINVILLE, modelo Schultz, tipo CRPM-757, con capacidad para 230 psi.
- Cortador rotatorio Labtech Essa, modelo RSD, capacidad de 20 litros y frecuencia de vibración variable.
- Filtro de pulpas Denver, modelo de bandeja, tipo Vacuoasistido, de capacidad de 3400 [cm³] y bomba de vacío.



Figura 25. Esquema de instrumentación en el desarrollo experimental.

3.2.2. Medición de parámetros

3.2.2.1. Medición de gas holdup

A través de una medición indirecta a partir de la conductividad se midió el holdup de gas ocupando la ecuación de Maxwell (Ecuación 3), presentada en secciones anteriores. En la Figura 26 se muestra el diagrama de disposición de los

elementos para la medición de la conductividad en la celda mecánica. En ésta, el conductímetro (1) es usado de modo que a través de los carbones de su electrodo (2), se conectan dos cables tipo caimán hacia dos pernos ubicados en las caras laterales de la celda mecánica (3). Esto se debió realizar ya que al introducir el electrodo directamente a la celda generaba una medición inestable por el ingreso de burbujas a éste.

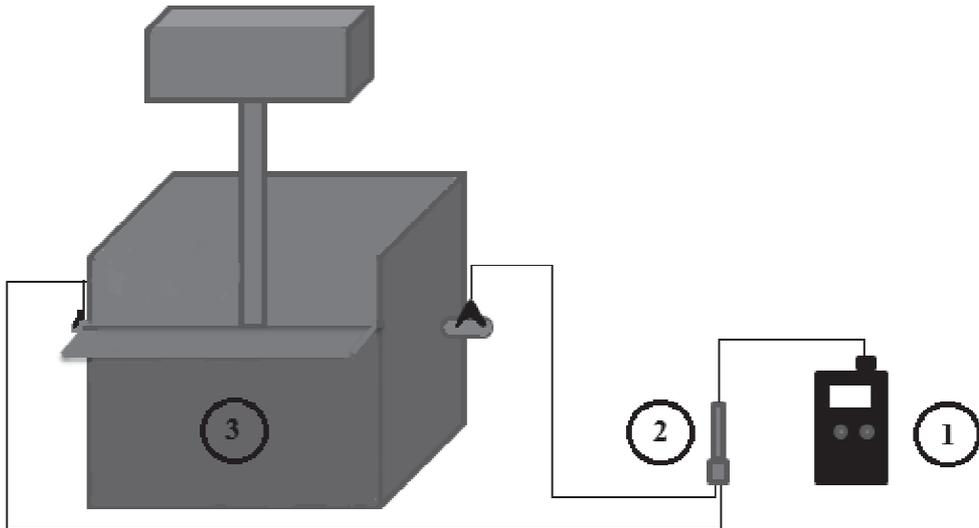


Figura 26. Diagrama de medición de conductividad en la celda mecánica.

3.2.2.2. Medición de recuperación de agua

El procedimiento para la medición de la recuperación de agua para un sistema trifásico en una celda agitada mecánicamente es el siguiente:

- Pesar 5 contendores y numerarlos de 1 a 5.
- Llenar la celda de flotación a un nivel constante con 4600 [cc] de agua para el caso de las pruebas con cuarzo con aproximadamente un kilo de éste.
- Ajustar la velocidad del agitador a un valor de 450 [rpm].
- Agregar el volumen requerido de espumante para tener una solución de concentración de 0,5 [mmol/L].
- Acondicionar por 3 minutos.
- Abrir la válvula de aire y ajustar el flujo de aire en 13 [L/min] ($J_g = 0,56$ [cm/s]).

- Colectar la espuma cada 15 segundos en intervalos de tiempo 0-1, 1-2, 2-4, 4-8 y 8-12 minutos.
- En cada intervalo, se introdujo agua de lavado de igual concentración de espumante bajo el nivel de la espuma a través de orificios hechos en el costado izquierdo de la celda ingresada mediante una bomba para mantener el nivel de la celda constante.
- Se mide en cada intervalo la conductividad promedio para conocer el holdup de gas en la celda.
- Pesar cada bandeja (bandeja +agua recuperada+ sólido)
- Las bandejas se secan para después conocer el peso de la bandeja más el sólido y calcular el agua recuperada por diferencia

La Recuperación de agua se calcula como:

$$\%R_w = \frac{\text{Peso de agua recuperada}}{\text{Peso de agua inicialmente en pulpa}} * 100\% \quad (\text{Ecuación 9})$$

3.2.2.3. Medición de recuperación de partículas finas

La recuperación se define como la razón entre los finos contenidos en el concentrado y alimentación, expresado en porcentaje. Es el indicador referente a cantidad de producto final y se designa por % Re.

$$\%Re = \frac{\text{Partículas finas en Concentrado}}{\text{Partículas finas en Alimentación}} x 100\% \quad (\text{Ecuación 10})$$

3.3. Procedimiento experimental

Se realizaron pruebas tanto en sistema bifásico como en sistema trifásico. En primera instancia para las pruebas en sistema trifásico se utilizó sólo sílice y espumante, pero además se hicieron pruebas agregando colector y concentrado que corresponden a estudios preliminares de un tema anexo a los objetivos de esta memoria. Sin embargo, estos experimentos sirven para corroborar los resultados obtenidos e introducir futuros estudios en la materia.

3.3.1. Pruebas en sistema bifásico (agua-aire)

En un sistema compuesto por aire y agua se midió el contenido de gas en ausencia de reactivos en primera instancia y luego en presencia de distintos espumantes a distintas concentraciones (0,2 ,0,3 ,0,4 y 0,5 [mmol/L]). Se inyectó aire a la celda mecánica ajustándolo para entregar distintos flujos de aire de 3,5,8,10 hasta 13 [L/min] ($J_g=0,56$ [cm/s]). Se midió la conductividad promedio cada 10 segundos efectuando cuatro mediciones por cada flujo para cada concentración. Con los valores de conductividad, se calcula el holdup de gas para construir las curvas $J_g-\varepsilon_g$ para los espumantes utilizados, que corresponden a alcoholes y poliglicoles. Las pruebas se realizaron a 450 [rpm] y con un volumen de agua de 5 [lts] en la celda.

3.3.2. Pruebas con sílice (aire-sólido-agua)

Se utilizó cuarzo pulverizado con una granulometría aproximadamente de 90% bajo 400 mallas Tyler (< 38 [μm]). En la celda se alimentaron 4600 [cc] de agua y 1000 [g] de cuarzo aproximadamente, lo que se traduce en un C_p de 18%. Los espumantes a utilizar fueron representantes de la familia de los alcoholes y poliglicoles. En cada uno de ellos, se utilizó una concentración de espumante de 0,5 [mmol/L], salvo en el caso de PEG200 donde a tal concentración no se generó la espuma suficiente para colectar el concentrado, por lo que hubo que utilizar una concentración mayor. Los valores reales de agua y cuarzo alimentados en las pruebas se encuentran en los Anexos (Tabla A.31).

En cada prueba se midió la conductividad promedio de intervalos 0-1, 1-2, 2-4, 4-8, 8-12 minutos, en los cuales se colectó el concentrado cada 15 segundos. El flujo de gas se ajustó en 13 [L/min] ($J_g=0,56$ cm/s) para todas las pruebas, tratando de mantener el rotámetro estable en el transcurso de la toma de datos. La velocidad del impeller fue de 450 [rpm].

Se alimentó agua de lavado a través de dos orificios en el costado izquierdo de la celda, para no cambiar las condiciones de la espuma. Se acondicionó con la misma concentración de espumante usada en la celda de flotación y se agregó cada 30 segundos, de tal forma de mantener un nivel constante de la pulpa en la celda.

Las bandejas (previamente pesadas) junto al agua y el concentrado recolectado en cada prueba fueron pesadas antes de llevarlas a secado. En el caso del relave,

fue necesaria una etapa de filtrado por el tiempo que éste demoraría en secarse teniendo gran cantidad de agua.

Finalmente, se obtiene el sólido seco, con lo que se calcula el agua recuperada.

3.3.3. Pruebas con sílice y colector

Se realizaron pruebas con 1000 [g] de sílice y colector xantato. La cantidad usada de colector fue de 32,6 [mg], pues se utilizó la misma cantidad que para las pruebas con concentrado, donde la concentración fue de 30 [g/ton] para 1085 [g] de sólido. Por esto, en estas pruebas la concentración de colector fue mayor a 30 [g/ton].

Se usaron dos espumantes, que fueron PEG300 y octanol ambos a una concentración de 0,5 [mmol/L]. Se agregó 4400 [cm³] de agua a la celda ajustando el pH de ésta a 10,5 con hidróxido de calcio (cal apagada). Se acondicionó la pulpa con espumante y colector por 2 minutos ingresando una mínima cantidad de aire para alcanzar una concentración de oxígeno adecuada para la adsorción del colector al mineral. El flujo de aire utilizado fue de 13 [L/min] ($J_g=0,56$ cm/s) con una velocidad del impeller de 450 [rpm]. Se alimentó agua de lavado de igual concentración y pH que la celda por los orificios en el costado izquierdo de ella. Se colectó el concentrado cada 15 segundos en intervalos de 0-1, 1-2, 2-4, 4-8 y 8-12 minutos. El tiempo de flotación fue de 12 minutos, después del cual las bandejas con los concentrados, fueron pesados para pasar a la etapa de secado. La bandeja y el sólido ya seco se pesaron para obtener por diferencia el agua recuperada.

3.3.4. Pruebas con sílice, concentrado y colector

Se trabajó con 1000 [gr] de sílice, 85 [gr] de concentrado y 3950 [cm³] de agua. Se utilizó PEG300 y octanol ambos con una concentración de 0,5 [mmol/L] y una velocidad del agitador de 450 [rpm]. El flujo de aire fue ajustado en 13 [L/min] ($J_g=0,56$ cm/s) y se colectó el concentrado cada 15 segundos en intervalos de 0-1, 1-2, 2-4, 4-8 y 8-12 minutos.

Se añadió colector xantato a una concentración de 30 [g/ton] de sólido y se ajustó el pH de la celda con hidróxido de calcio (cal apagada) a un pH de 10,5 aproximadamente. Luego, se acondicionó la pulpa con los reactivos por dos

minutos ingresando una cantidad mínima de aire para alcanzar la concentración de oxígeno adecuada para la adsorción de colector al mineral.

Se ingresó agua de lavado por medio de los orificios en la cara lateral izquierda de la celda por debajo de la interfaz pulpa-espuma de igual concentración de espumante y pH que la pulpa de la celda. Luego de los 12 minutos de flotación, las bandejas previamente pesadas, se pesaron nuevamente antes de pasar a la etapa de secado. La bandeja y el sólido ya seco se pesaron para obtener por diferencia el agua recuperada, y las muestras secas se enviaron a análisis químico para obtener el porcentaje de cobre y sílice de éstas.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Muestras de alimentación de sílice

Para las muestras de alimentación, se analizó por granulometría láser en Mastersizer 2000 la distribución de tamaños de partículas de cuarzo alimentado, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 27.

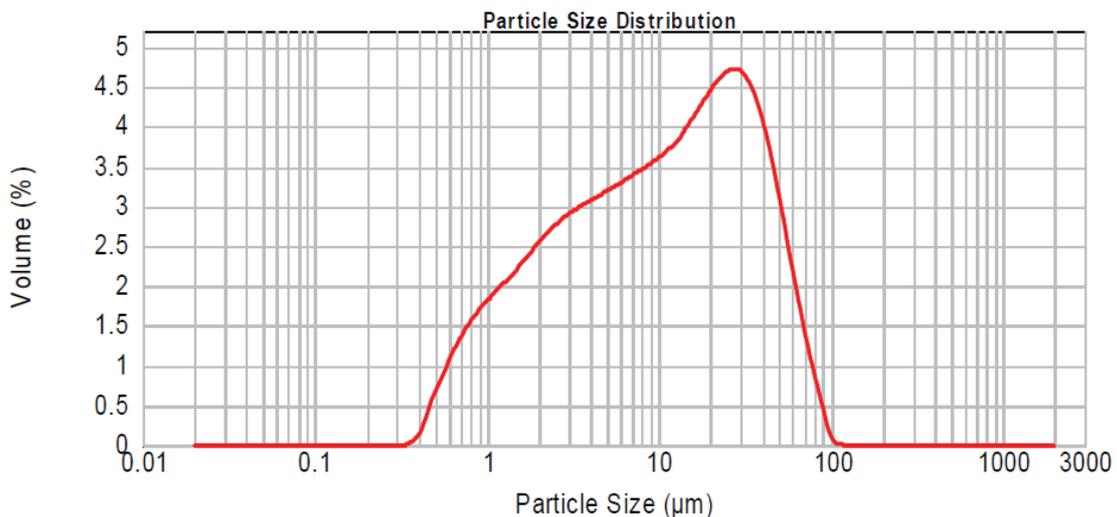


Figura 27. Análisis granulométrico de muestras de sílice de alimentación.

El tamaño promedio (d_{50}) de las muestras de sílice resultó de 10,3 [μm]. Este análisis corresponde a una prueba hecha en triplicado (Ver anexos, Tabla A.1),

por lo cual el valor entregado es el promedio. La desviación estándar fue de 3,16%.

4.2. Calibración del rotámetro

Se calibró el rotámetro de la celda agitada mecánicamente de manera de obtener el valor real del flujo de aire ingresado a la celda. La relación entre los flujos de aire real y nominal es mostrada en la Figura 28.

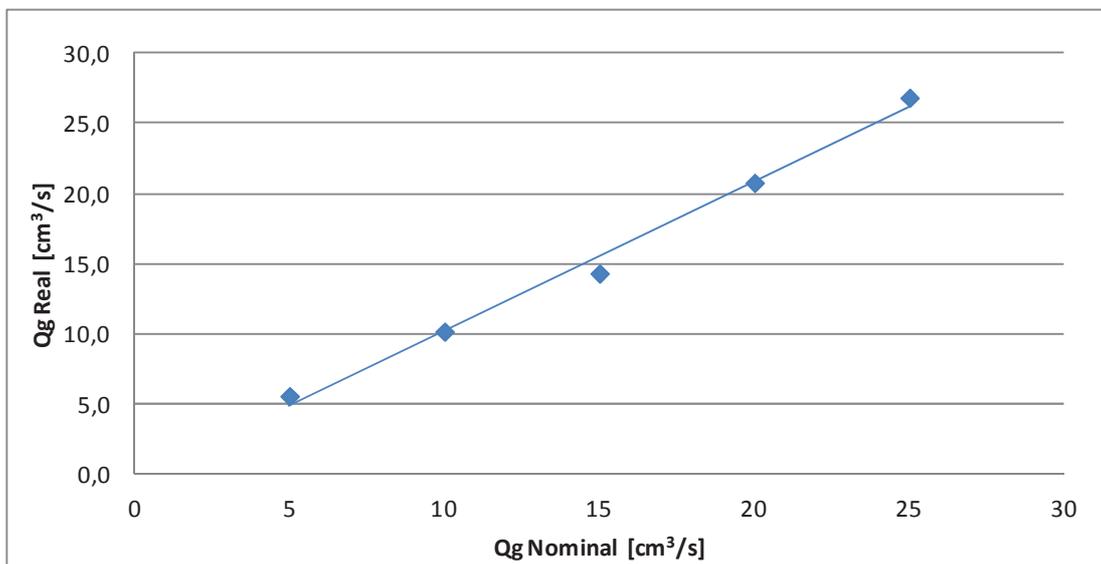


Figura 28. Curva de calibración del rotámetro ($R^2=0,9916$)

El cálculo del flujo de aire real está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{g\text{ real}} \left[\frac{L}{\text{min}} \right] = 1,0628 * Q_{g\text{ nominal}} \left[\frac{L}{\text{min}} \right] - 0,4076 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Para el cálculo del flujo superficial de gas (J_g) se dividió por el área transversal de la celda mecánica de 397 [cm²], descontando el área del impeler. Los flujos fueron reportados a presión atmosférica y temperatura ambiente de 25 °C. La Tabla 4 presenta los valores de los flujos de aire nominal, real y la velocidad superficial del gas (J_g).

Tabla 4. Valores calculados de J_g

Q_g nominal [L/min]	Q_g real [L/min]	J_g [cm/s]
3	2,78	0,12
5	4,91	0,21
8	8,09	0,34
10	10,22	0,43
13	13,41	0,56
15	15,53	0,65
20	20,85	0,88
25	26,16	1,10

4.3. Curvas J_g - ε_g

Se obtuvieron las curvas de J_g - ε_g para los espumantes descritos en la Tabla 2 y los resultados para concentraciones desde 0,2 a 0,5 [mmol/L] se pueden observar de las Figuras 29 a la 38. En cada una de ellas se muestra la curva J_g - ε_g creciente y de forma lineal al aumentar J_g . Al efectuar la comparación entre las curvas a distintas concentraciones en algunos casos se cumple la relación de que a mayor concentración mayor es el holdup de gas para un mismo J_g . Sin embargo, en otros como el hexanol (Figura 29) no se ve con claridad esta relación, sino que las curvas se entrecruzan obteniéndose en todas las concentraciones valores similares de ε_g . En la Figura 38, para el caso de PEG300 sólo se observa la curva J_g - ε_g para la concentración de 0,5 [mmol/L], ya que fue la única concentración ocupada en las pruebas posteriores.

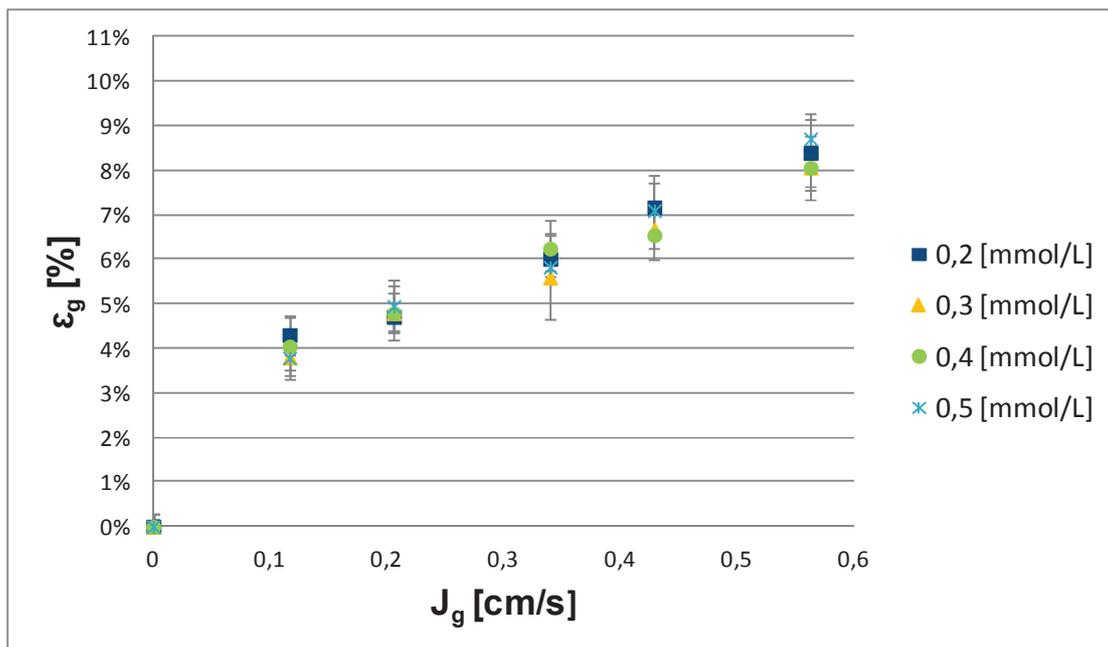


Figura 29. Curva J_g - ϵ_g para hexanol a distintas concentraciones.

