

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcances	2
2	Revisión bibliográfica	3
2.1	Flotación de minerales.....	3
2.2	Principios de flotación.....	3
2.3	Diseño de la celda columnar.....	5
2.4	Operación de una celda columnar.....	6
2.5	VARIABLES RELATIVAS A LA DISPERSIÓN DE GAS	7
2.5.1	Velocidad superficial de gas (J_g).....	7
2.5.2	Diámetro de Sauter de burbujas (d_{32}).....	8
2.5.3	Velocidad superficial de área de burbuja (S_b).....	11
2.6	Velocidad de las burbujas en un flujo de dos fases.....	12
2.7	Distribución de gas.....	14
2.7.1	Régimen de flujo en celdas columnares	14
2.7.2	Comparación de columnas 2-D y 3-D.....	17
2.8	Transferencia de masa.....	18
2.8.1	Difusión molecular: Ley de Fick	18
2.8.2	Medio semi infinito.....	22
2.9	Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	23
3	Materiales y métodos	24
3.1	Estudio de resistencia a la transferencia de masa radial de un flujo de burbujas en celda cuasi 2-D.....	24
3.1.1	Setup celda cuasi 2-D.....	24
3.1.2	Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real.....	27
3.1.3	Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo.....	28
3.2	Estudio de dispersión de gas y transporte axial reactivo en columna piloto 3-D.....	31
3.2.1	Setup columna piloto 3-D.....	31
3.2.2	Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	32
3.2.3	Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	35
3.2.4	Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja.....	37
4	Resultados y Discusión	41
4.1	Celda cuasi 2-D.....	41
4.1.1	Experimento N°1: Caracterización de flujo de aire y movimiento de líquido descendente teórico vs. real.....	41
4.1.2	Experimento N°2: Estudio de resistividad al transporte de reactivo.....	45
4.2	Celda piloto 3-D.....	47
4.2.1	Experimento N°1: Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	47
4.2.2	Experimento N°2: Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	52
4.2.3	Experimento N°3: Evaluación detallada de la distribución de tamaños de burbuja.....	54
4.3	Resultados adicionales	59
4.3.1	Modelo multivariable para tiempo de mezcla.....	59
4.3.2	Muestreo en Bubble Viewer®	60
4.3.3	Cálculo de S_b	61
4.4	Limitaciones, contribución y recomendaciones.....	63

4.4.1	Estudio de resistividad al transporte de reactivo	63
4.4.2	Evaluación de mejoras en la medición de J_g local y efecto del diámetro del tubo muestreador	63
4.4.3	Dispersión axial de reactivo superficialmente activo	64
5	Conclusiones	65
6	Anexos	66
6.1	Detalle setup Celda Cuasi 2-D	66
6.1.1	Inyección de gas	66
6.1.2	Método de probeta invertida	67
6.2	Detalle setup Columna Piloto 3-D	68
6.2.1	Dispersión de gas	68
6.2.2	Experimento N°1: Método de probeta invertida	71
6.2.3	Experimento N°3: Bubble Viewer®	73
6.3	Detalle resultados Columna Piloto 3-D	76
6.3.1	Experimento N°1: Análisis estadístico de datos en método de probeta invertida	76
6.3.2	Experimento N°2: Detalle de resultados	77
6.3.3	Experimento N°3: Corrección de tamaños de burbuja	80
6.4	Curvas de calibración de reactivos en agua potable	84
6.4.1	Sulfato pentahidratado de cobre	85
6.4.2	Espumante Aerofroth 70 Plus	85
6.5	Valores de absorbancia para sulfato pentahidratado de cobre	86
6.6	Valores de absorbancia para espumante Aerofroth 70 Plus	91
6.7	Ficha técnica: Espumante Aerofroth 70 Plus	99
7	Bibliografía	110

