

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo general	6
1.2	Objetivos específicos	6
1.3	Alcances	7
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	Fundamentos teóricos del proceso de flotación.....	8
2.1.1	Descripción del proceso	8
2.1.2	Equipos utilizados.....	9
2.2	Reactivos de flotación	11
2.2.1	Colectores	12
2.2.2	Espumantes.....	12
2.2.3	Modificadores	13
2.2.4	Efectos negativos de los reactivos de flotación	13
2.2.5	Reactivos de flotación alternativos	14
2.3	Agua de mar en flotación de minerales de cobre.....	20
2.3.1	Propiedades y características del agua de mar	20
2.3.2	Limitantes en la flotación de sulfuros de cobre y molibdeno.....	23
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
3.1	Equipos utilizados	28
3.1.1	Trituradora de mandíbula Chipmunk VD	28
3.1.2	Molino de bolas Labtech Hebro	28
3.1.3	Tamizadora Ro-tap RX-29.....	29
3.1.4	Celda de flotación Edemet.....	30
3.1.5	Filtro de presión Edemet.....	31

3.1.6	Horno de secado Bellhor	32
3.1.7	Analizador portátil de fluorescencia de rayos X	32
3.1.8	Balanza Boeco.....	33
3.2	Muestra mineral	34
3.3	Reactivos químicos	35
3.3.1	Colectores	35
3.3.2	Espumantes.....	35
3.3.3	Modificadores	35
3.3.4	Medio acuoso	35
3.4	Procedimiento experimental.....	36
3.4.1	Reducción de tamaño de la muestra mineral	36
3.4.2	Análisis granulométrico.....	37
3.4.3	Pruebas de flotación	37
3.4.4	Pruebas cinéticas de flotación colectiva	38
3.4.5	Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de los colectores PAX y AVR en agua de mar	40
3.4.6	Pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de espumante MIBC en agua de mar	42
3.5	Cálculos y métodos de análisis empleados	44
3.5.1	Índices metalúrgicos	44
3.5.2	Ajuste de Klimpel	46
3.5.3	Velocidad superficial del gas	47
3.5.4	Suposiciones aplicadas	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Caracterización de la muestra mineral.....	49
4.2	Pruebas cinéticas de flotación colectiva.....	50

4.2.1	Efecto del flujo de aire en la cinética de flotación	51
4.2.2	Cinéticas de flotación colectiva en agua de mar.....	56
4.3	Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de colectores PAX y AVR	61
4.3.1	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector PAX	61
4.3.2	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de colector AVR	64
4.3.3	Resultados de las pruebas de flotación colectiva utilizando mezclas de colectores AVR/PAX en diferentes proporciones	68
4.4	Resultados de flotación en agua de mar en función de la concentración de espumante MIBC	71
4.4.1	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de PAX.....	72
4.4.2	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 40 g/t de AVR	75
4.4.3	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de 80 g/t de AVR	78
4.4.4	Resultados de las pruebas de flotación colectiva en función de la concentración de MIBC en presencia de la mezcla AVR/PAX 60/40	81
5	CONCLUSIONES	85
6	RECOMENDACIONES	89
7	BIBLIOGRAFÍA	90
8	APÉNDICE A: PLANILLAS DE DATOS DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO	94

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Uso del agua de mar en la minería del cobre 2010-2018 (m³/s) (Cochilco, 2019).</i>	1
<i>Figura 1.2: Distribución porcentual del consumo de agua de mar en la minería del cobre según su forma de uso, periodo 2010-2018 (Cochilco, 2019).</i>	2
<i>Figura 1.3: Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origen, periodo 2019-2030 (Cochilco, 2020).</i>	3
<i>Figura 2.1: Etapas del proceso de flotación (Yianatos, 2005).</i>	9
<i>Figura 2.2: Celda de flotación mecánica (Vallebuona et al., 2007).</i>	10
<i>Figura 2.3: Celda de flotación neumática (Vallebuona et al., 2007).</i>	11
<i>Figura 2.4: Resultados obtenidos a partir de las pruebas de flotación con distintas dosis de aceite de canola (Owusu, 2016).</i>	18
<i>Figura 2.5: Recuperaciones de calcopirita y pirita para cada colector utilizado en función del tiempo de flotación (Owusu, 2016).</i>	19
<i>Figura 2.6: Recuperación de cobre a partir de calcosina en función del pH (Castro, 2012).</i>	22
<i>Figura 2.7: Comparación ley de concentrado con agua de mar y agua dulce en función del pH (Quinteros, 2012).</i>	22
<i>Figura 2.8: Diagrama de formación de especies de calcio (Liu et al., 2015).</i>	25
<i>Figura 2.9: Diagrama de formación de especies de magnesio (Liu et al., 2015).</i> ...	25
<i>Figura 2.10: Consumo de cal en función del pH para agua dulce y agua de mar (Castro, 2012).</i>	27
<i>Figura 3.1: Trituradora de mandíbula Chipmunk VD.</i>	28