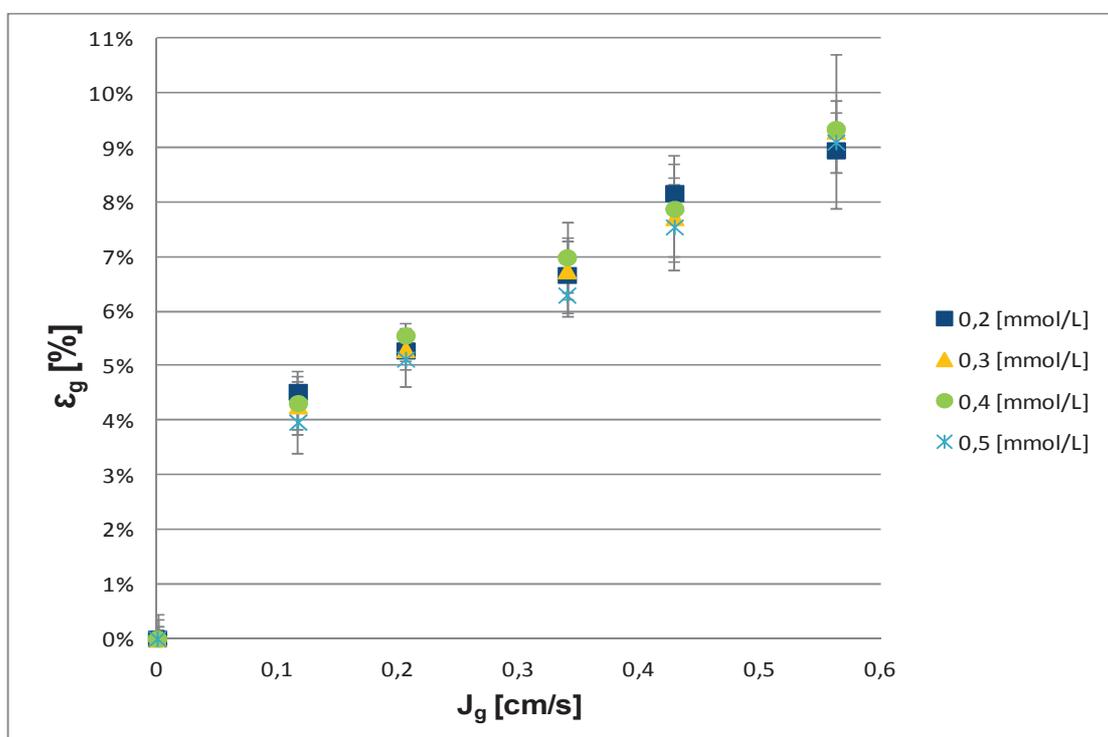


Figura 30. Curva J_g - ϵ_g para heptanol a distintas concentraciones.

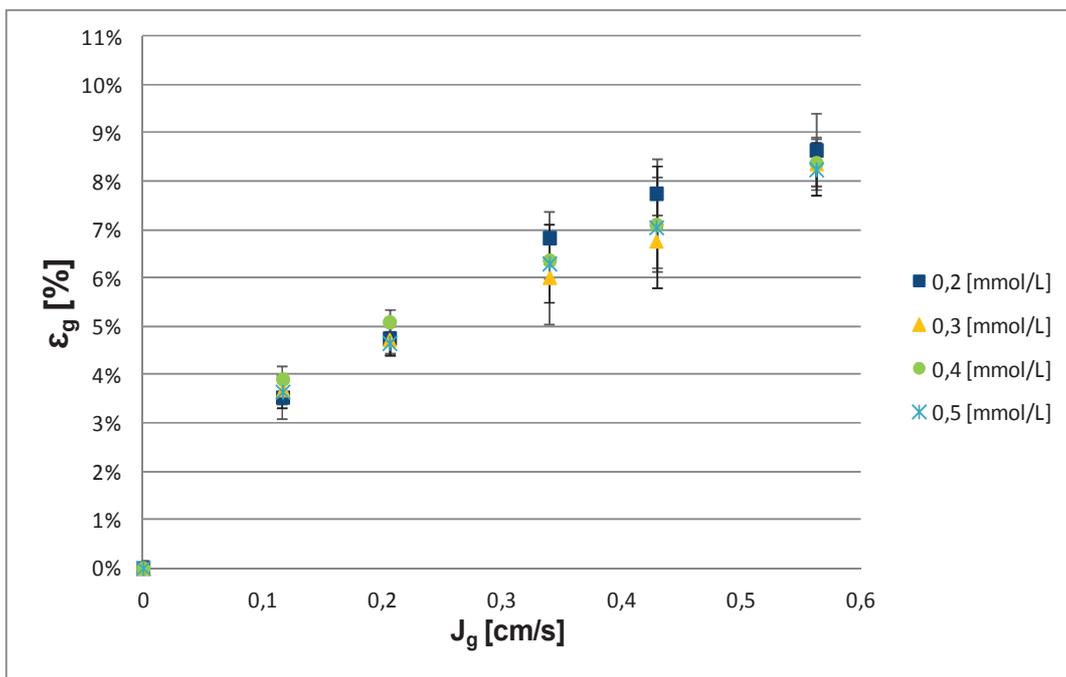


Figura 31. Curva J_g - ε_g para octanol a distintas concentraciones.

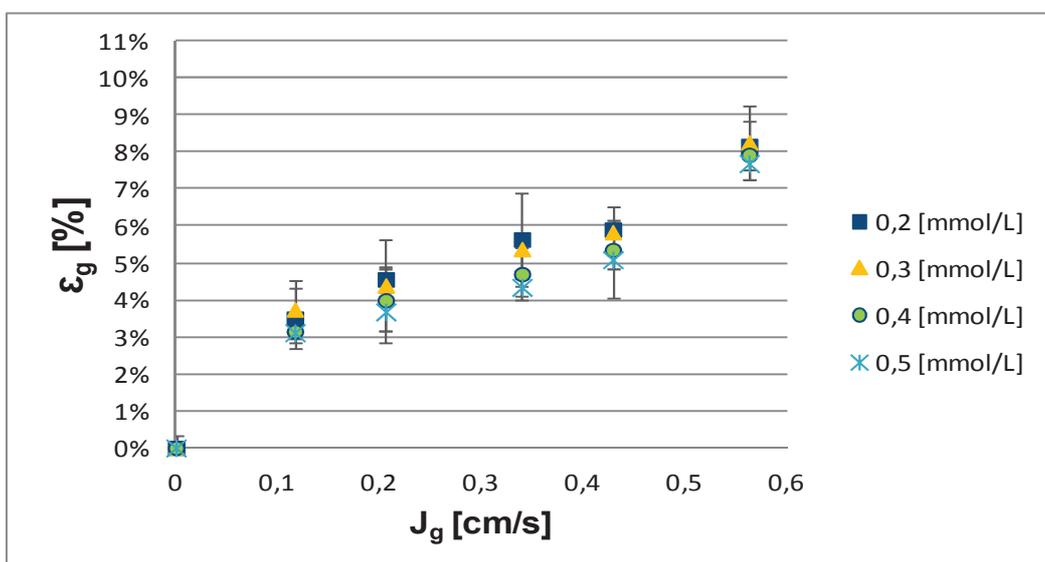


Figura 32. Curva J_g - ε_g para PEG400 a distintas concentraciones.

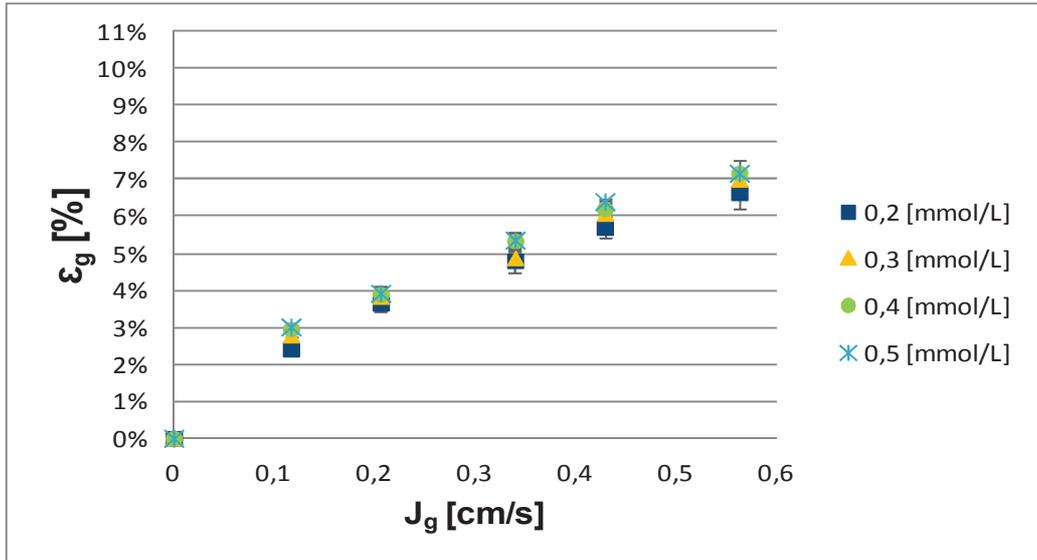


Figura 33. Curva J_g - ϵ_g para PEG200 a distintas concentraciones.

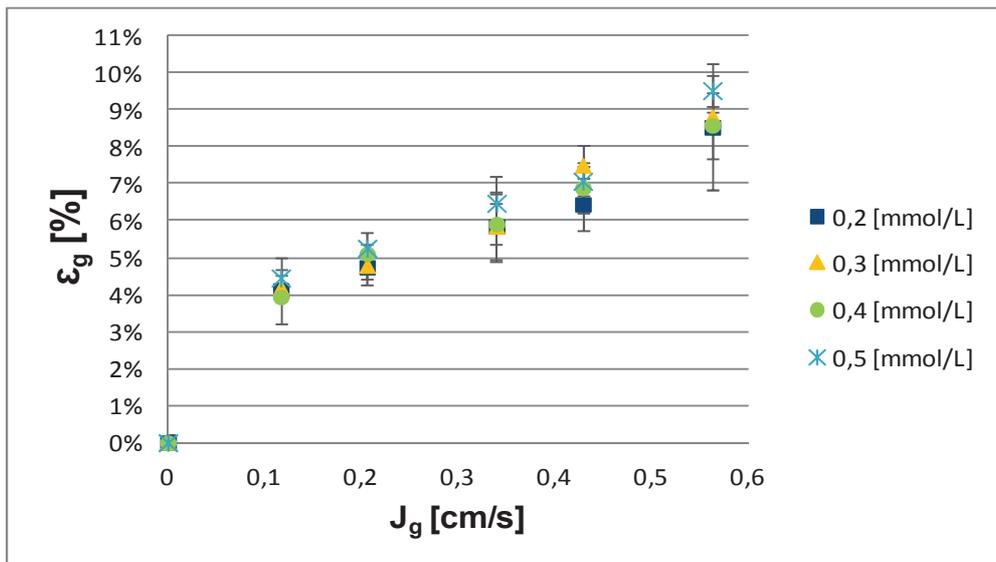


Figura 34. Curva J_g - ϵ_g para X133 a distintas concentraciones.

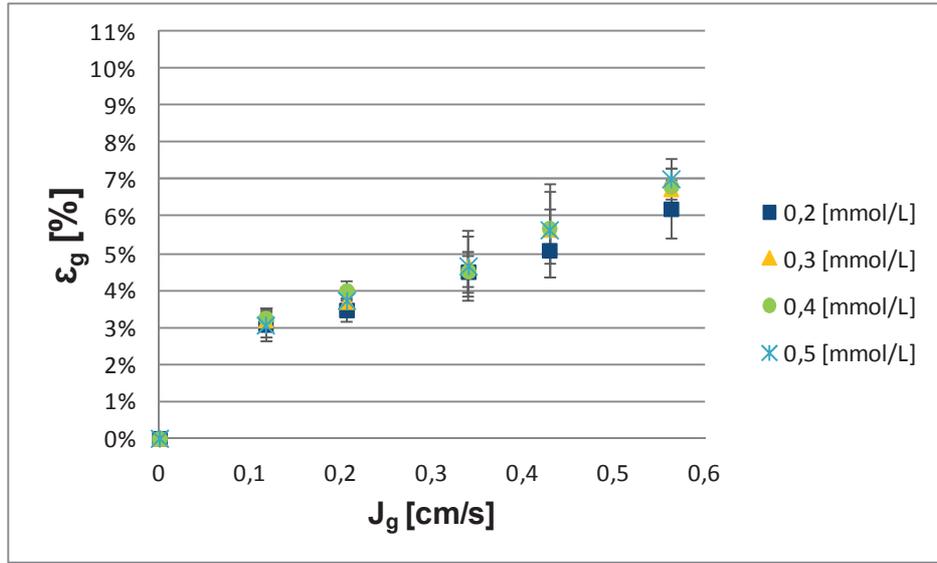


Figura 35. Curva J_g - ϵ_g para pentanol a distintas concentraciones.

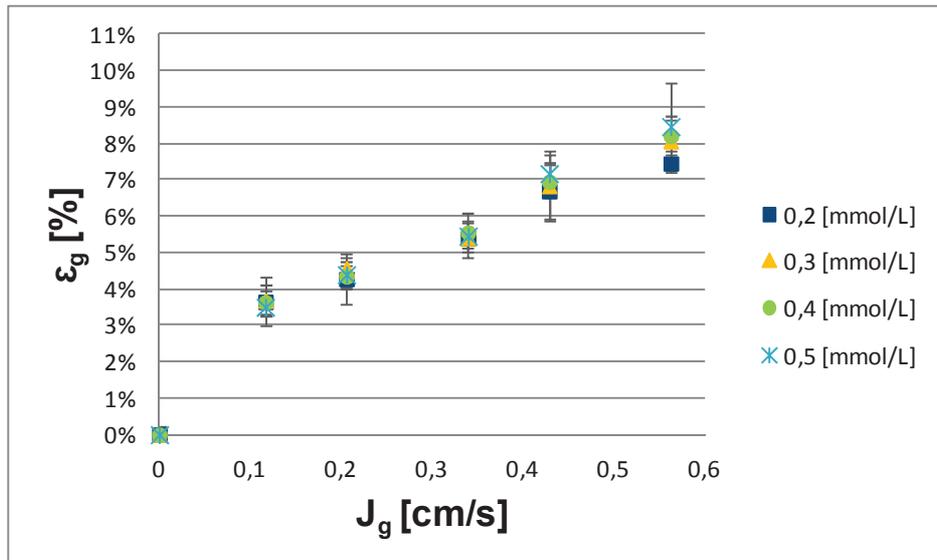


Figura 36. Curva J_g - ϵ_g para Aerofroth 70 a distintas concentraciones.

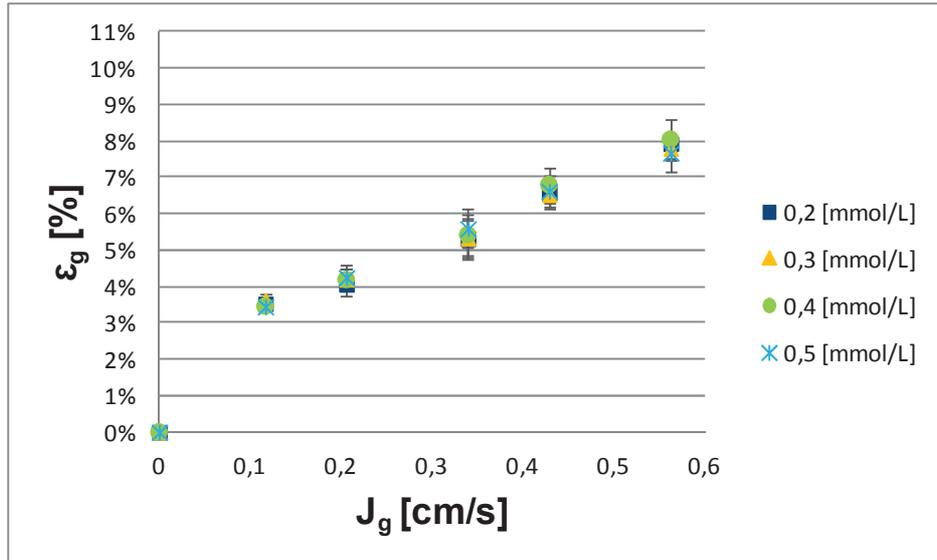


Figura 37. Curva J_g - ϵ_g para MIBC a distintas concentraciones.

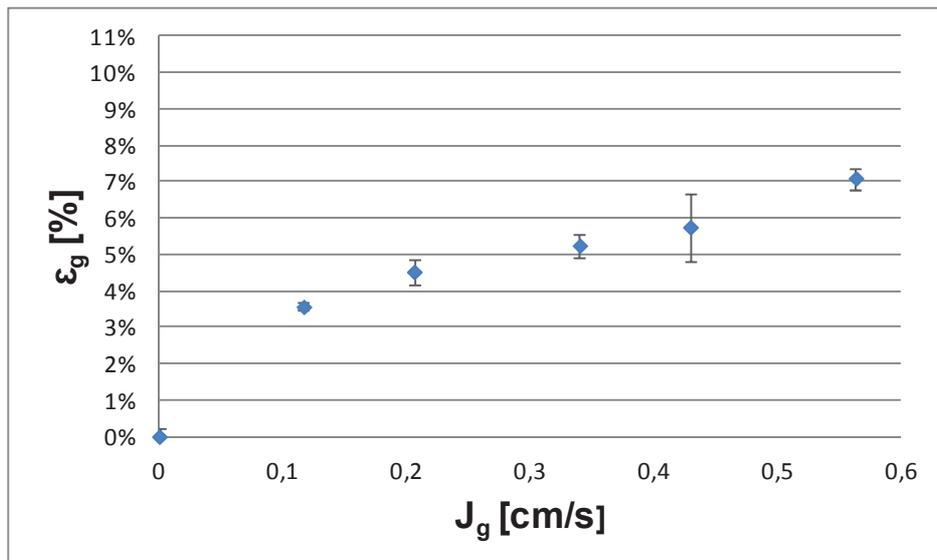


Figura 38. Curva J_g - ϵ_g para PEG300 a 0,5 [mmol/L].

Las curvas observadas de la Figura 39, 40, 41 y 42 comparan los distintos valores de ϵ_g obtenidos para los espumantes estudiados a las concentraciones de 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5 [mmol/L] respectivamente. Para los casos de los espumante X133 y Aerofroth 70, al no poseer información de su peso molecular por ser un espumante comercial, se comparó su concentración en ppm. Sin embargo, Aerofroth 70 al ser metil isobutil carbinol (en su mayoría, ya que contiene otros

compuestos no especificados), se supuso su peso molecular igual al de MIBC de Sigma Aldrich. Sólo para la máxima concentración utilizada (0,5 [mmol/L]), se incluyó en el análisis el espumante PEG300.