Índice de tablas

Tabla 1: Tamaños característicos de gotas, modificado de Sauter (1926).	9
Tabla 2: Medidas celda cuasi 2-D.....	25
Tabla 3: Dimensiones de columna 2-D en montaje experimental sin inyección de aire.	26
Tabla 4: Condiciones de trabajo para registro visual.	27
Tabla 5: Condiciones de trabajo para toma de muestras.	28
Tabla 6: Cálculo volumen de muestra para prueba experimental.	29
Tabla 7: Dosis de reactivo a utilizar en pruebas experimentales.	29
Tabla 8: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°1.	32
Tabla 9: Medidas de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire).	34
Tabla 10: Dosis de espumante a agregar en función de la concentración requerida del sistema.	34
Tabla 11: Número de mediciones y uso de espumante requerido a presión de trabajo 0.4 [bar].	35
Tabla 12: Condiciones de trabajo a 0.4 [bar] para experimento N°2.	36
Tabla 13: Medidas de columna 3-D durante toma de muestras (sin inyección de aire).	36
Tabla 14: Condiciones de trabajo a 0.4 bar para experimento N°3.	37
Tabla 15: Medidas de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).	38
Tabla 16: Número de fotografías en el tiempo por condición de trabajo.	39
Tabla 17: Distribución de tiempos de cada actividad para uso de Bubble Viewer®.	40
Tabla 18: Variables de dispersión de gas de tren dominante.	41
Tabla 19: Cálculo de número teórico de burbujas de diámetro equivalente.	41
Tabla 20: Cálculo de área de gas y de líquido.	42
Tabla 21: Velocidad de líquido descendente y ascendente de burbuja de tren dominante.	44
Tabla 22: Resumen de ajuste modelo semi infinito para espumante y sulfato.	46
Tabla 23: Resumen análisis estadístico de tiempos de medición.	47
Tabla 24: Resumen Análisis estadístico de datos para $J_{g \text{ local}}$	48
Tabla 25: Resultados regresión y cálculo de $J_{g \text{ global}}$	50
Tabla 26: Resultados de ajuste para cálculo de parámetro k.	50
Tabla 27: Resultados en toma de muestras por condición de trabajo.	53
Tabla 28: Fineza y uniformidad para condiciones de trabajo.	58
Tabla 29: Parámetros de distribución Log-Normal para ajuste por EasyFit.	58
Tabla 30: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.	60
Tabla 31: Resultados para análisis de muestras de Bubble Viewer®.	60
Tabla 32: Cálculo de velocidad superficial de área de burbuja.	62
Tabla 33: Resumen de resistividades aparentes en celda cuasi 2-D.	65
Tabla 34: Datos de fabricación de compresor de aire.	68
Tabla 35: Análisis estadístico para tiempos de medición.	76
Tabla 36: Análisis estadístico para $J_{g \text{ local}}$	76
Tabla 37: Análisis estadístico para tiempos de espera de rebalse.	76
Tabla 38: Detalle de rebalse por condición de trabajo.	77
Tabla 39: Detalle de ajuste de modelo de tiempo de mezcla.	79
Tabla 40: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).	86
Tabla 41: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).	87
Tabla 42: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (ambas mediciones).	88
Tabla 43: Análisis estadístico de valores de absorbancia (ambas mediciones).	89
Tabla 44: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (primera medición).	91
Tabla 45: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (segunda medición).	92
Tabla 46: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (tercera medición).	93
Tabla 47: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (cuarta medición).	94
Tabla 48: Valores de absorbancia para concentraciones conocidas (quinta medición).	95
Tabla 49: Valor promedio de absorbancia para concentraciones conocidas (cinco mediciones).	96
Tabla 50: Análisis estadístico de valores de absorbancia (cinco mediciones).	97