<i>Figura 3.2: Molino de bolas Labtech Hebro.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.3: Tamizadora Ro-tap RX-29.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.4: Celda de flotación Edemet.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.5: Filtro de presión Edemet.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.6: Horno de secado Bellhor.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.7: Analizador portátil de fluorescencia de rayos X.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.8: Balanza Boeco.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.9: Distribución inicial de tamaños de la muestra utilizada.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.1: Curva granulométrica del mineral producto de la molienda.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.2: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.3: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.4: Cinéticas de flotación obtenidas en agua convencional a diferentes flujos de aire en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.6: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar a diferentes flujos de aire en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	<i>58</i>

<i>Figura 4.7: Cinéticas de flotación obtenidas en agua de mar para 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.</i>	60
<i>Figura 4.8: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	62
<i>Figura 4.9: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	63
<i>Figura 4.10: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	65
<i>Figura 4.11: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	66
<i>Figura 4.12: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	69
<i>Figura 4.13: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	70
<i>Figura 4.14: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	73
<i>Figura 4.15: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	74

<i>Figura 4.16: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.17: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.18: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.19: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.20: Recuperación y ley de cobre y hierro obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.21: Recuperación y ley de calcopirita y pirita obtenidas en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>83</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: Composición típica del agua convencional de proceso (Aaltonen et al., 2011, citado en Uribe, 2017, p.43) y del agua de mar (Floor, 2006, citado en Uribe, 2017, p.43).</i>	20
<i>Tabla 3.1: Condiciones de operación de la celda de flotación Edemet.</i>	30
<i>Tabla 3.2: Set de pruebas cinéticas de flotación con PAX para análisis de flujo de aire.</i>	38
<i>Tabla 3.3: Primer set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.</i>	38
<i>Tabla 3.4: Segundo set de pruebas cinéticas de flotación con AVR para análisis de flujo de aire.</i>	39
<i>Tabla 3.5: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con PAX.</i>	40
<i>Tabla 3.6: Set de pruebas cinéticas de flotación en agua de mar con AVR.</i>	40
<i>Tabla 3.7: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector PAX....</i>	41
<i>Tabla 3.8: Set de pruebas de flotación en función de la dosis de colector AVR. ..</i>	41
<i>Tabla 3.9: Set de pruebas de flotación en función de diferentes dosis de mezclas de reactivos colectores.</i>	42
<i>Tabla 3.10: Definición de cada uno de los casos a estudiar en las pruebas en función de la concentración de espumante MIBC.</i>	43
<i>Tabla 3.11: Set de pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC para el caso PAX 40 g/t.</i>	43
<i>Tabla 4.1: Resultados del análisis FRX de la muestra mineral.</i>	50
<i>Tabla 4.2: Resultados del análisis DRX de la muestra mineral.</i>	50

<i>Tabla 4.3: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.4: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4.5: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 16 de flotación con agua convencional en presencia de 20 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4.6: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 60 g/t de colector PAX y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4.7: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar en presencia de 100 g/t de colector AVR y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4.8: Efecto del flujo de aire en las leyes de cobre obtenidas al minuto 8 y 16 de flotación con agua de mar para 60 g/t de colector PAX y 100 g/t de colector AVR a un flujo de 5 L/min de aire y 15 g/t de espumante MIBC.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 4.9: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.10: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.11: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de mezclas de colectores AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	<i>70</i>

<i>Tabla 4.12: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.13: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.14: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4.15: Índices metalúrgicos obtenidos en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla A. 1: Análisis granulométrico final obtenido luego de molienda de 50 minutos en agua de mar.</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 2: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 60 g/t de PAX a 5 L/min en agua de mar.</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 3: Datos obtenidos de la cinética de flotación con 100 g/t de AVR a 5 L/min en agua de mar.</i>	<i>94</i>
<i>Tabla A. 4: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla A. 5: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla A. 6: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.....</i>	<i>95</i>

<i>Tabla A. 7: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	96
<i>Tabla A. 8: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	96
<i>Tabla A. 9: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de colector AVR, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	96
<i>Tabla A. 10: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	97
<i>Tabla A. 11: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	97
<i>Tabla A. 12: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de mezclas AVR/PAX, empleando 15 g/t de espumante MIBC y agua de mar.</i>	97
<i>Tabla A. 13: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	98
<i>Tabla A. 14: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	98
<i>Tabla A. 15: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector PAX y agua de mar.</i>	98

<i>Tabla A. 16: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla A. 17: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla A. 18: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 40 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla A. 19: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla A. 20: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla A. 21: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando 80 g/t de colector AVR y agua de mar.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla A. 22: Datos obtenidos para el cobre en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla A. 23: Datos obtenidos para el hierro en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla A. 24: Datos calculados para la estimación de calcopirita y pirita en las pruebas de flotación en función de la concentración de espumante MIBC, empleando mezcla AVR/PAX 60/40 y agua de mar.</i>	<i>101</i>