En la Figura 39, 40 y 41 puede observarse un orden creciente de generación de gas holdup. Para el caso de los alcoholes, se observa de menor a mayor gas holdup generado pentanol<MIBC<hexanol<octanol~heptanol y para el caso de los poliglicoles PEG200 <PEG400. Tomando la Figura 42 de concentración 0,5 [mmol/L] este orden pudo verse alterado por la alta cantidad de espumante utilizado. Observando el máximo J_g usado (0,56 [cm/s]), la relación de los alcoholes es pentanol<MIBC<octanol<hexanol<heptanol y la de los poliglicoles PEG200~ PEG300< PEG400.

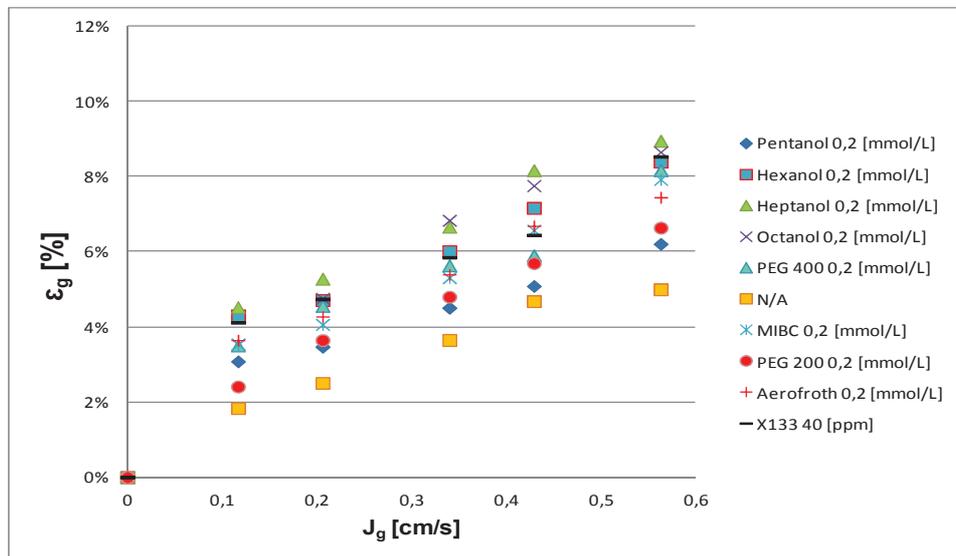


Figura 39. Curvas J_g - ϵ_g para distintos espumantes a 0,2 [mmol/L].

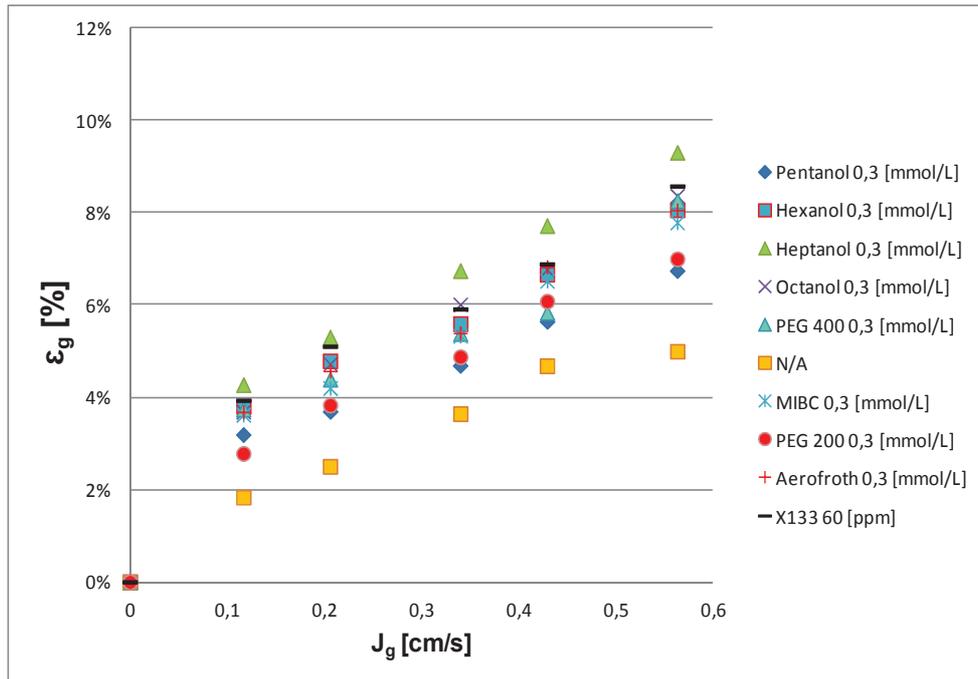


Figura 40. Curvas J_g - ϵ_g para distintos espumantes a 0,3 [mmol/L].

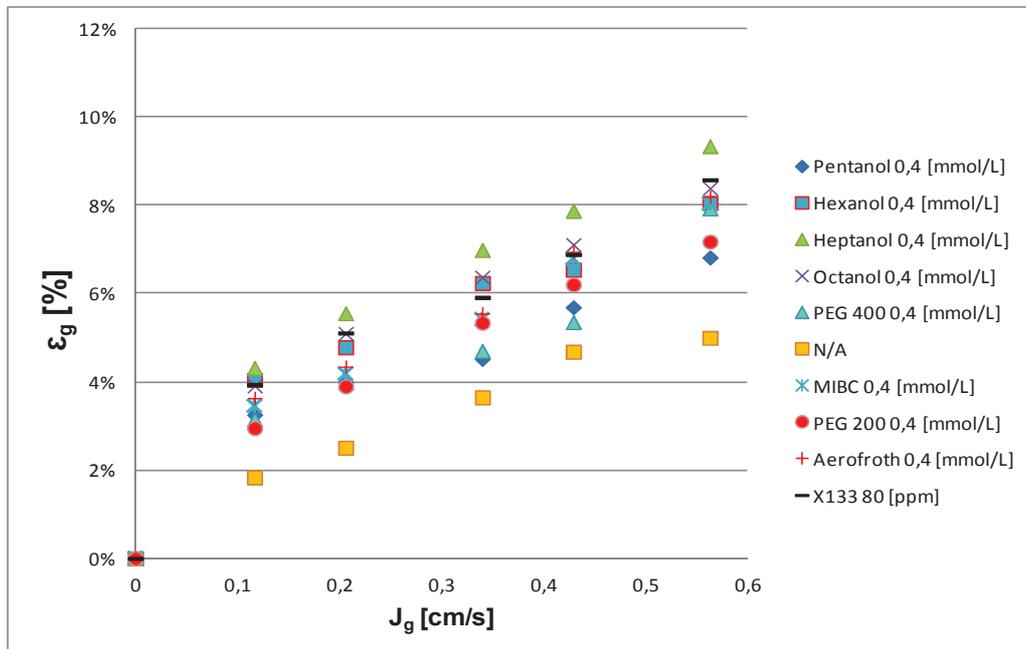


Figura 41. Curvas J_g - ϵ_g para distintos espumantes a 0,4 [mmol/L].

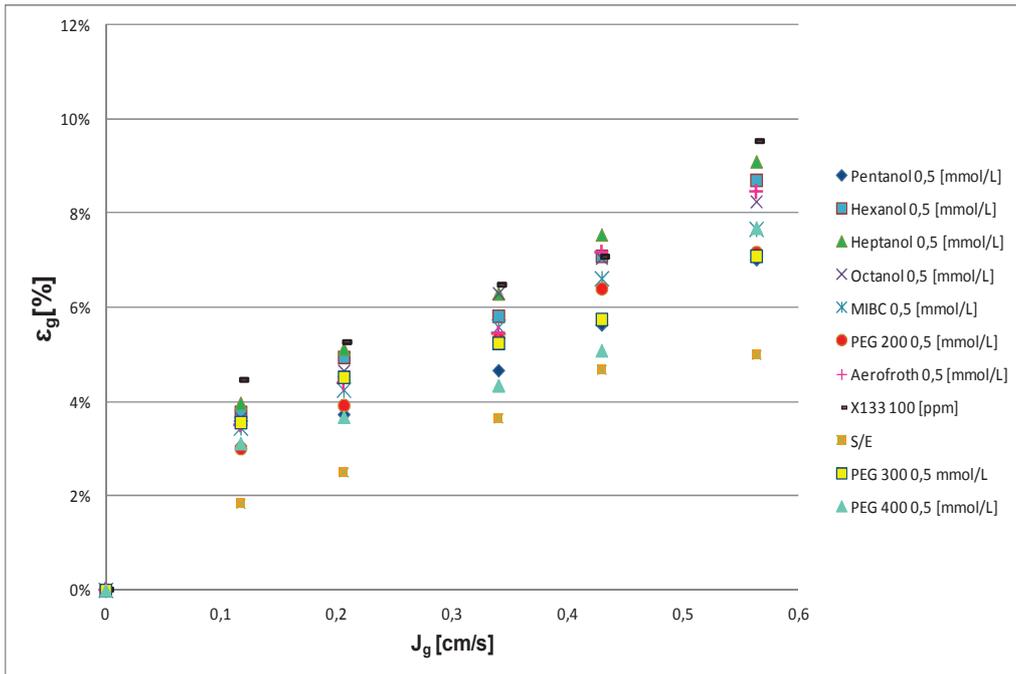


Figura 42. Curvas J_g - ϵ_g para distintos espumantes a 0,5 [mmol/L].

4.4. Pruebas con sílice

Se realizaron cinéticas de flotación de 12 minutos con cuarzo, obteniéndose el agua recuperada y la recuperación por arrastre de hidrofílico (cuarzo). Los resultados de recuperación de agua y por arrastre en el tiempo se muestran en las Figuras 43 y 44 respectivamente. En términos de recuperación de agua se deduce la relación en orden creciente hexanol<MIBC<heptanol~octanol y de hexanol<MIBC<heptanol<octanol para recuperación por arrastre para el grupo de alcoholes y PEG200<PEG300<PEG400 para los poliglicoles. PEG400 fue el espumante que llevó más agua al concentrado, mientras que octanol fue el que acarrió más partículas hidrofílicas al concentrado. En ambas curvas, el espumante de menor impacto fue PEG200, aunque la concentración utilizada para este espumante fue mucho mayor ya que para la concentración de 0,5 [mmol/L] no se formó el colchón de espuma requerido para coleccionar el concentrado como en las otras pruebas.

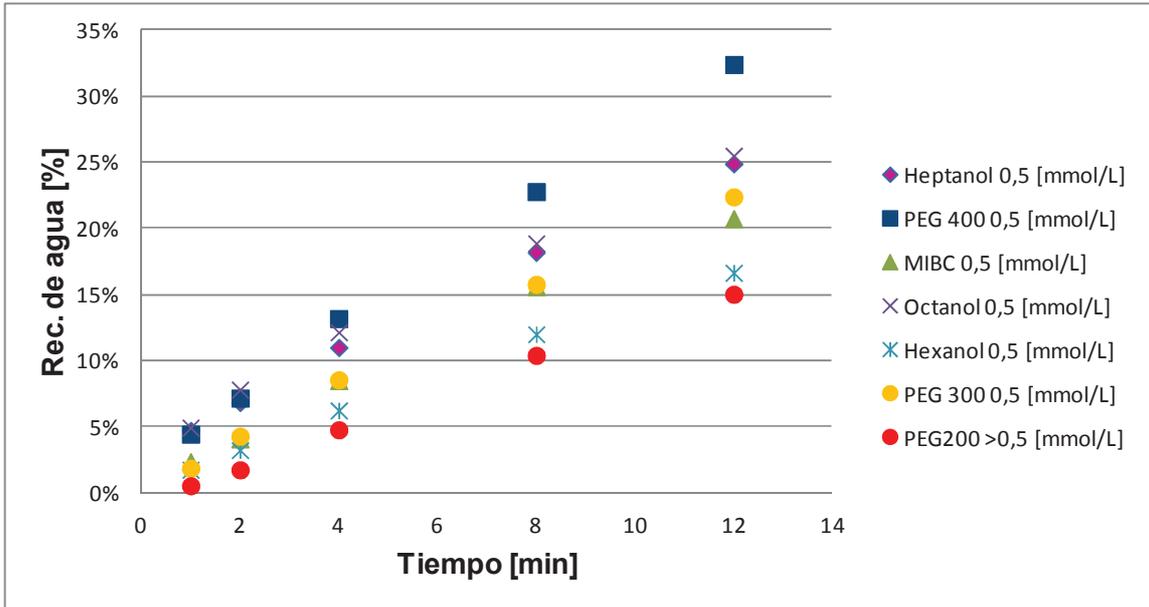


Figura 43. Recuperación de agua en cinética de flotación de cuarzo con diferentes espumantes.

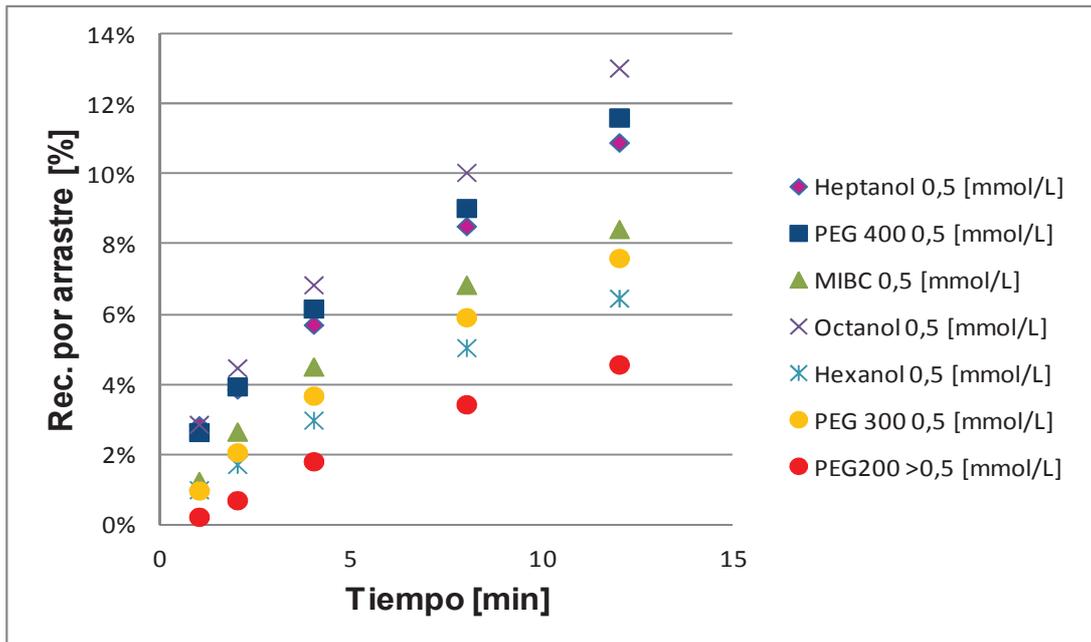


Figura 44. Recuperación por arrastre en cinética de flotación de cuarzo con diferentes espumantes.

Sin embargo, la importancia real de estos resultados es la tasa Rec. por arrastre/Rec. de agua conocida como factor de arrastre (ENT). La Figura 45 muestra la relación entre la recuperación por arrastre de cuarzo y la recuperación

de cuarzo para los espumantes utilizados (PEG400, PEG200, heptanol, hexanol y MIBC), mientras que la Figura 46 corresponde a las pruebas realizadas en triplicado para PEG300 y octanol. Ambas figuras muestran una relación lineal entre recuperación por arrastre y recuperación de agua.

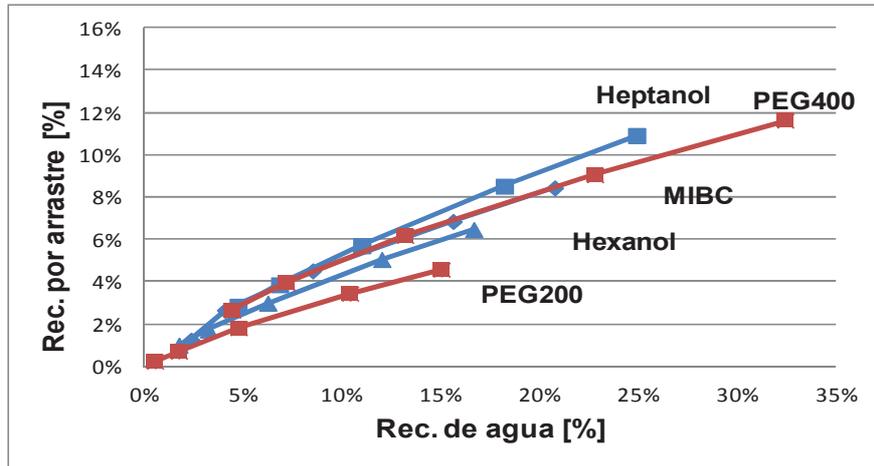


Figura 45. Rec. por arrastre en función de la recuperación de agua para las pruebas con hexanol, MIBC, heptanol, PEG200 y PEG400.

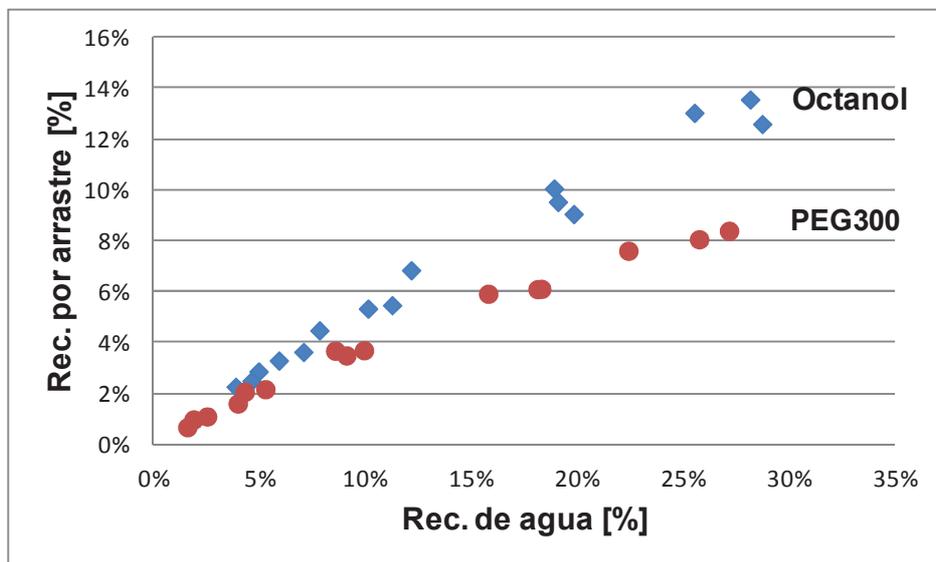


Figura 46. Rec. por arrastre en función de la recuperación de agua para la prueba con octanol y PEG300 en triplicado.