Índice de Figuras

Figura 1: Circuito de concentración industrial clásico (Lynch et al., 2010).....	4
Figura 2: Esquema de una columna de flotación, modificado de Finch & Dobby (1990).	6
Figura 3: Relación general entre J_g local y diámetro del tubo muestreador. En principio la velocidad superficial de gas se estabiliza para valores de diámetro superiores a 4 pulgadas respectivamente (Gómez, 2011).	7
Figura 4: Distribución Log-normal para tamaños de burbuja.....	10
Figura 5: Efecto de la concentración de espumante (Frother 250C) en el tamaño de la burbuja para $J_g = 1.3$ cm/s, modificado de Flint et al. (1988).	10
Figura 6: Ejemplos de ascenso de grupos de burbujas, modificado de Nicklin (1962).	12
Figura 7: Regímenes de flujo en una columna de burbujas y un sistema de fluidización gas-líquido, modificado de Chen et al. (1994).	14
Figura 8: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 1.0$ cm/s), Chen et al. (1994).	15
Figura 9: Regiones de flujo observadas en una columna de burbujas para un régimen de flujo vórtice/vórtice-espinal, modificado de Tzeng et al. (1993).	16
Figura 10: Campo de flujo de líquido en un sistema de columna de burbuja gas-líquido ($J_g = 5.3$ cm/s), Chen et al. (1994).	16
Figura 11: Difusión gaseosa. (a) Los dos gases se encuentran separados por una barrera. (b) Tras el retiro de la barrera, unas pocas moléculas de cada gas se encuentran en el otro lado. (c) Tras un cierto tiempo la mezcla de los dos gases es homogénea, y se deja de llevar a cabo la difusión. Modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 12: Difusión a través de un elemento de superficie, modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 13: Difusión a través de un elemento de volumen, modificado de Alonso & Finn (1967).	18
Figura 14: Cambio en la concentración debido a una difusión estacionaria a lo largo de un tubo, modificado de Alonso & Finn.	21
Figura 15: Difusión unidimensional en un medio semi infinito. Modificado de Seader et al. (1998).	22
Figura 16: Esquema celda cuasi 2-D, (a) vista frontal (b) vista perfil.	24
Figura 17: Celda cuasi 2-D (vista frontal).	24
Figura 18: Celda cuasi 2-D (vista perfil).	24
Figura 19: Esquema de celda cuasi 2-D en configuración experimental, vista frontal con corte transversal en la base (volumen de control indicado con color rojo).	25
Figura 20: Celda cuasi 2-D en configuración experimental.	25
Figura 21: Esquema general de volumen de control (Puntos N°1 y N°2 indican posición de toma de muestras).	25
Figura 22: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y barrera móvil instalada).	26
Figura 23: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (sin inyección de aire y sin barrera móvil).	26
Figura 24: Puntos de muestreo N°1 y N°2 en volumen de control (con inyección de aire y barrera móvil instalada).	26
Figura 25: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en $t \geq 2:00$ [min].	27
Figura 26: Fotografía del sistema sin flujo de aire en equilibrio para colorante.	27
Figura 27: Conjunto tubo-jeringa.	29
Figura 28: Conjunto tubo-jeringa inserto en celda columnar 2-D.	29
Figura 29: Sistema de referencia para modelo de medio semi-infinito en volumen de control.	30
Figura 30: Columna 3-D (parte inferior). Posee llave de descarga en su base.	31
Figura 31: Columna 3-D (parte superior). Posee contenedor de espuma unido a mangueras de descarga de rebalse.	31
Figura 32: Esquema general método de probeta invertida en celda columnar 3-D.	32

Figura 33: Esquema de columna 3-D con método de probeta invertida (sin inyección de aire). (a) condición inicial (b) condición experimental.	33
Figura 34: Puntos de toma de muestras a lo largo de la columna (a) Llave de evacuación basal (b) Llave de evacuación en cota media (c) Parte superior.	35
Figura 35: Configuración experimental de columna 3-D para toma de muestras (sin inyección de aire).	36
Figura 36: Configuración experimental de columna 3-D para uso de Bubble Viewer® (sin inyección de aire).	38
Figura 37: Esquema de metodología para uso de Bubble Viewer® en tercera prueba experimental.	40
Figura 38: Fotografía de tren de burbujas dominante: (a) Zona analizada indicada por color celeste (b) Burbujas analizadas para cálculo de tamaño promedio d_{32}	41
Figura 39: Área de líquido (línea color azul) y área de gas (línea color rojo) en tren de burbujas: (a) Caso real (b) Caso ideal.	42
Figura 40: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 0 [s].	43
Figura 41: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 5 [s].	43
Figura 42: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t: 20 [s].	43
Figura 43: Fotografía del sistema sin flujo de aire para sulfato en t \geq 2:00 [min].	43
Figura 44: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 5 [s].	44
Figura 45: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 20 [s].	44
Figura 46: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 1:00 [min].	44
Figura 47: Fotografía del sistema con flujo de aire para colorante en t: 2:00 [min].	44
Figura 48: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición sin flujo de aire.	45
Figura 49: Datos experimentales de concentración – tiempo para espumante en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	45
Figura 50: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición sin flujo de aire.	45
Figura 51: Datos experimentales de concentración – tiempo para sulfato en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	45
Figura 52: Ajuste de concentración de espumante en cada posición sin flujo de aire.	46
Figura 53: Ajuste de concentración de espumante en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	46
Figura 54: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición sin flujo de aire.	46
Figura 55: Ajuste de concentración de sulfato en cada posición con flujo de aire (J_g : 0.46 cm/s).	46
Figura 56: Datos experimentales de J_g local vs. diámetro del tubo muestreador : (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.	48
Figura 57: Resultados de regresión por condición de trabajo.	49
Figura 58: Correlación entre datos experimentales y teóricos de parámetro k.	50
Figura 59: Datos experimentales de concentración de espumante vs. tiempo por cota: (a) Inyector Fino – 0.1 gpl (b) Inyector Fino – 0.3 gpl (c) Inyector Grueso – 0.1 gpl (d) Inyector Grueso – 0.3 gpl.	52
Figura 60: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl.	55
Figura 61: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos).	55
Figura 62: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.1 gpl (el tamaño promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).	55
Figura 63: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 90 hasta los 120 segundos).	55