Los valores del factor ENT se presentan en la Tabla 5, junto a R^2 y los valores de ε_g producidos para una concentración de 0,5 [mmol/L] para cada espumante. Tanto para alcoholes como para los poliglicoles estudiados se observa un aumento del factor ENT con el peso molecular, donde los valores del factor de arrastre y el gas holdup para el heptanol son más altos que para el octanol. Todos las pruebas tienen un valor de $R^2 > 0,92$, por lo que la relación es marcadamente lineal entre recuperación por arrastre y recuperación de agua, que representa la curva de arrastre del Tipo 1, al ser material fino el utilizado en estas pruebas.

Tabla 5. Valores obtenidos del factor de arrastre (ENT) para distintos espumantes.

Espumante	ENT	R^2	Eg [%]
Hexanol	0,41	0,995	9,44
MIBC	0,43	0,983	9,59
Heptanol	0,51	0,998	11,24
Octanol	0,49	0,998	10,26
PEG 200	0,32	0,994	8,5
PEG 300	0,34	0,992	10,25
PEG 400	0,39	0,923	10,52

Los resultados de las pruebas con triplicado para octanol y PEG300 se muestran en la Tabla 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6. Resultados pruebas en triplicado para octanol

Tiempo [min]		Rec. arrastre	Rec. agua	Cuarzo rec.[g]	Agua rec.[g]	Eg [%]	ENT
1	Prueba 1	2,86%	4,96%	28,03	232,52	10,99	0,528
2		4,47%	7,83%	43,86	367,07		
4		6,85%	12,15%	67,11	569,84		
8		10,06%	18,89%	98,62	885,72		
12		13,04%	25,50%	127,85	1196,03		
1	Prueba 2	2,49%	4,62%	24,75	212,71	10,03	0,4525
2		3,63%	7,07%	36,17	325,32		
4		5,47%	11,25%	54,45	517,46		
8		9,06%	19,81%	90,22	911,38		
12		12,60%	28,70%	125,52	1320,06		
1	Prueba 3	2,26%	3,88%	22,43	178,33	9,77	0,4939
2		3,29%	5,92%	32,67	272,13		
4		5,33%	10,12%	52,94	465,32		

8		9,54%	19,07%	94,66	877,23		
12		13,57%	28,13%	134,62	1294,17		
Promedio		13,07%	27,44%			10,26	0,491
Desv. Estándar		0,48%	1,71%			0,64	0,04

Tabla 7. Resultados pruebas en triplicado para PEG300.

Tiempo [min]		Rec. arrastre	Rec. agua	Cuarzo rec.[g]	Agua rec.[g]	Eg [%]	ENT
1	Prueba 1	0,97%	1,89%	9,65	86,96	10,93	0,3618
2		2,06%	4,31%	20,47	198,18		
4		3,68%	8,57%	36,57	394,18		
8		5,92%	15,78%	58,86	725,97		
12		7,61%	22,39%	75,69	1029,96		
1	Prueba 2	0,67%	1,60%	6,62	73,51	9,18	0,3274
2		1,60%	3,98%	15,86	182,92		
4		3,49%	9,09%	34,62	418,28		
8		6,10%	18,11%	60,49	833,05		
12		8,06%	25,73%	79,96	1183,36		
1	Prueba 3	1,09%	2,53%	10,81	116,33	10,65	0,3245
2		2,16%	5,28%	21,45	242,72		
4		3,70%	9,93%	36,65	456,61		
8		6,11%	18,28%	60,62	841		
12		8,40%	27,14%	83,28	1248,23		
Promedio		8,03%	25,08%			10,25	0,338
Desv. Estándar		0,39%	2,44%			0,94	0,02

En estas pruebas además se analizó el tamaño medio de las partículas presentes en el concentrado mediante granulometría láser. Los tamaños medios obtenidos corresponden a los concentrados colectados en los 12 minutos de flotación. Para todos los espumantes utilizados se obtuvo un tamaño medio menor a 10 [µm]. Los valores para cada prueba se muestran en los anexos, Tabla A.29.

4.5. Pruebas con sílice y colector

La Figura 47 y 48 muestra la recuperación por arrastre en función de la recuperación de agua con y sin colector para las pruebas con octanol y PEG300 respectivamente. En éstas puede observarse diferencia en ambos casos al agregarle colector a la celda.

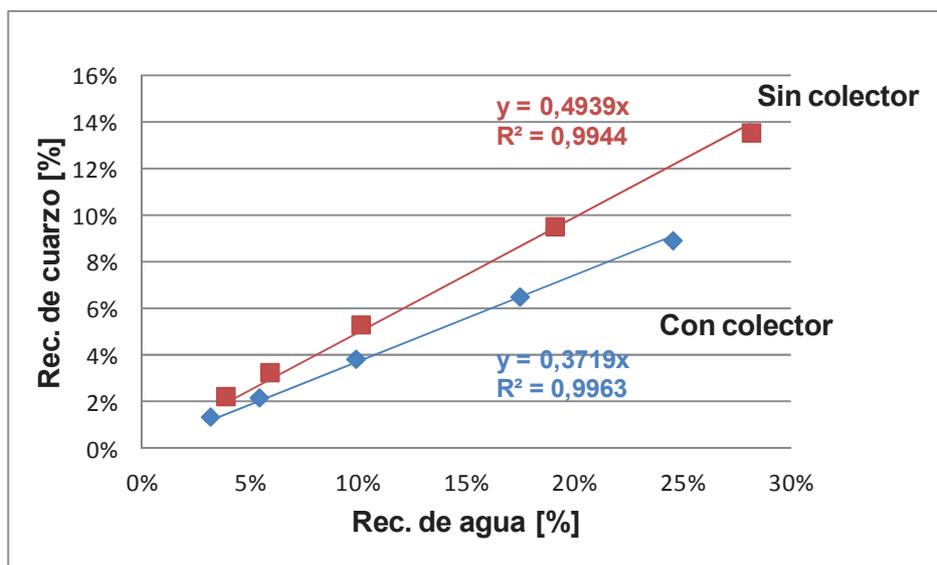


Figura 47. Recuperación de cuarzo en función de la recuperación de agua para pruebas con octanol con y sin colector.

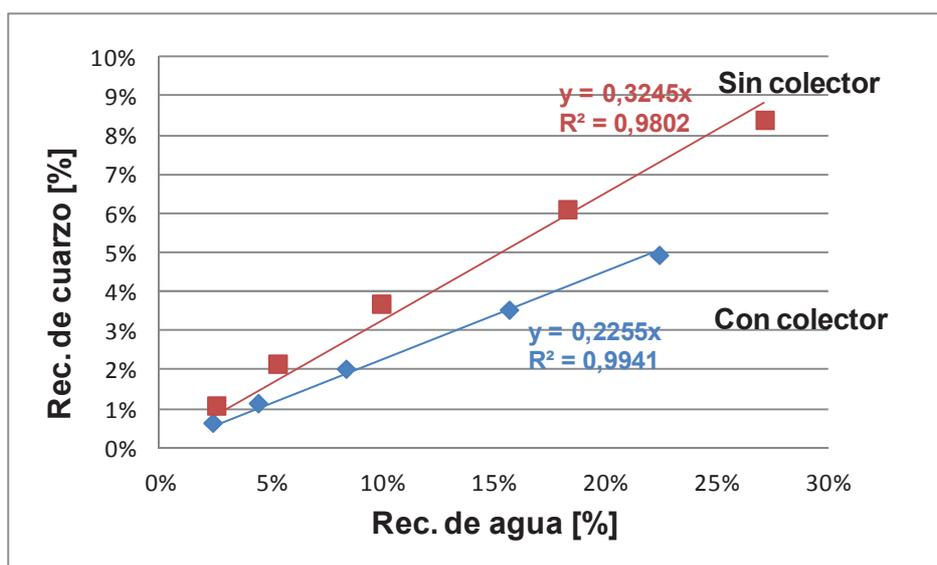


Figura 48. Recuperación de cuarzo en función de la recuperación de agua para pruebas con PEG300 con y sin colector.

Cabe mencionar que al utilizar colector en las pruebas con ambos espumantes se formó menor colchón de espuma que con las pruebas sin colector, por lo que se obtuvo una menor profundidad de espuma en las pruebas con colector. El

factor ENT para estas pruebas fue menor que para las pruebas sin colector tanto para el caso de PEG300 como para octanol.

4.6. Pruebas con sílice, concentrado y colector

La Figura 49 muestra la recuperación de cuarzo por arrastre en función de la recuperación de agua para las pruebas con octanol y PEG300. Puede observarse al igual que en las pruebas sólo con sílice una diferencia en ambos espumantes, siendo el octanol el que lleva más partículas por arrastre al concentrado.

Por otro lado, la Figura 50 muestra la ley acumulada de cobre en el concentrado en el tiempo de flotación. Nuevamente el espumante PEG300 presenta mayor ley de cobre que octanol, sin que ambas curvas se intercepten en ningún momento.

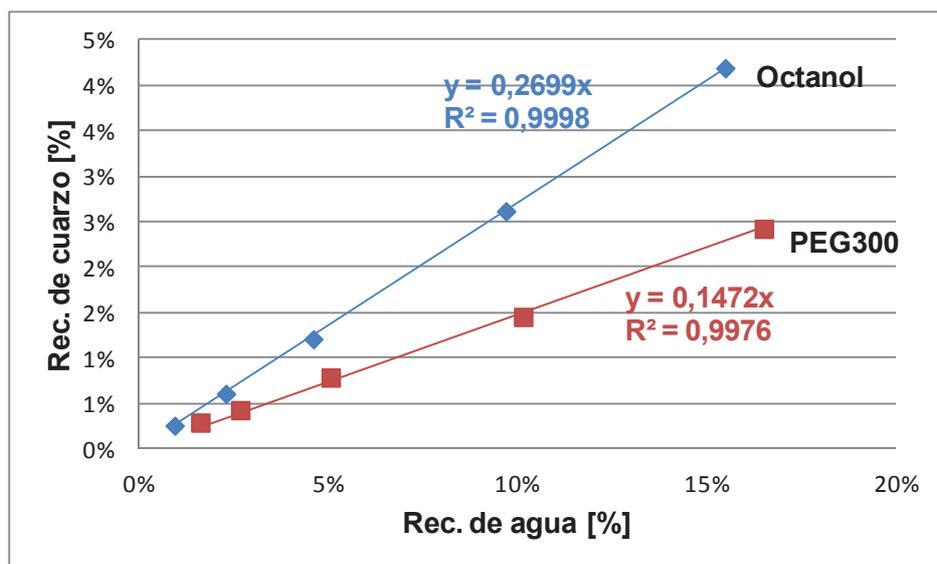


Figura 49. Recuperación de cuarzo en función de la recuperación de agua para las pruebas de octanol, PEG300 y mineral preparado.

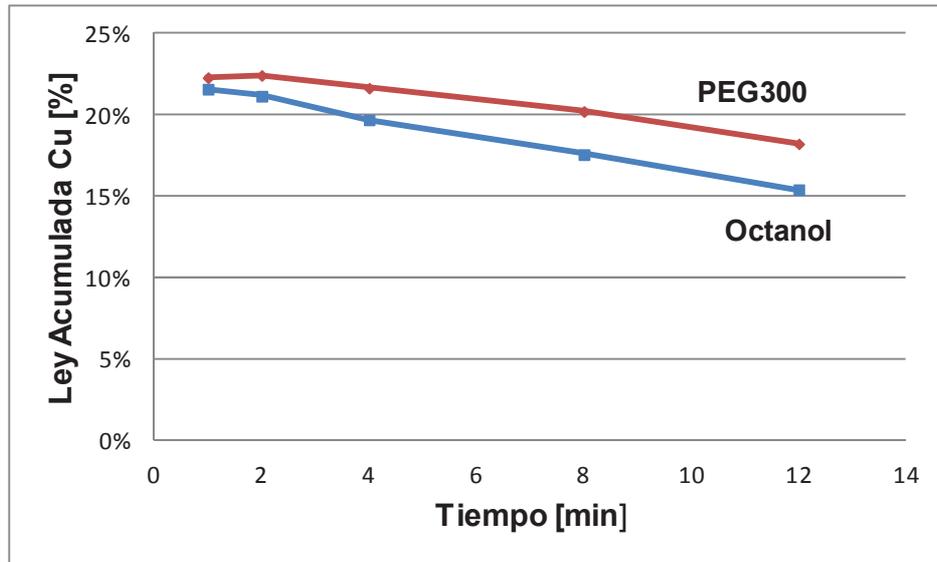


Figura 50. Ley acumulada de cobre en el tiempo para PEG300 y octanol.

La Figura 51 muestra la cinética de flotación donde los resultados fueron ajustados ocupando el modelo de García-Zúñiga (G-Z), cuya fórmula es mostrada en la Ecuación 12. Se muestra la recuperación acumulada de cobre en el tiempo de flotación, que fue de 12 minutos para los espumantes octanol y PEG300, donde PEG300 presenta una mayor recuperación de cobre.

$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-K_c \cdot t}) \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde

$R(t)$: Corresponde a la recuperación modelada al tiempo t [%].

R_{∞} : Recuperación al tiempo infinito [%].

K_c : Constante cinética de flotación [min^{-1}].

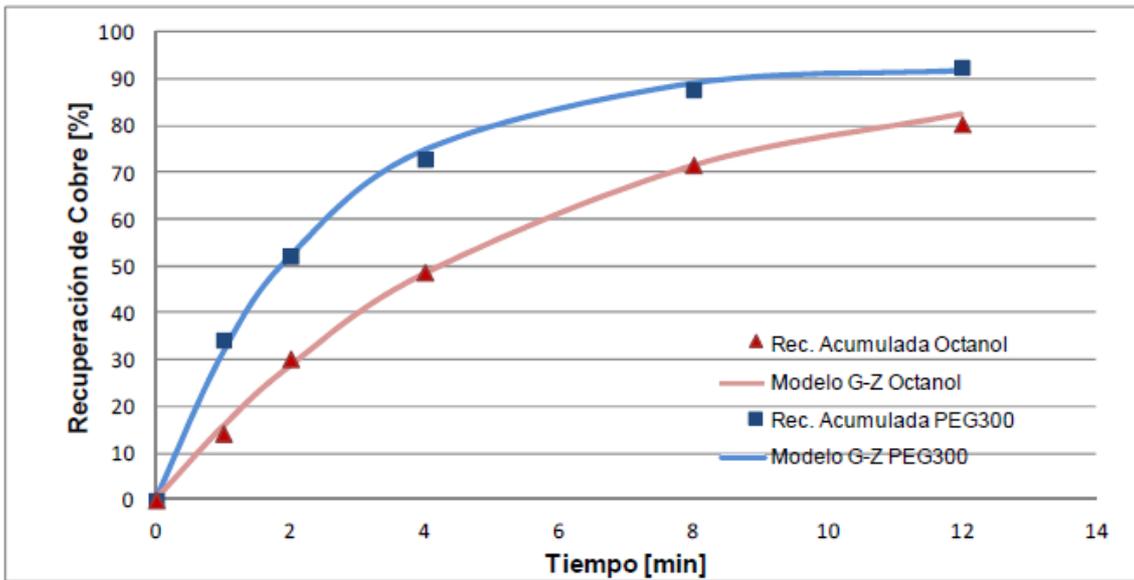


Figura 51. Cinética de flotación para octanol y PEG300 con aproximación de García- Zúñiga (G-Z).

En la Tabla 8 se muestra los valores de las constantes cinéticas calculadas para octanol y PEG300. Se utilizó el mismo R infinito para ambos casos, de modo que ambas curvas convergieran al mismo valor.

Tabla 8. Parámetros cinéticos para pruebas con PEG300 y octanol.

	PEG300	Octanol
K [min⁻¹]	0,41	0,18
Rinf [%]	92,52	92,52

Se observa una cinética más rápida para PEG300 y un buen ajuste del modelo de García-Zúñiga para ambos espumantes.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1. Curvas J_g - ε_g

Las curvas J_g - ε_g mostradas en las Figuras 29 a la 38, muestran una relación creciente entre gas holdup y velocidad superficial de gas. Al analizar la relación entre gas holdup y la concentración de espumante en sistema bifásico, no se observa una diferencia notoria en el incremento del gas holdup con la concentración de espumante. Esto puede deberse a las altas concentraciones de espumante a utilizar, las cuales sobrepasan la concentración crítica de coalescencia (CCC), por lo que agregarle espumante al sistema no genera un cambio significativo en el holdup de gas. Este fue el caso de heptanol, hexanol, octanol y PEG400, mientras que en los casos de MIBC, Aerofroth, X133 y PEG 200 se observó un aumento del gas holdup al aumentar la concentración de espumante.

Al analizar las curvas J_g - ε_g a una concentración fija mostradas en las Figuras 39 a la 42, se observa un aumento lineal del holdup de gas con la velocidad superficial del gas. Comparando los resultados obtenidos para el grupo de los alcoholes, se observa un orden en el incremento de ε_g : pentanol < MIBC < hexanol < octanol ~ heptanol, donde el heptanol da los mayores valores. Esto puede explicarse ya que dentro de los espumantes alcoholes la actividad superficial tiene su máximo en los 6 a 7 carbonos de la cadena [34]. Para el caso de los poliglicoles, los resultados muestran un mayor aumento del gas holdup para mayores pesos moleculares comparando PEG400 y PEG200. Al incluir PEG300 a la concentración de 0,5 [mmol/L] se obtuvieron resultados similares a los conseguidos con PEG200, manteniéndose valores más altos para PEG400.

5.2. Pruebas con sílice

Para las pruebas con sólido se obtuvieron las Figuras 43 y 44. En la Figura 43 se muestra la recuperación de agua en el tiempo para 7 espumantes: hexanol, heptanol, octanol, MIBC, PEG200, PEG300 y PEG400. Puede observarse una mayor recuperación de agua para PEG400, seguido de octanol y heptanol. El espumante de menores valores de recuperación de agua fue PEG200, aunque se utilizó una concentración más alta de espumante para formar un cochón de espuma aceptable y colectar el concentrado al igual que en las otras pruebas. En orden creciente en el grupo de los alcoholes se obtuvo la relación

hexanol<MIBC<heptanol~octanol en cuanto recuperación de agua, lo que puede deberse a que espumantes de cadena larga generan espesores de película de líquido alrededor de la burbuja mayores. Esto también se aplica para el grupo de los poliglicoles en que se obtuvo una recuperación de agua en orden creciente de PEG200, PEG300 y PEG400. Sin embargo, al comparar los alcoholes y poliglicoles, son los últimos los que llevan más agua al concentrado, al formar un espesor de film más grueso que los alcoholes [8]. Esto puede deberse a la estructura molecular de los poliglicoles, ya que al tener más grupos hidroxilos éstos forman más puentes de hidrógeno con las moléculas de agua, por lo que llevan más agua al concentrado [8].

En cuanto a las formas de las curvas, se ve una tendencia aproximadamente lineal para la recuperación de agua, lo que se traduce en un valor relativamente constante de la velocidad de agua acarreada al concentrado (J_{wo}).

En la Figura 44 se observa la recuperación de cuarzo en el tiempo de flotación, que alcanzó los 12 minutos. Al ser las partículas de cuarzo de naturaleza hidrofílicas todo lo recuperado en la cinética de flotación se considera recuperación por arrastre. En este caso, el espumante con mayor capacidad de llevar hidrofílico al concentrado fue octanol seguido por PEG400 y heptanol. En orden creciente en el grupo de los alcoholes se confirma la relación hexanol<MIBC<heptanol<octanol en cuanto a recuperación por arrastre, de lo se deduce que a mayor peso molecular, se lleva más agua y por lo tanto más partículas hidrofílicas al concentrado [20]. Por otro lado, para los poliglicoles, se obtiene la relación PEG200<PEG300<PEG400, con lo que también se deduce que a mayor peso molecular, mayor es la capacidad de arrastrar agua al concentrado. La forma de las curvas es más convexa que en el caso de la recuperación de agua.

La importancia de estas dos variables es la relación que existe entre ellas, esto es, cuánto se recupera por arrastre al tener una cierta recuperación de agua. Es por eso que al graficar la recuperación por arrastre en función de la recuperación de agua se obtiene el factor ENT, que corresponde a la pendiente del gráfico que se muestra en las Figuras 45 y 46. La Figura 46 muestra las pruebas con PEG300 y octanol realizadas en triplicado. Ambas figuras muestran una relación lineal entre la recuperación de agua y la recuperación por arrastre, lo que corresponde al tipo 1 de las curvas de arrastre al ser partículas finas las que se usaron en la flotación [15].

Para cada espumante se calculó el factor ENT, los que se presentan en la Tabla 5. En esta tabla, puede observarse una buena correlación entre ambas

variables, dando un factor R^2 mayor a 0,92, lo que se traduce en una relación lineal entre arrastre de hidrofílico y arrastre de agua. Al analizar los valores de ENT, se puede observar un orden por lo que se obtiene PEG200<PEG300<PEG400<hexanol<MIBC<octanol<heptanol. Esto significa que el espumante que lleva menor cantidad de hidrofílico al concentrado a una determinada recuperación de agua es PEG200, pues presenta menor valor de ENT. Cabe mencionar que ante un flujo de 13 [L/min] usado en todas las pruebas, no en todas ellas se obtuvo un mismo valor de ε_g , lo que confirma diferencias en el poder de los espumantes. Por lo tanto, los alcoholes arrastran más partículas hidrofílicas que los poliglicoles para igual arrastre de agua en los casos estudiados.

Se analizó mediante granulometría láser el tamaño medio de los concentrados, siendo éstas el concentrado colectado en los 12 minutos de flotación. En todas las pruebas se obtuvo un tamaño medio menor a 10 [μm] utilizando los espumantes mencionados.

Se tomaron además de la Tabla 5 dos espumantes de igual gas holdup, un alcohol y un poliglicol. Los espumantes elegidos fueron octanol y PEG300 y se hicieron dos pruebas adicionales para cada uno, repitiendo las condiciones utilizadas anteriormente. Los valores de ENT mostrados en la Tabla 5 para estos dos espumantes corresponden al promedio de los ENT de las tres pruebas. Los valores obtenidos para cada una de las pruebas se muestran en las Tablas 6 y 7. Para ellas, la desviación estándar en el cálculo del factor ENT para las pruebas con octanol fue de 0,04 para ENT y 0,64 para el cálculo de ε_g . Para las pruebas con PEG300 la desviación estándar en el cálculo del ENT fue de 0,02 y para el cálculo de ε_g fue de 0,94. Aunque trabajos anteriores señalan que no hay relación entre recuperación por arrastre y tipo de espumante [30](aunque ambos estudios no son comparables al ser distintas las condiciones), como resultado de todas las pruebas realizadas se obtuvo que los poliglicoles y alcoholes tienen comportamientos distintos en relación a la recuperación de agua [20]. Esto puede deberse a que alcoholes y polietilenglicoles generan distintas estructuras de espuma, las que a su vez afectan tanto la recuperación de agua como recuperación por arrastre.

En este caso, usando celdas agitadas mecánicamente, los poliglicoles si bien acarrearán más agua al concentrado, la relación hidrofílico/agua arrastrada es menor que para los alcoholes, lo que puede verificarse en los valores de ENT calculados.

5.3. Pruebas con sílice y colector

La Figura 47 y 48 muestran la recuperación de cuarzo en función de la recuperación de agua con y sin colector para las pruebas con octanol y PEG300. Puede observarse una marcada diferencia en ambos espumantes, en que el factor de arrastre (ENT) es mayor en las pruebas sin colector que en las pruebas con colector. Esto puede deberse a que el colector afecta el proceso de flotación, pues en las pruebas con colector no se formaba un colchón de espuma como en las pruebas sin colector y la profundidad de la espuma fue menor. Esto puede deberse a que el colector afecta la pérdida de espumación, selectividad en la espuma y sus propiedades en algunos casos [5].

Si se comparan según espumantes, tanto en el caso con colector y sin colector PEG300 tuvo un menor factor de arrastre que octanol, por lo que puede decirse que los alcoholes arrastran más partículas hidrofílicas que los poliglicoles a igual arrastre de agua, lo que es válido no sólo para esta condición, sino también para el caso sin colector.

5.4. Pruebas con sílice, concentrado y colector

La Figura 49 muestra los resultados de las pruebas con mineral preparado (sílice+concentrado) para recuperación de hidrofílico en función de la recuperación de agua para las pruebas con octanol y PEG300. En ésta se observa una diferencia entre el factor de arrastre de ambos espumantes, siendo nuevamente el PEG300 el espumante que arrastra menos partículas hidrofílicas al concentrado a igual recuperación de agua. Sin embargo, si se comparan estos resultados de ENT con los valores obtenidos en las pruebas sin colector pueden observarse menores valores en las pruebas con colector, efecto explicado anteriormente. Esta diferencia en la selectividad de los espumantes también se observa en la Figura 50 donde se muestra la ley acumulada de cobre en el tiempo para octanol y PEG300. En ella se ve una mayor ley de cobre para PEG300, lo que lo hace más selectivo que octanol.

Teniendo los resultados de recuperación de cobre para octanol y PEG300 se ajustaron los valores con el modelo de García-Zúñiga. Las cinéticas de flotación y su respectiva aproximación se muestran en la Figura 51. Los parámetros cinéticos de ambas pruebas se muestran en la Tabla 8, donde se observa una constante cinética mayor para el caso de PEG300. Esto puede estar relacionado con distintos espesores de película de líquido asociado a la superficie de burbuja para

los espumantes estudiados y esto produce diferentes tiempos de inducción en la burbuja.

El valor de R infinito se consideró igual en ambos casos. Como resultado de estas pruebas se obtuvo que PEG300 es más selectivo que octanol.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se puede concluir que:

- Se obtuvieron las curvas ε_g-J_g para 10 espumantes en celdas agitadas mecánicamente, los cuales incluían alcoholes alifáticos, poliglicoles y dos espumantes comerciales.
- En las curvas ε_g-J_g se obtiene un incremento en el gas holdup con el aumento del flujo del aire.
- Se estableció un protocolo de recuperación de agua para sistema trifásico en celda agitadas mecánicamente, alimentando agua bajo la espuma para no interferir las propiedades de ésta.
- Para las pruebas con sólido se observó que en general los poliglicoles llevan más agua al concentrado que los alcoholes. El orden creciente en recuperación de agua fue para los alcoholes hexanol<MIBC<heptanol~octanol y para los poliglicoles se obtuvo PEG200<PEG300<PEG400, por lo que al aumentar el peso molecular de los espumantes, mayor es el arrastre de agua en ambos casos.
- En recuperación por arrastre se observó que el octanol llevaba más hidrofílico al concentrado. Para los alcoholes en orden creciente de factor de arrastre se obtuvo hexanol<MIBC<heptanol<octanol y para los poliglicoles PEG200<PEG300<PEG400.
- Los valores de ENT calculados fueron mayores para alcoholes que para poliglicoles, mostrando un aumento en el valor con el peso molecular tanto para alcoholes como para poliglicoles.
- El factor de arrastre (ENT) disminuye con la adición de colector que afecta las propiedades del sistema, teniendo menor arrastre de partículas hidrofílicas en pruebas con colector para las condiciones estudiadas.
- PEG300 es más selectivo que octanol en presencia de partículas hidrofílicas y mineral valioso. Con PEG300 se obtuvo mayor recuperación de cobre y ley acumulada de cobre que en el caso de octanol, que presentó mayores porcentajes de sílice en el concentrado.

- PEG300 muestra una cinética más rápida que octanol, lo que puede estar asociado a un efecto en la interacción partícula-burbuja.
- Como recomendación, para trabajos futuros se podría estudiar en profundidad el efecto de los espumantes en la cinética de flotación.

REFERENCIAS

1. Azgomi, Fariba. 2006. Characterizing frothers by their bubble size control properties. Tesis de Máster en Ingeniería. Montreal, Canadá. McGill University, Departamento de Minería e Ingeniería de Metales y Materiales. 99 h.
2. Azgomi F. Gómez C.O y J.A. Finch. 2007. Correspondence of gas holdup and bubble size in presence of different frothers. International Journal of mineral Processing, Vol. 83, 1-11 p.
3. Cho Y.S, Laskowski J.S. 2002. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. International Journal of mineral Processing, Vol. 64, 69-80 p.
4. Cortes, Franklin. 1998. Design of a gas holdup sensor for flotation diagnosis. Tesis de Máster en Ingeniería. Montreal, Canadá. McGill University, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalurgia. 133 h.
5. Crozier, R.Klimpel, R. 1989. Frothers: Plant Practice. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 5, 257-279 p.
6. Cytec Industries Inc. 2002. Mining Chemicals Handbook, 121-125 p.
7. Finch J.A., Dobby G.S.1990. Column Flotation, Pergamon Press, New York.
8. Finch J.A., Gelinas S. y Moyo P. 2006. Frother-related research at McGill University. Minerals Engineering, Vol.19, 726-733 p.
9. Finch J.A., J.E Nasset y Acuña C. 2008 .Role of frothers on bubble production and behaviour in flotation. International Journal of Mineral Engineering, Vol. 21, 949-957p.
10. Finch J.A., Xiao J., Hardie C. y Gomez C.O. 2000. Gas dispersion properties: bubble surface area flux and gas holdup. Mineral Engineering, Vol. 13, 365-372 p.
11. Flotación de minerales [en línea]. <<http://www.ex-alumnos.uda.cl/metalurgia/401/concentracion.minerales.1/05.Celdas.de.Flota%20cion.pdf>> [Consulta: 12 marzo 2012].

12. Flotation Fundamentals [en línea]. <http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/Flotation_Fundamentals.pdf> [Consulta 10 marzo 2012]
13. Gamboa, M.A. 2008. Caracterización de espumantes por el arrastre hidráulico de finos en el proceso de flotación. Memoria de Ingeniero en ejecución de Procesos Químicos. Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. 79p.
14. George P., Nguyen A.V y Jameson G.J. 2004. Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles. Minerals Engineering, Vol. 17, 847-853 p.
15. Konopacka, Z. Drzymala, J. 2010. Types of particles recovery-water recovery entrainment plots useful in flotation research. Adsorption.
16. Kracht, Willy. 2010. Apunte de concentración de minerales. Departamento de minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
17. Melo, Francisco. 2005. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. Tesis de Máster en Ciencia aplicada. University of british Columbia, Facultad de estudios para graduados en Ingeniería de minas. 124 h.
18. Melo F., Laskowski J.S. 2006. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. Minerals Engineering, Vol. 19, 766-773 p.
19. Moyo, Pamela. 2005. Characterizing frothers by water carrying rate. Tesis (Máster en Ingeniería). Montreal, Canadá. McGill University, Departamento de Minería e Ingeniería de Metales y Materiales. 100 h.
20. Moyo P., Gómez C.O. y J.A. Finch, 2007. Characterization of frothers using water carrying rate. Canadian Metallurgical Quarterly, 429-442 p.
21. Neethling S.J y Cilliers J.J. 2002. The entrainment of gangue into flotation froth. International Journal of Mineral Processing, Vol. 64, 123-134 p.
22. Neethling S.J y Cilliers J.J. 2003. Modelling flotation froths. International Journal of Mineral Processing, Vol. 72, 267-287 p.
23. Neethling S.J y Cilliers J.J. 2009. The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. International Journal of Mineral Processing, Vol. 93, 141-148 p.
24. Pavéz, Osvaldo. [s.a]. Apuntes Concentración de Minerales I. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama.

25. Ross V.E. 1990. Flotation and Entrainment of particles during Batch Flotation Test. *Minerals Engineering*, Vol. 3, N° 3/4, 145-156 p
26. Salager, Jean Louis, Forgiarini Ana. 2007. Fundamentos de la flotación. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Venezuela.
27. Shelley J. 1989. "A brief guide to flotation technology", *Mining History*, Vol 13, N°6.
28. Smith P.G, Warren L.J. 1989. Entrainment of Particles into Flotation Froths. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. Vol 5 pp 123-145.
29. Subrahmanyam T.V, Forrsson E. 1988. Froth Stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation-A Review. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 23, 33-53 p.
30. Trahar W.J. 1981. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 8, 289-327 p.
31. Ventura-Medina E, Cilliers J. 2002. A model to describe flotation performance based on physics of foams and froth image analysis. *International Journal of Mineral Processing*, Vol 67, 79-99 p.
32. Warren J.L. 1985. Determination of the contributions of flotation and entrainment in batch flotation test. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 14, 33-44 p.
33. Yianatos, Juan. 2005. Flotación de minerales. Departamento de procesos químicos, biotecnológicos y ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María.
34. Zhang, Weing. 2009. Water overflow rate and bubble surface area flux in flotation. Tesis de Máster en Ingeniería. Montreal, Canadá. McGill University, Departamento de minería e Ingeniería de Materiales. 105 h.
35. Zheng X., Johnson N.W y Franzidis J.P. 2006. Modelling of entrainment in industrial flotation cells: Water recovery and degree of entrainment. *Minerals Engineering*, Vol. 19, 1191-1203.

ANEXOS

A. Tablas de datos

Tabla A. 1. Triplicado de granulometría láser de las muestras de sílice de alimentación

Prueba	Tamaño Medio [μm]
1	10,321
2	10,349
3	10,286

Tabla A. 2. Análisis Químico de muestra de concentrado Las Tórtolas.

Muestra:	Concentrado PLT-1		
Cu-%	29.3	Ca-%	0.18
Fe-%	28.9	SiO ₂ -%	3.53
Pb-ppm	184	Zn-%	0.054
S-%	29.3	As-%	p

Tabla A. 3. Análisis Químico de las muestras de sílice utilizado.

Muestra	Cu %	SiO ₂ %	Ca %	Fe %
M-QA	0.005	95.6	0.035	0.68

Tabla A. 4. Datos de calibración del rotámetro.

Qg nominal [L/min]	Qg medido [L/min]
5	5,6
10	10,2
15	14,3
20	20,8
25	26,8

Tabla A. 5. Medición de conductividad con distintos J_g sin espumante.

J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0	1,744	0,00%	0,30%
0,12	1,696	1,84%	0,61%
0,21	1,679	2,51%	0,79%
0,34	1,65	3,65%	0,49%
0,43	1,624	4,68%	1,09%
0,56	1,616	5,00%	1,14%

Tabla A. 6. Datos ε_g - J_g para distintas concentraciones de X133.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,666	0,00%	0,10%
	0,12	1,565	4,12%	0,21%
	0,21	1,55	4,74%	0,47%
	0,34	1,524	5,85%	0,93%
	0,43	1,510	6,45%	0,72%
	0,56	1,461	8,54%	1,71%
0,3	0	1,664	0,00%	0,20%
	0,12	1,562	4,19%	0,36%
	0,21	1,48	4,79%	0,35%
	0,34	1,523	5,85%	0,89%
	0,43	1,484	7,50%	0,54%
	0,56	1,453	8,83%	0,12%
0,4	0	1,657	0,00%	0,10%
	0,12	1,561	3,94%	0,75%
	0,21	1,533	5,11%	0,55%
	0,34	1,514	5,91%	0,55%
	0,43	1,491	6,89%	0,70%
	0,56	1,452	8,58%	0,91%
0,5	0	1,672	0,00%	0,15%
	0,12	1,562	4,45%	0,53%
	0,21	1,543	5,26%	0,10%
	0,34	1,514	6,47%	0,71%

	0,43	1,500	7,07%	0,41%
	0,56	1,444	9,53%	0,44%

Tabla A. 7. Datos ε_g - J_g para distintas concentraciones de PEG400.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,705	0,00%	0,35%
	0,12	1,617	3,50%	0,81%
	0,21	1,591	4,56%	0,32%
	0,34	1,565	5,64%	1,24%
	0,43	1,558	5,91%	0,59%
	0,56	1,504	8,17%	0,65%
0,3	0	1,686	0,00%	0,12%
	0,12	1,593	3,75%	0,80%
	0,21	1,578	4,39%	1,21%
	0,34	1,554	5,38%	0,10%
	0,43	1,543	5,84%	0,17%
	0,56	1,486	8,26%	1,01%
0,4	0	1,665	0,00%	0,17%
	0,12	1,588	3,15%	0,20%
	0,21	1,567	3,99%	0,85%
	0,34	1,550	4,70%	0,72%
	0,43	1,535	5,35%	0,52%
	0,56	1,475	7,93%	0,40%
0,5	0	1,642	0,00%	0,10%
	0,12	1,566	3,11%	0,25%
	0,21	1,553	3,68%	0,82%
	0,34	1,537	4,35%	0,23%
	0,43	1,52	5,09%	1,05%
	0,56	1,459	7,70%	0,45%

Tabla A. 8. Datos ε_g - J_g para distintas concentraciones de octanol.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,654	0,00%	0,15%

	0,12	1,567	3,54%	0,45%
	0,21	1,538	4,76%	0,36%
	0,34	1,490	6,84%	0,96%
	0,43	1,468	7,76%	1,04%
	0,56	1,448	8,65%	0,70%
0,3	0	1,654	0,00%	0,15%
	0,12	1,567	3,54%	0,45%
	0,21	1,538	4,76%	0,36%
	0,34	1,490	6,84%	0,96%
	0,43	1,468	7,76%	1,04%
	0,56	1,448	8,65%	0,70%
0,4	0	1,590	0,00%	0,32%
	0,12	1,498	3,91%	0,36%
	0,21	1,471	5,10%	0,32%
	0,34	1,442	6,37%	0,21%
	0,43	1,426	7,11%	0,22%
	0,56	1,398	8,39%	0,35%
0,5	0	1,571	0,00%	0,15%
	0,12	1,486	3,65%	0,06%
	0,21	1,464	4,66%	0,40%
	0,34	1,427	6,30%	0,62%
	0,43	1,410	7,05%	0,78%
	0,56	1,384	8,25%	0,65%

Tabla A. 9. Datos ε_g - J_g para distintas concentraciones de pentanol.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,713	0,00%	0,10%
	0,12	1,635	3,08%	0,44%
	0,21	1,625	3,47%	0,30%
	0,34	1,600	4,51%	0,55%
	0,43	1,585	5,09%	0,70%
	0,56	1,558	6,21%	0,76%
0,3	0	1,724	0,00%	0,10%
	0,12	1,642	3,19%	0,31%
	0,21	1,630	3,69%	0,30%
	0,34	1,605	4,69%	0,96%
	0,43	1,582	5,65%	0,54%
	0,56	1,555	6,75%	0,55%
0,4	0	1,726	0,00%	0,15%