Figura 64: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl.....	56
Figura 65: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (total de datos).....	56
Figura 66: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector fino a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 160 hasta los 180 segundos).....	56
Figura 67: Curvas de tamaño de burbuja vs. tiempo para uso de inyector grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (el promedio incluye las burbujas registradas desde los 70 hasta los 120 segundos).....	56
Figura 68: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.1 gpl).....	57
Figura 69: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.1 gpl).....	57
Figura 70: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Fino - 0.3 gpl).....	57
Figura 71: Histograma de distribución de tamaño de burbuja junto a la curva de ajuste Log-Normal por EasyFit (Inyector Grueso - 0.3 gpl).....	57
Figura 72: Sistema de referencia para modelo de tiempo de mezcla.....	59
Figura 73: Resultados de ajuste para modelo de tiempo de mezcla.....	59
Figura 74: Sistema de mangueras y sus componentes.....	66
Figura 75: Lanza de columna 2-D con sus componentes.....	66
Figura 76: Esquema general método de probeta invertida.....	67
Figura 77: Método de probeta invertida.....	67
Figura 78: Compresor de aire.....	68
Figura 79: Manómetro-válvula de presión de trabajo.....	68
Figura 80: Compresor de aire, sistema de mangueras y conjunto manómetro-válvula.....	69
Figura 81: Válvula de flujo.....	69
Figura 82: Inyector y lanza.....	70
Figura 83: Inyector inserto en lanza.....	70
Figura 84: Tubo de acrílico inserto dentro de la columna junto con tapón superior e inferior con sistema de cuerdas.....	71
Figura 85: Tubos de acrílico y soporte utilizado para sostenerlos en la parte superior de la columna.....	71
Figura 86: Longitud del tubo en superficie de la columna.....	72
Figura 87: Bubble Viewer® (vista perfil).....	73
Figura 88: Bubble Viewer® (vista frontal).....	73
Figura 89: Columna piloto 3-D, con equipo Bubble Viewer® en parte superior.....	74
Figura 90: Equipo Bubble Viewer® con cámara fotográfica montado en la parte superior de la columna.....	74
Figura 91: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® con válvula.....	74
Figura 92: Tubo de muestreo de Bubble Viewer® conectado con columna.....	75
Figura 93: Extremo inferior de tubo de muestreo de Bubble Viewer® sellado con tapón.....	75
Figura 94: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota superior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	77
Figura 95: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota media: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	78
Figura 96: Curva ajustada de concentración de espumante vs. tiempo en cota inferior: (a) Inyector Fino - 0.1 gpl (b) Inyector Fino - 0.3 gpl (c) Inyector Grueso - 0.1 gpl (d) Inyector Grueso - 0.3 gpl.....	78

Figura 97: Identificación de burbujas mediante software ImageJ®: (a) Fotografía inicial (b) Fotografía analizada.	80
Figura 98: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (incluye datos sesgados).	80
Figura 99: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.	81
Figura 100: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.3 gpl (incluye datos sesgados).	81
Figura 101: Distribución de tamaños de burbuja para uso de inyector fino y grueso a concentración requerida de 0.1 gpl (total de datos). Incluye datos sesgados.	82
Figura 102: Espesor característico y cálculo de diámetro mínimo de burbuja.	82
Figura 103: Distribución de espesores de burbujas (fotografías analizadas en condición inyector Grueso - 0.1 gpl).	83
Figura 104: Espectrofotómetro.	84
Figura 105: Curva de calibración de sulfato pentahidratado de cobre para una longitud de onda de 810 [nm].	85
Figura 106: Curva de calibración para una longitud de onda de 232 [nm].	85
Figura 107: Curva de absorbancia – longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.	90
Figura 108: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.	90
Figura 109: Curva de absorbancia - longitud de onda en el rango de 190 – 900 nm.	98
Figura 110: Coeficiente de correlación y promedio del coeficiente de variación en el rango de 190 hasta 900 nm.	98
Figura 111: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 1).	99
Figura 112: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 2).	100
Figura 113: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 3).	101
Figura 114: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 4).	102
Figura 115: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 5).	103
Figura 116: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 6).	104
Figura 117: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 7).	105
Figura 118: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 8).	106
Figura 119: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 9).	107
Figura 120: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 10).	108
Figura 121: Ficha técnica espumante Aerofroth 70 Plus (página 11).	109