	0,12	1,643	3,26%	0,26%
	0,21	1,625	4,00%	0,25%
	0,34	1,612	4,52%	0,40%
	0,43	1,583	5,69%	0,97%
	0,56	1,555	6,82%	0,50%
0,5	0	1,729	0,00%	0,10%
	0,12	1,651	3,06%	0,35%
	0,21	1,634	3,73%	0,25%
	0,34	1,611	4,67%	0,80%
	0,43	1,587	5,64%	1,26%
	0,56	1,553	7,02%	0,55%

Tabla A. 10. Datos ε_g - J_g para distintas concentraciones de hexanol.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,713	0,00%	0,10%
	0,12	1,635	3,08%	0,44%
	0,21	1,625	3,47%	0,30%
	0,34	1,600	4,51%	0,55%
	0,43	1,585	5,09%	0,70%
	0,56	1,558	6,21%	0,76%
0,3	0	1,756	0,00%	0,15%
	0,12	1,645	4,30%	0,51%
	0,21	1,635	4,71%	0,44%
	0,34	1,603	6,01%	0,93%
	0,43	1,574	7,17%	0,41%
	0,56	1,544	8,40%	0,50%
0,4	0	1,707	0,00%	0,29%
	0,12	1,606	4,04%	0,65%
	0,21	1,587	4,79%	0,62%
	0,34	1,552	6,24%	0,63%
	0,43	1,545	6,54%	0,54%
	0,56	1,509	8,06%	0,72%
0,5	0	1,688	0,00%	0,28%
	0,12	1,594	3,78%	0,28%
	0,21	1,566	4,95%	0,58%
	0,34	1,545	5,82%	0,10%
	0,43	1,514	7,10%	0,60%

	0,56	1,477	8,71%	0,57%
--	------	-------	-------	-------

Tabla A. 11. Datos ϵ_g - J_g para distintas concentraciones de heptanol.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ϵ_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,850	0,00%	0,46%
	0,12	1,727	4,52%	0,29%
	0,21	1,707	5,28%	0,17%
	0,34	1,671	6,67%	0,68%
	0,43	1,632	8,17%	0,54%
	0,56	1,612	8,95%	0,41%
0,3	0	1,815	0,00%	0,23%
	0,12	1,701	4,28%	0,44%
	0,21	1,675	5,31%	0,38%
	0,34	1,638	6,75%	0,53%
	0,43	1,613	7,72%	0,71%
	0,56	1,573	9,31%	1,42%
0,4	0	1,794	0,00%	0,35%
	0,12	1,681	4,32%	0,59%
	0,21	1,649	5,56%	0,23%
	0,34	1,613	6,99%	0,64%
	0,43	1,590	7,88%	0,97%
	0,56	1,554	9,34%	0,53%
0,5	0	1,769	0,00%	0,17%
	0,12	1,666	3,97%	0,59%
	0,21	1,637	5,12%	0,50%
	0,34	1,607	6,30%	0,40%
	0,43	1,576	7,55%	0,79%
	0,56	1,538	9,10%	0,55%

Tabla A. 12. Datos ϵ_g - J_g para distintas concentraciones de Aerofroth 70.

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ϵ_g [%]	Desv. Estándar
0,2	0	1,875	0,00%	0,17%
	0,12	1,775	3,65%	0,66%

	0,21	1,758	4,28%	0,70%
	0,34	1,728	5,39%	0,26%
	0,43	1,693	6,69%	0,78%
	0,56	1,673	7,45%	0,24%
0,3	0	1,853	0,00%	0,21%
	0,12	1,752	3,68%	0,42%
	0,21	1,728	4,57%	0,26%
	0,34	1,707	5,40%	0,40%
	0,43	1,669	6,83%	0,94%
	0,56	1,637	8,06%	0,68%
0,4	0	1,830	0,00%	0,15%
	0,12	1,732	3,64%	0,31%
	0,21	1,713	4,35%	0,30%
	0,34	1,682	5,55%	0,32%
	0,43	1,646	6,95%	0,46%
	0,56	1,614	8,20%	0,42%
0,5	0	1,811	0,00%	0,21%
	0,12	1,718	3,50%	0,26%
	0,21	1,694	4,39%	0,36%
	0,34	1,667	5,45%	0,61%
	0,43	1,623	7,17%	0,52%
	0,56	1,591	8,46%	1,18%

Tabla A. 13. Medición de conductividad a distintos J_g para PEG300 a 0,5 [mmol/L].

J_g [cm/s]	Conductividad [mS]	ε_g [%]	Desv. Estándar
0	1,428	0,00%	0,22%
0,12	1,353	3,56%	0,10%
0,21	1,333	4,52%	0,34%
0,34	1,318	5,25%	0,33%
0,43	1,308	5,75%	0,93%
0,56	1,281	7,10%	0,29%

Tabla A. 14. ε_g promedio para MIBC a distintas concentraciones para distintos J_g

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	ε_{g1} [%]	ε_{g2} [%]	ε_{g3} [%]	ε_g Promedio	Desv. Estándar
0,2	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,12	3,4%	3,5%	3,7%	3,5%	3,5%
	0,21	3,9%	3,9%	4,4%	4,1%	4,1%
	0,34	5,4%	4,7%	5,8%	5,3%	5,3%
	0,43	6,5%	6,4%	6,8%	6,6%	6,6%
	0,56	7,7%	8,1%	8,0%	7,9%	7,9%
0,3	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,12	3,4%	3,7%	3,7%	3,6%	0,2%
	0,21	4,0%	4,0%	4,5%	4,2%	0,3%
	0,34	5,2%	4,9%	5,9%	5,3%	0,5%
	0,43	6,2%	6,4%	6,9%	6,5%	0,4%
	0,56	7,6%	7,6%	8,1%	7,8%	0,3%
0,4	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,12	3,5%	3,3%	3,5%	3,5%	0,1%
	0,21	4,2%	3,9%	4,5%	4,2%	0,3%
	0,34	5,4%	4,9%	6,0%	5,4%	0,5%
	0,43	6,8%	6,3%	7,3%	6,8%	0,5%
	0,56	8,5%	7,4%	8,2%	8,0%	0,5%
0,5	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,12	3,5%	3,3%	3,5%	3,4%	0,1%
	0,21	4,1%	4,0%	4,6%	4,3%	0,3%
	0,34	5,6%	5,1%	6,1%	5,6%	0,5%
	0,43	6,5%	6,2%	7,1%	6,6%	0,4%
	0,56	7,6%	7,2%	8,2%	7,7%	0,5%

Tabla A. 15. ε_g promedio para PEG300 a distintas concentraciones para distintos J_g .

Concentración [mmol/L]	J_g [cm/s]	ε_{g1} [%]	ε_{g2} [%]	ε_{g3} [%]	ε_g Promedio	Desv. Estándar
0,2	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,12	2,32%	2,45%	2,46%	2,41%	0,08%
	0,21	3,46%	3,93%	3,55%	3,65%	0,25%
	0,34	4,56%	4,64%	5,20%	4,80%	0,35%
	0,43	5,37%	5,78%	5,94%	5,70%	0,30%

	0,56	6,31%	6,49%	7,12%	6,64%	0,43%
0,3	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,12	2,74%	2,78%	2,83%	2,78%	0,05%
	0,21	3,85%	3,83%	3,82%	3,83%	0,02%
	0,34	4,86%	4,71%	5,08%	4,88%	0,19%
	0,43	6,26%	5,91%	6,09%	6,08%	0,18%
	0,56	6,89%	7,03%	7,10%	7,00%	0,11%
0,4	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,12	3,01%	2,89%	2,97%	2,95%	0,06%
	0,21	4,00%	4,06%	3,64%	3,90%	0,22%
	0,34	5,59%	5,34%	5,09%	5,34%	0,25%
	0,43	6,44%	6,08%	6,11%	6,21%	0,20%
	0,56	7,53%	7,11%	6,91%	7,18%	0,32%
0,5	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,12	3,06%	2,97%	3,00%	3,01%	0,04%
	0,21	3,94%	4,11%	3,73%	3,93%	0,19%
	0,34	5,43%	5,50%	5,16%	5,36%	0,18%
	0,43	6,44%	6,44%	6,34%	6,41%	0,06%
	0,56	7,06%	7,26%	7,20%	7,17%	0,10%

Tabla A. 16. Cinética de flotación para MIBC 0,5 [mmol/L] y cuarzo.

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,416	0%		
0-1	1,229	9,21%	12,4	109,19
1-2	1,221	9,62%	14,13	78,91
2-4	1,201	10,66%	18,62	202,02
4-8	1,211	10,14%	23,4	324,95
8-12	1,246	8,34%	15,96	234,96
final	1,367		917,94	

Tabla A. 17. Cinética de flotación para heptanol 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,430	0%		
0-1	1,209	10,88%	27,58	218,72

1-2	1,213	10,67%	9,96	96,35
2-4	1,209	10,88%	18,02	191,31
4-8	1,185	12,13%	27,42	330,72
8-12	1,194	11,66%	23,28	307,64
final	1,346	4,01%	866,03	

Tabla A. 18. Cinética de flotación para PEG 400 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,295	0%		
0-1	1,121	9,36%	26,37	205,62
1-2	1,097	10,72%	13,03	125,48
2-4	1,098	10,67%	22,23	276,16
4-8	1,093	10,95%	28,72	440,68
8-12	1,094	10,90%	25,81	442,2
final	1,218	4,03%	881,78	

Tabla A. 19. Cinética de flotación para PEG 200 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,319	0%		
0-1	1,161	8,32%	2,19	26,16
1-2	1,155	8,65%	4,75	55,11
2-4	1,135	9,75%	11,15	139,23
4-8	1,171	7,77%	16,33	258,56
8-12	1,167	7,99%	11,42	212,3
Final	1,294	1,27%	950,11	

Tabla A. 20. Cinética de flotación para hexanol 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,464	0%		
0-1	1,263	9,59%	9,62	81,51
1-2	1,279	8,79%	6,98	68,45
2-4	1,275	8,99%	12,28	137,82
4-8	1,259	9,79%	20,03	264,8

8-12	1,254	10,04%	13,71	213,65
final	1,403	2,82%	903,28	

Tabla A. 21. Cinética de flotación para PEG300 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,410	0%		
0-1	1,217	9,55%	9,65	86,96
1-2	1,206	10,12%	10,82	111,22
2-4	1,175	11,75%	16,1	196
4-8	1,181	11,43%	22,29	331,79
8-12	1,174	11,80%	16,83	303,99
final	1,286	6,02%	918,41	

Tabla A. 22. Cinética de flotación para octanol 0,5 [mmol/L] y cuarzo

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,332	0%		
0-1	1,124	10,98%	28,03	232,52
1-2	1,117	11,37%	15,83	134,55
2-4	1,117	11,37%	23,25	202,77
4-8	1,126	10,87%	31,51	315,88
8-12	1,135	10,37%	29,23	310,31
final	1,287	2,26%	850,2	

Tabla A. 23. Cinética de flotación para PEG300 0,5 [mmol/L] y cuarzo (Prueba 2)

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,384	0%		
0-1	1,214	8,52%	6,62	73,51
1-2	1,202	9,15%	9,24	109,41
2-4	1,190	9,79%	18,76	235,36
4-8	1,198	9,36%	25,87	414,77
8-12	1,204	9,05%	19,47	350,31
final	1,271	5,57%	909,65	

Tabla A. 24. Cinética de flotación para PEG300 0,5 [mmol/L] y cuarzo (Prueba 3)

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,415	0%		
0-1	1,203	10,53%	10,81	116,33
1-2	1,193	11,05%	10,64	126,39
2-4	1,170	12,26%	15,2	213,89
4-8	1,219	9,70%	23,97	384,39
8-12	1,219	9,70%	22,66	407,23
final	1,330	4,10%	906,74	

Tabla A. 25. Cinética de flotación para octanol 0,5 [mmol/L] y cuarzo (Prueba 2)

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,273	0%		
0-1	1,099	9,56%	24,75	212,71
1-2	1,086	10,31%	11,42	112,61
2-4	1,080	10,66%	18,28	192,14
4-8	1,099	9,56%	35,77	393,92
8-12	1,128	7,91%	35,3	408,68
final	1,264	0,47%	869,03	

Tabla A. 26. Cinética de flotación para octanol 0,5 [mmol/L] y cuarzo (Prueba 3)

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,319	0%		
0-1	1,124	10,37%	22,43	178,33
1-2	1,134	9,81%	10,24	93,8
2-4	1,136	9,70%	20,27	193,19
4-8	1,145	9,20%	41,72	411,91
8-12	1,156	8,59%	39,96	416,94
Final	1,300	0,96%	856,09	

Tabla A. 27. Resultados triplicado octanol 0,5 [mmol/L] para Rec. de agua y Rec. por arrastre.

Tiempo [min]		Rec. arrastre	Rec. agua	ε_g [%]	ENT
1	Prueba 1	2,86%	4,96%	10,99	0,528
2		4,47%	7,83%		
4		6,85%	12,15%		
8		10,06%	18,89%		
12		13,04%	25,50%		
1	Prueba 2	2,49%	4,62%	10,03	0,4525
2		3,63%	7,07%		
4		5,47%	11,25%		
8		9,06%	19,81%		
12		12,60%	28,70%		
1	Prueba 3	2,26%	3,88%	9,77	0,4939
2		3,29%	5,92%		
4		5,33%	10,12%		
8		9,54%	19,07%		
12		13,57%	28,13%		

Tabla A. 28. Resultados triplicado PEG 300 0,5 [mmol/L] para Rec. de agua y Rec. por arrastre

Tiempo [min]		Rec. arrastre	Rec. agua	ε_g [%]	ENT
1	Prueba 1	0,97%	1,89%	10,93	0,3618
2		2,06%	4,31%		
4		3,68%	8,57%		
8		5,92%	15,78%		
12		7,61%	22,39%		
1	Prueba 2	0,67%	1,60%	9,18	0,3274
2		1,60%	3,98%		
4		3,49%	9,09%		
8		6,10%	18,11%		
12		8,06%	25,73%		
1	Prueba 3	1,09%	2,53%	10,65	0,3245
2		2,16%	5,28%		
4		3,70%	9,93%		
8		6,11%	18,28%		
12		8,40%	27,14%		

Tabla A. 29. Tamaño medio de los concentrados para cada espumante.

Espumante	Tamaño Medio [μm]
Hexanol	4,791
MIBC	5,08
Heptanol	5,916
Octanol	6,82
PEG200	4,183
PEG 300	4,89
PEG400	4,534

Tabla A. 30. Valores reales de agua y cuarzo alimentado a las pruebas con distintos espumantes.

Espumante	Agua alimentada [cm³]	Cuarzo alimentado [g]
MIBC	4580	1001,37
Octanol	4690	980,26
PEG200	4600	1002,85
Hexanol	4600	968,47
PEG300	4600	994,27
PEG400	4600	999,21
Heptanol	4600	973,67
PEG300-2	4600	991,45
PEG300-3	4600	991,71
Octanol-2	4600	995,94
Octanol-3	4600	992,38

Tabla A. 31. Cinética de flotación para prueba con octanol, sílice y colector.

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,751	0%		
0-1	1,550	7,96%	13,83	139,39
1-2	1,526	8,95%	8,26	99,35
2-4	1,535	8,58%	16,53	196,25
4-8	1,521	9,16%	26,69	332,93

8-12	1,550	7,96%	24,15	310,7
Final	1,699	2,00%	911,62	

Tabla A. 32. Cinética de flotación para prueba PEG300, sílice y colector.

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas holdup [%]	Cuarzo Recuperado [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,759	0%		
0-1	1,555	8,03%	6,5	104,07
1-2	1,579	7,05%	5,03	89,66
2-4	1,537	8,77%	8,8	173,58
4-8	1,587	6,73%	15,1	321,95
8-12	1,598	6,28%	14	296,07
Final	1,719	1,52%	955,39	

Tabla A. 33. Cinética de flotación para prueba con octanol, sílice, concentrado y colector.

Tiempo [min]	Cobre en Concentrado [g]	Cuarzo en Concentrado [g]	%Cobre	Ley Acumulada Cu [%]	%Cuarzo	Recuperación de Cobre [%]
0-1	3,10	2,61	21,6	21,6%	18,2	14,2%
1-2	3,47	3,50	20,8	21,2%	21	30,2%
2-4	4,02	6,00	17,7	19,7%	26,4	48,7%
4-8	4,99	14,06	14,3	17,6%	40,3	71,6%
8-12	1,90	15,73	7,7	15,4%	63,7	80,4%
Final	4,27	870,19	0,437	1	89,1	

Tabla A. 34. Cinética de flotación para prueba con octanol, sílice, concentrado y colector.

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas hodup [%]	Concentrado Total [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,721	0%		
0-1	1,563	6,30%	14,33	38,1
1-2	1,566	6,18%	16,69	53,43
2-4	1,561	6,38%	22,74	90,99

4-8	1,555	6,63%	34,9	200,56
8-12	1,505	8,72%	24,69	228,28
Final	1,704	0,66%	976,64	

Tabla A. 35. Cinética de flotación para prueba con PEG300, sílice, concentrado y colector.

Tiempo [min]	Cobre en Concentrado [g]	Cuarzo en Concentrado [g]	%Cobre	Ley Acumulada Cu [%]	%Cuarzo	Recuperación de Cobre [%]
0-1	6,88	2,94	22,3	9,54	22,30%	34,2%
1-2	3,60	1,39	22,7	8,77	22,44%	52,1%
2-4	4,16	3,58	19,9	17,1	21,65%	72,8%
4-8	2,99	6,65	15,3	34	20,23%	87,7%
8-12	0,96	9,71	6,5	65,5	18,23%	92,5%
Final	1,50	829,37	0,152	83,9		

Tabla A. 36. Cinética de flotación para prueba con PEG300, sílice, concentrado y colector.

Tiempo [min]	Conductividad [mS]	Gas hodup [%]	Concentrado Total [g]	Agua Recuperada [g]
0	1,554	0%		
0-1	1,425	5,68%	30,83	64,86
1-2	1,346	9,33%	15,85	41,42
2-4	1,402	6,73%	20,91	94,12
4-8	1,417	6,04%	19,56	200,55
8-12	1,432	5,36%	14,82	250,65
Final	1,464	3,91%	988,52	

Tabla A. 37. Análisis químico de concentrados por intervalo de tiempo para prueba con octanol.

Concentrado	Cu %	SiO2 %
Intervalo 0-1	21.6	18.2
Intervalo 1-2	20.8	21.0
Intervalo 2-4	17.7	26.4
Intervalo 4-8	14.3	40.3

Intervalo 8-12	7.70	63.7
Relave	0.437	89.1

Tabla A. 38. Análisis químico de concentrados por intervalo de tiempo para prueba con PEG300.

Muestra	Cu %	SiO2 %
Intervalo 0-1	22.3	9.54
Intervalo 1-2	22.7	8.77
Intervalo 2-4	19.9	17.1
Intervalo 4-8	15.3	34.0
Intervalo 8-12	6.50	65.5
Relave	0.152	83.9

Tabla A. 39. Cinética de flotación y ajuste de García Zúñiga para prueba con PEG300.

Tiempo [min]	Peso Cu [g]	Rec. Parcial [%]	Rec Acum [%]	Rec G-Z [%]	(R _{GZ} -R _{acum}) ²
1	6,87509	34,22	34,22	31,36	8,1
2	3,59795	17,91	52,12	52,10	0,0
4	4,16109	20,71	72,83	74,86	4,1
8	2,99268	14,89	87,73	89,15	2,0
12	0,9633	4,79	92,52	91,88	0,4
Relave	1,5025504				
Alimentación Cu [g]	20,1			Fn Objetivo	14,7

Tabla A. 40. Cinética de flotación y ajuste de García Zúñiga para prueba con octanol.

Tiempo	Peso Cu	Rec.	Rec	Rec GZ	(R _{GZ} -
--------	---------	------	-----	--------	--------------------

[min]	[g]	Parcial [%]	Acum [%]	[%]	R_acum)^2
1	3,09528	14,23	14,23	15,57	1,8
2	3,47152	15,96	30,19	28,52	2,8
4	4,02498	18,50	48,69	48,24	0,2
8	4,9907	22,94	71,64	71,33	0,1
12	1,90113	8,74	80,38	82,38	4,0
Relave	4,2679168				
Alimentación Cu [g]	21,8			Fn Objetivo	8,9

B. Figuras

1. Identificación de fases cristalinas para la muestra PLT1.

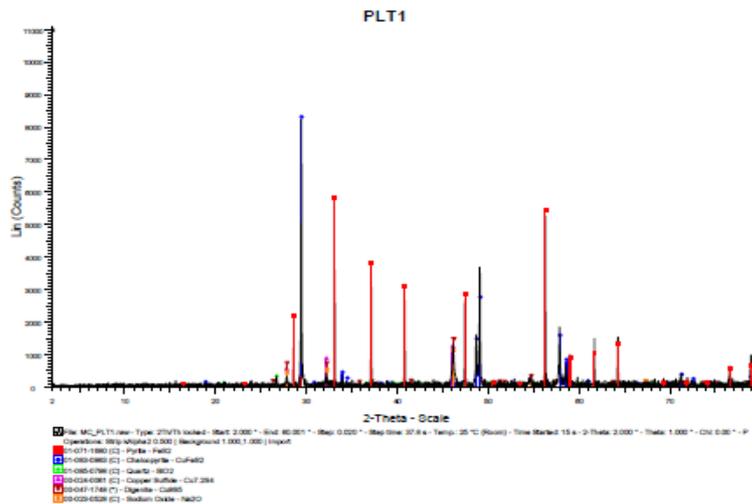


Tabla N° 1- Fases cristalinas identificadas en la muestra PLT1.

CÓDIGO PDF	NOMBRE DEL COMPUESTO	FORMULA
01-071-1680	Pyrite	FeS ₂
01-083-0983	Chalcopyrite	CuFeS ₂
01-085-0798	Quartz	SiO ₂
00-024-0061	Copper Sulfide	Cu _{7.2} S ₄
00-047-1748	Digenite	Cu ₉ S ₅
00-023-0528	Sodium Oxide	Na ₂ O

Figura B. 1. Difracción de rayos X del concentrado de Las Tórtolas.

Quartz low

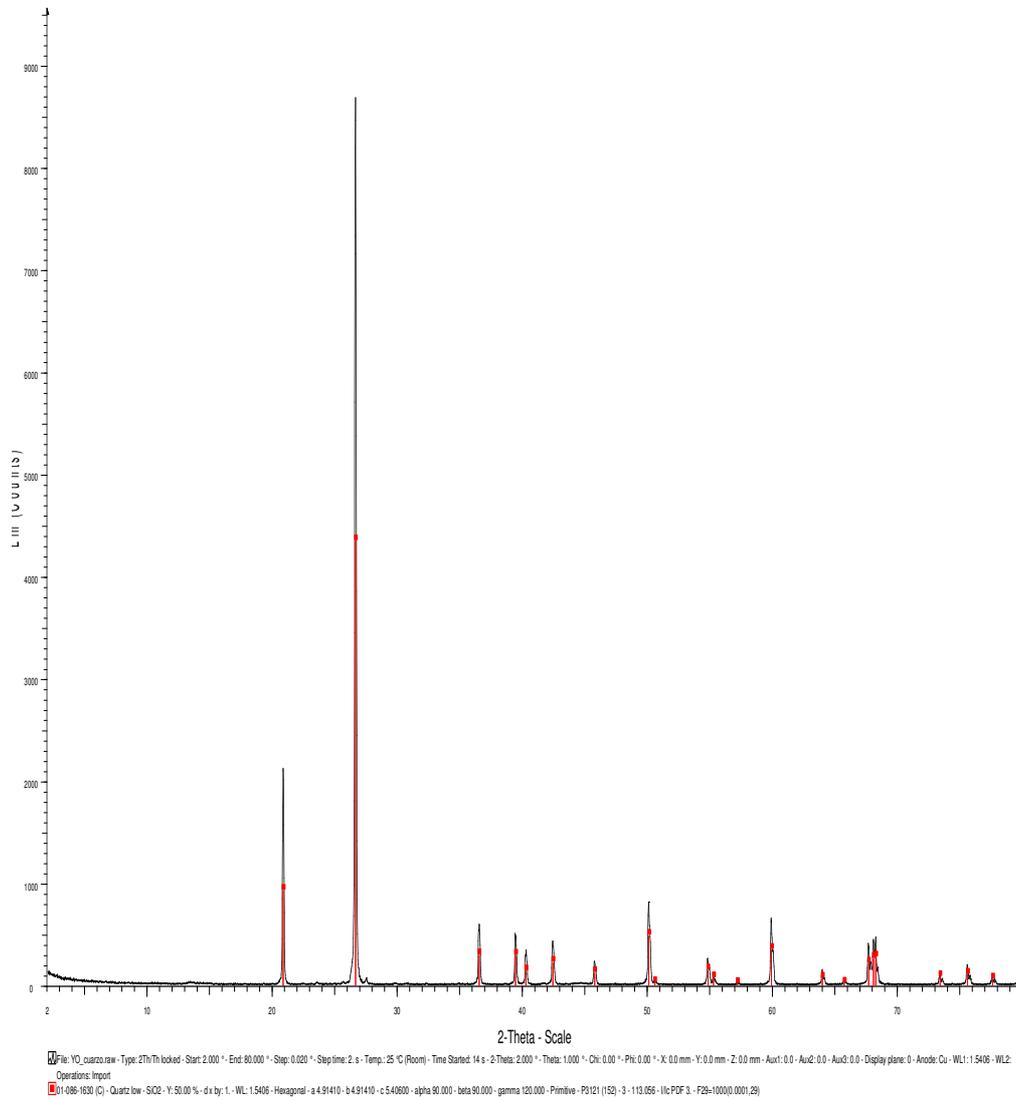


Figura B. 2. Difracción de rayos X para muestra de sílice utilizada.

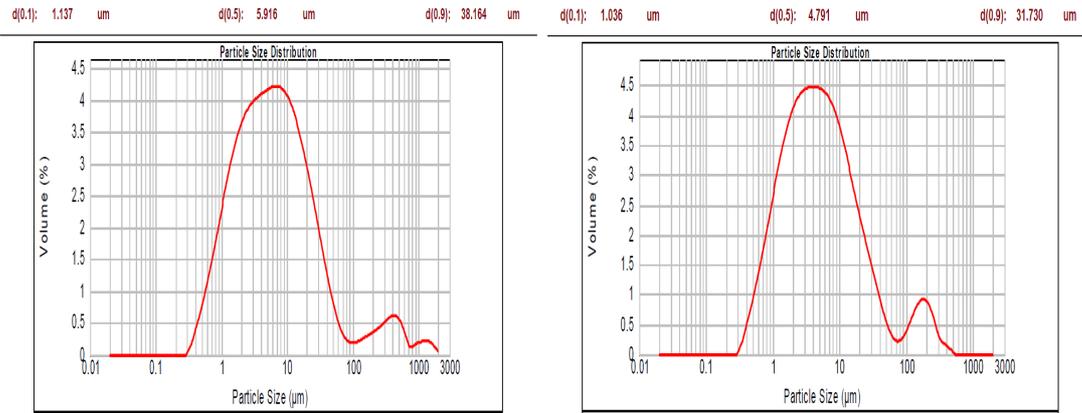


Figura B. 3. Distribución granulométrica para concentrado de prueba con heptanol (izquierda) y hexanol (derecha).

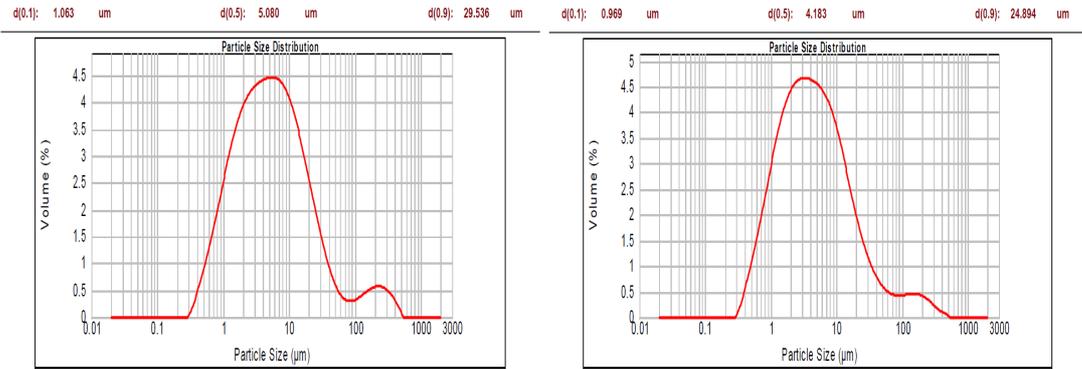


Figura B. 4. Distribución granulométrica para concentrado de prueba con MIBC (izquierda) y PEG200 (derecha).

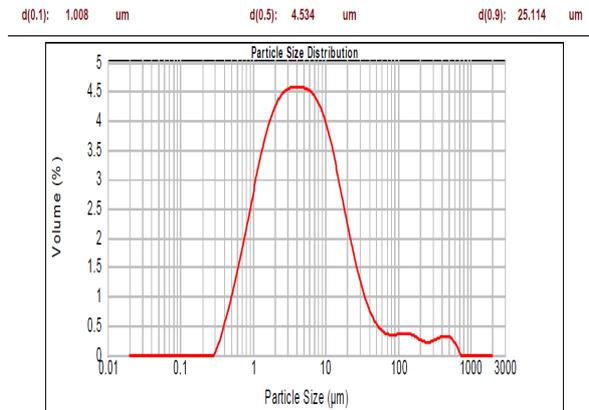


Figura B. 5. Distribución granulométrica para concentrado de prueba PEG400.

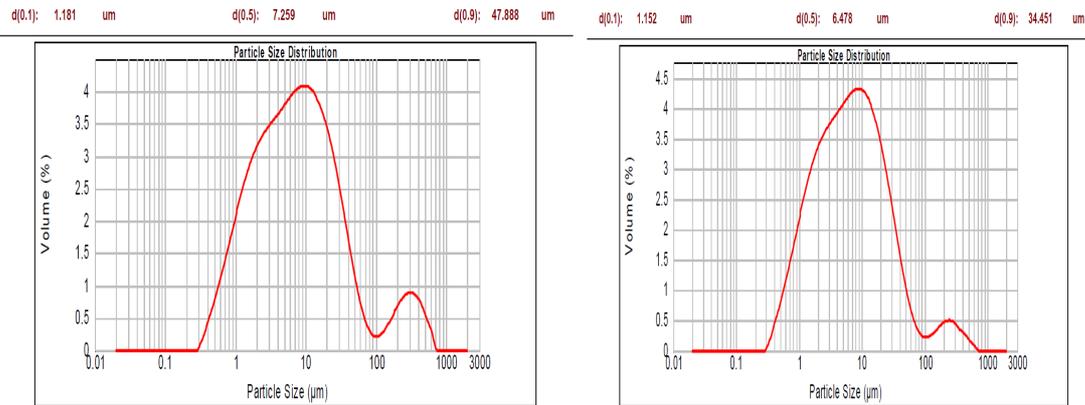


Figura B. 6. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para primera prueba con octanol.

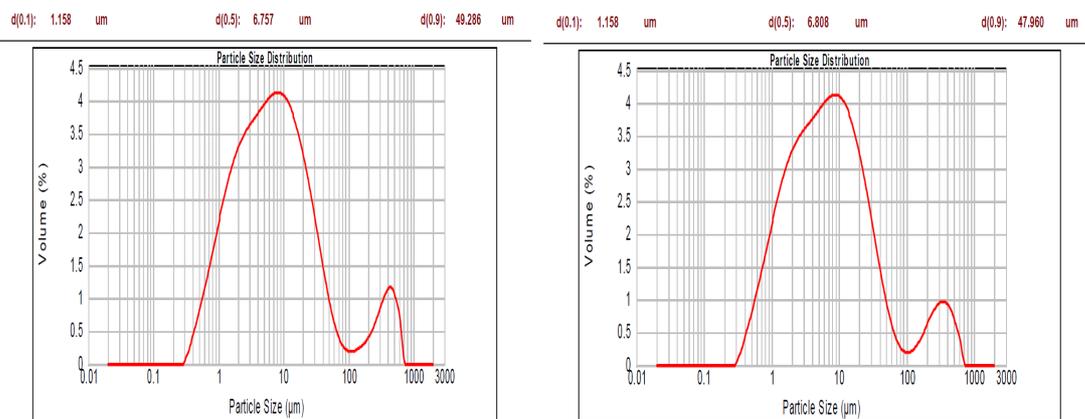


Figura B. 7. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) minutos para primera prueba con octanol.

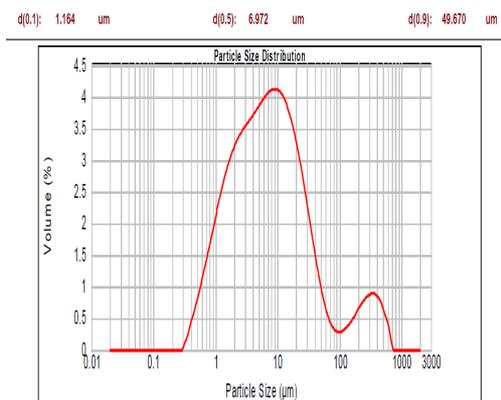


Figura B. 8. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 para primera prueba con octanol.

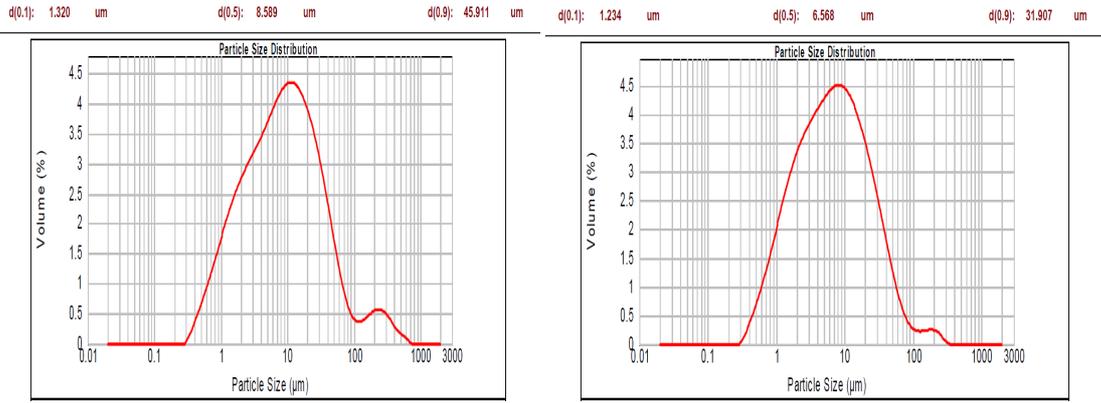


Figura B. 9. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para segunda prueba con octanol.

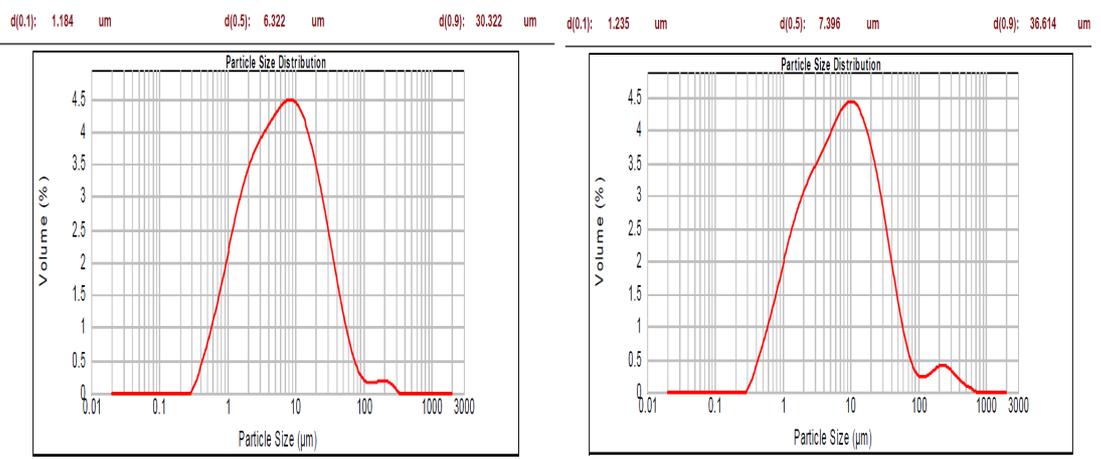


Figura B. 10. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) minutos para segunda prueba con octanol.

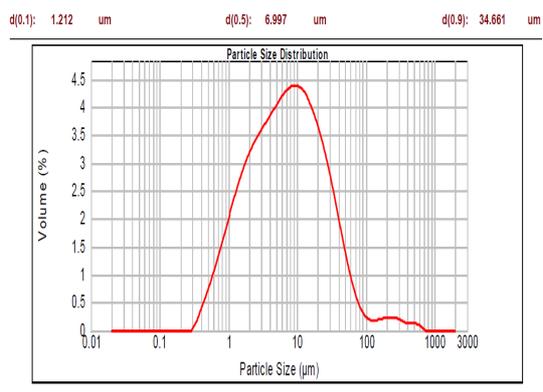


Figura B. 11. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 para segunda prueba con octanol.

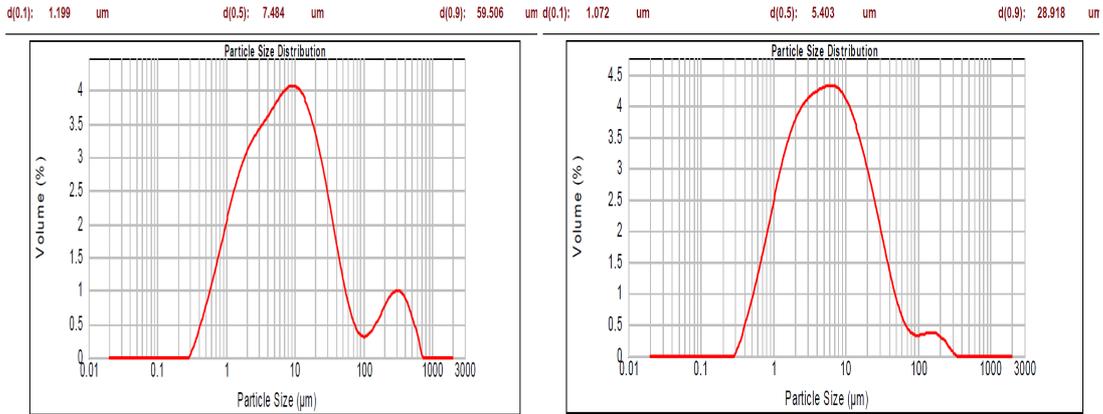


Figura B. 12. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para tercera prueba con octanol.

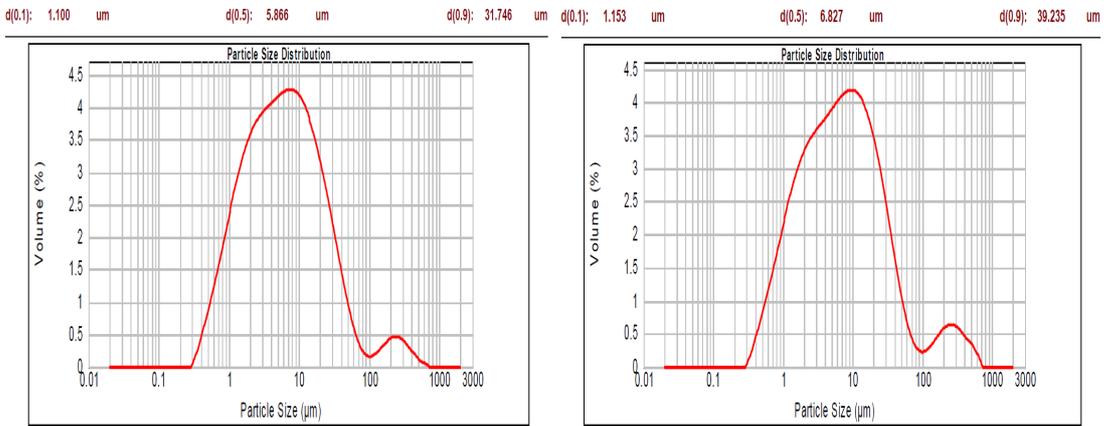


Figura B. 13. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) para tercera prueba con octanol.

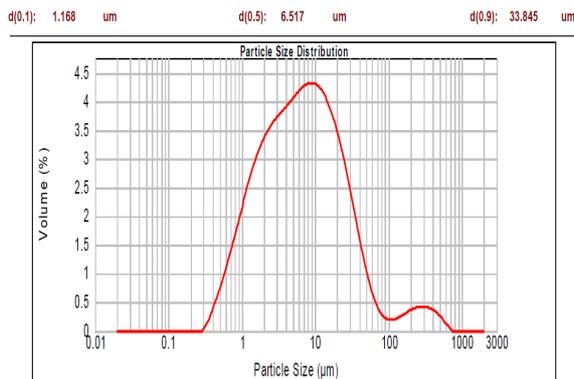


Figura B. 14. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 para tercera prueba con octanol.

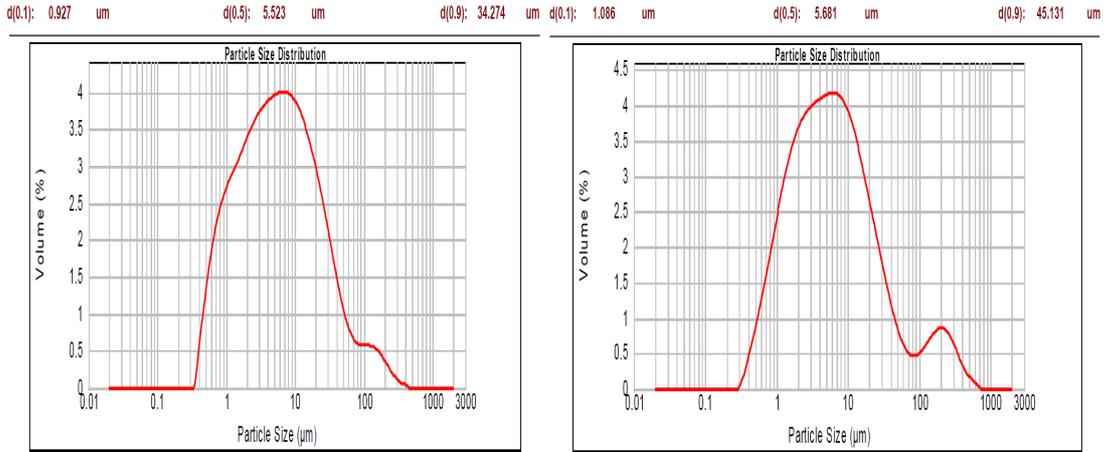


Figura B. 15. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para primera prueba con PEG300.

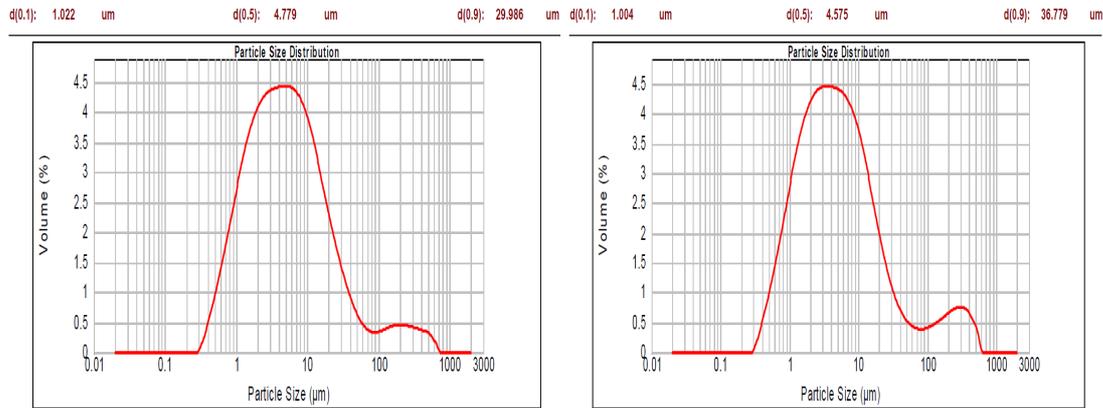


Figura B. 16. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) minutos para primera prueba con PEG300.

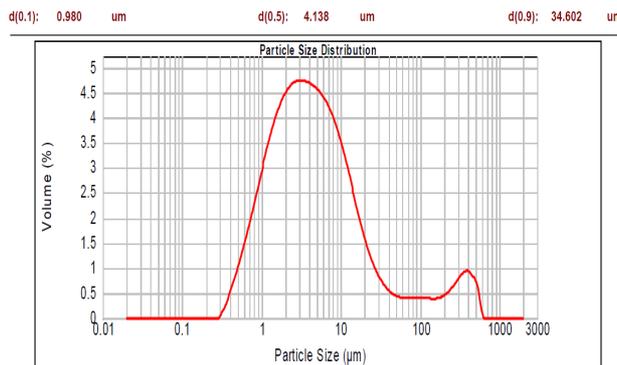


Figura B. 17. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 para primera prueba con PEG300.

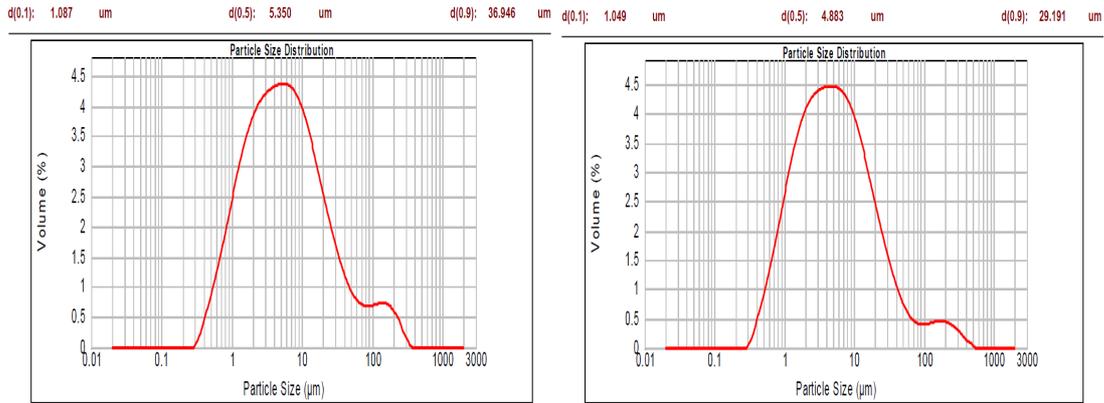


Figura B. 18. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para segunda prueba con PEG300.

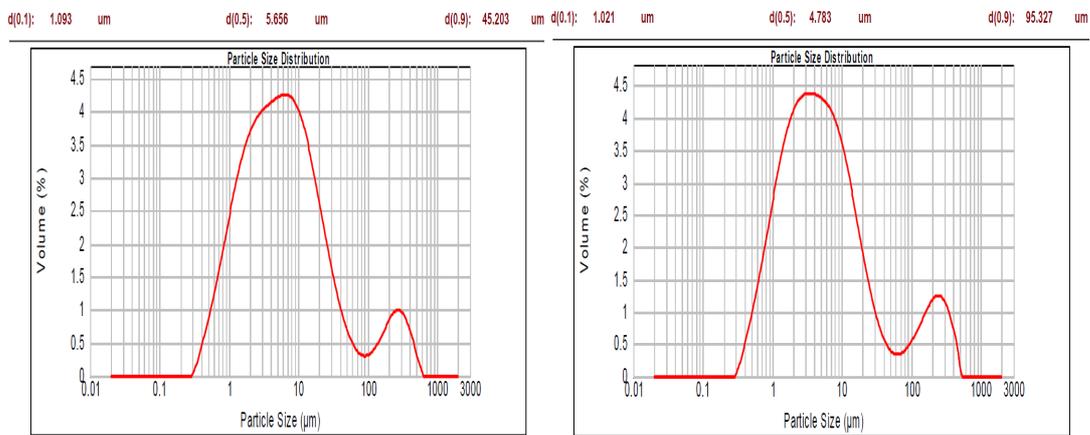


Figura B. 19. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) minutos para segunda prueba con PEG300.

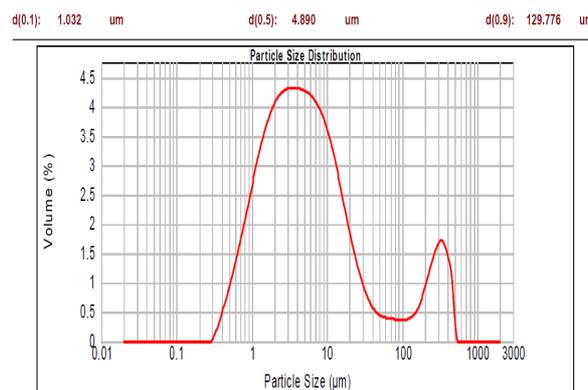


Figura B. 20. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 minutos para segunda prueba con PEG300.

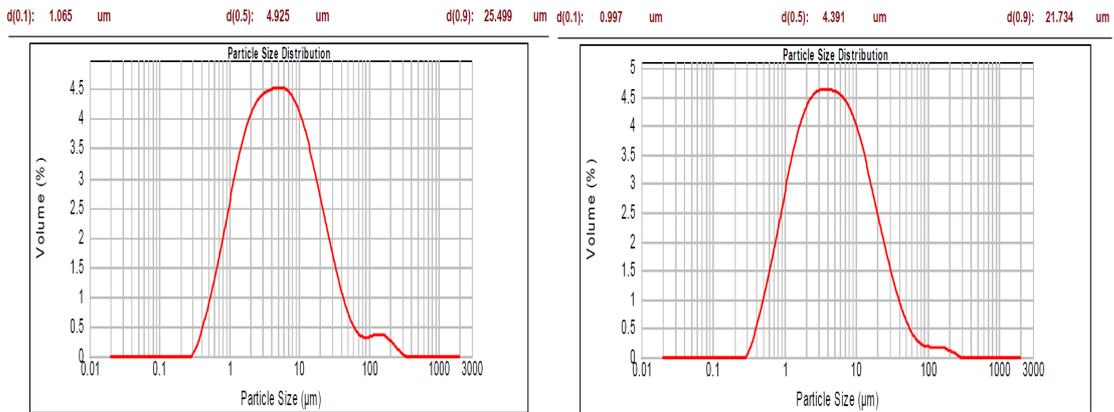


Figura B. 21. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 0-1 (izquierda) y 1-2 (derecha) minutos para tercera prueba con PEG300.

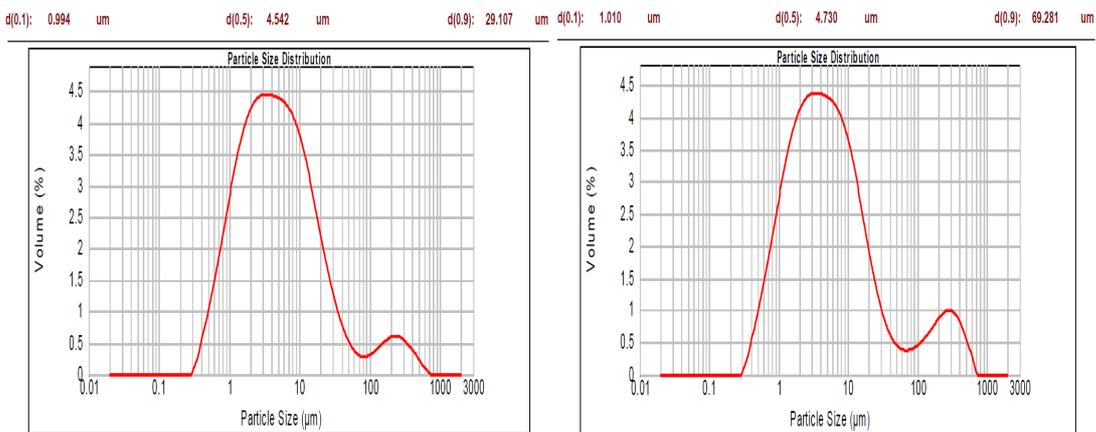


Figura B. 22. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 2-4 (izquierda) y 4-8 (derecha) minutos para tercera prueba con PEG300.

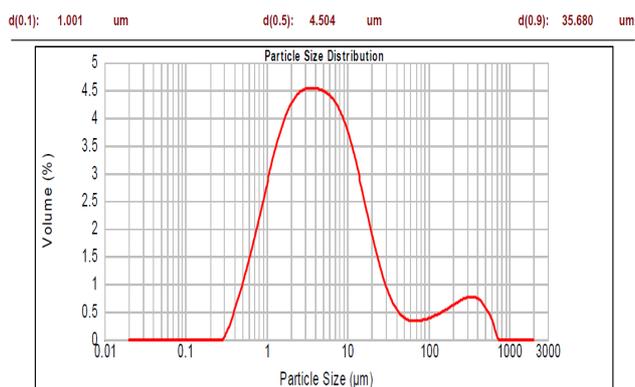


Figura B. 23. Distribución granulométrica del concentrado del intervalo de tiempo 8-12 para tercera prueba con PEG300.

C. Ejemplos de cálculo

a. Cálculo de Q_g real

Para un flujo de aire utilizado de 3 [L/min] utilizando la Ecuación 11, se calcula el flujo de aire real como sigue:

$$Q_{greal} \left[\frac{L}{min} \right] = 1,0628 * 3 \left[\frac{L}{min} \right] - 0,4076 = 2,78 \left[\frac{L}{min} \right]$$

Para obtener el resultado en unidades del S.I, se tiene

$$Q_g = \frac{2,78 \left[\frac{L}{min} \right] * 1000 \left[\frac{cm^3}{L} \right]}{60 \left[\frac{s}{min} \right]} = 46,35 \left[\frac{cm^3}{s} \right]$$

b. Cálculo de J_g real

Tomando los datos de la Tabla 4, para un flujo nominal de 3 [L/min] se tiene un flujo real de 2,78 [L/min] (o 46,35 [cm³/s]).

Luego, la velocidad superficial del gas J_g real se calcula según la Ecuación 4 con un área de 397 [cm²].

$$J_{greal} = \frac{Q_g}{A} = \frac{46,35 \left[\frac{cm^3}{s} \right]}{397 \left[cm^2 \right]} = 0,12 \left[\frac{cm}{s} \right]$$

c. Cálculo de ϵ_g

Tomando la Ecuación 3 y los valores de conductividad de la Tabla A.5, se tiene que la conductividad de la pulpa sin aire a $J_g = 0$ (K_c) es 1,744 [mS] y la conductividad para $J_g = 0,58$ (K_d) es 1,616 [mS], con lo que la ecuación queda:

$$\varepsilon_g = \frac{1 - \left(\frac{K_d}{K_c}\right)}{1 + 0,5 \left(\frac{K_d}{K_c}\right)} * 100 = \frac{1 - \left(\frac{1,616}{1,744}\right)}{1 + 0,5 \left(\frac{1,616}{1,744}\right)} * 100 = 5,01\%$$

d. Cálculo de la recuperación de agua

Se utilizó la Ecuación 9 y la Tabla A.15 donde el agua recuperada para el intervalo de tiempo 0-1 es de 109,19 [g]. Según las condiciones descritas en la metodología de las pruebas con sólido, se usó una cantidad inicial de agua de 4600 [cm³] de agua. Convirtiendo a volumen esta cantidad con una densidad del agua de 1 [g/cm³] se tienen 4600 [g] de agua de alimentación, por lo que la recuperación de agua se calcula como:

$$R_w = \frac{\text{Peso de agua recuperada}}{\text{Peso de agua inicialmente en pulpa}} * 100\% = \frac{109,19[g]}{4600[g]} * 100\% = 2,37\%$$

e. Cálculo de la recuperación de cuarzo

Se utilizó la Ecuación 10 y la Tabla A.16, donde la cantidad de cuarzo recuperado para el intervalo de tiempo 0-1 es de 12,4 [g]. Ocupando la Tabla A.30, donde aparecen las condiciones reales de cada prueba, se obtiene que para la prueba con sólido de MIBC la cantidad de cuarzo alimentado es de 1001,37 [g], por lo que la recuperación de cuarzo se calcula como:

$$\%Re = \frac{\text{Fino Concentrado}}{\text{Fino en Alimentación}} * 100\% = \frac{12,4}{1001,37} * 100\% = 1,238\%$$

f. Cálculo de recuperación de cobre por modelo García-Zúñiga

Tomando la Tabla A.39, con la herramienta "Solver" del programa Excel, se obtuvo el valor de k_c y R_∞ para la prueba con PEG300. Luego con $k_c=0,414$ y $R_\infty=92,52$ se tiene que para 1 minuto de flotación la recuperación se calcula como:

$$R(t) = R_\infty(1 - e^{-K_c \cdot t}) = 92,52 * (1 - e^{-0,414 \cdot 1}) = 31,36\%$$