

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances.....	2
2. Antecedentes.....	3
2.1. Contexto de la problemática.....	3
2.1.1. Residuos mineros	3
2.1.2. Drenaje minero	5
2.1.3. Reacciones de generación de acidez	6
2.1.4. Reacción de neutralización.....	8
2.2. Origen de los relaves analizados	8
2.2.1. División El Teniente, Chile	8
2.2.2. Complejo minero Almagrera, España	9
2.2.3. Cueva de la Mora, España	10
2.2.4. Palabora, Sudáfrica	11
2.2.5. Foskor, Sudáfrica.....	12
2.2.6. Cobre Las Cruces, España.....	13
2.3. Necesidad de caracterización	15
2.3.1. Normativa legal.....	15
2.3.2. Programa de Estabilidad Química y Física	18
2.4. Métodos de caracterización geoquímica	18
2.4.1. Análisis químicos	19
2.4.2. Análisis mineralógicos	20
2.4.3. Test estáticos.....	20
2.4.4. Test cinéticos.....	26
2.5. Minas reconocidas por su gestión en la estabilidad química.....	28
2.5.1. Compañía minera Antamina, Perú.....	28
2.5.2. Rajo Lichtenberg, Alemania.....	29
2.5.3. Mina Alumbraera, Argentina	30
2.5.4. Mina Huckleberry, British Columbia, Canadá	31

3.	Material y métodos	33
3.1.	Equipos y reactivos	33
3.2.	Protocolos de los métodos	35
3.2.1.	Muestreo.....	35
3.2.2.	Tamizaje	36
3.2.3.	Test ABA	36
3.2.4.	Test NAG simple.....	38
3.2.5.	Test NAG secuencial	40
3.2.6.	Test NAG cinético.....	41
3.2.7.	Test NAP	41
3.2.8.	Test ABCC.....	41
3.3.	Fases de la metodología experimental.....	43
3.3.1.	Etapa de pruebas iniciales.....	43
3.3.2.	Etapa de pruebas finales	45
4.	Resultados.....	49
4.1.	XRF e ICP-MS	49
4.2.	Difracción de rayos X	50
4.3.	Resultados ABA	51
4.4.	Etapa de pruebas iniciales	53
4.4.1.	NAG Cauquenes.....	53
4.4.2.	ABBC Cauquenes.....	56
4.5.	Etapa de pruebas finales.....	58
4.5.1.	NAG.....	58
4.5.2.	ABCC.....	60
4.6.	Costos y tiempos.....	63
5.	Análisis de los resultados	64
5.1.	XRF e ICP-MS	64
5.2.	Difracción de rayos X	64
5.3.	ABA	66
5.4.	Etapa de pruebas iniciales	67
5.4.1.	NAG Cauquenes.....	67

5.4.2. ABCC Cauquenes	68
5.5. Etapa de pruebas finales.....	68
5.5.1. NAG.....	68
5.5.2. ABCC.....	73
5.6. Comparación de costos y tiempos	76
5.7. Resumen de los resultados y metodología	78
6. Conclusión.....	80
7. Bibliografía.....	82
8. Anexo.....	86
8.1. Resultados	86
8.1.1. Etapa de pruebas iniciales.....	86
8.1.2. Etapa de pruebas finales	88
8.2. Cotización test y reactivos.....	102
8.3. Calculo de costos.....	103
8.4. Titulación del agua desionizada	106

Índice Gráficos

Gráfico 2.1: Predicción para el cobre 2017-2028 [1].	4
Gráfico 2.2: Distribución de los relaves a lo largo del país [3]......	4
Gráfico 2.3: Estado de los relaves [3]......	5
Gráfico 2.4: Reacciones involucradas en las etapas, al considerar pH y tiempo [5].	7
Gráfico 4.1: Resultados ABA.....	52
Gráfico 4.2: NAG y NAP de las pruebas iniciales.....	54
Gráfico 4.3: NAG cinético de la muestra de Cauquenes.....	55
Gráfico 4.4: ABCC de Cauquenes.....	57
Gráfico 4.5: NAG y NAP de las pruebas finales.	59
Gráfico 4.6: Gráfico ABCC de ACL-49.	61
Gráfico 4.7: Gráfico ABCC de AEL-33.	61
Gráfico 4.8: Gráfico ABCC de Palabora.	62
Gráfico 4.9: Gráfico ABCC de Foskor	62
Gráfico 5.1: Resultados ABA con el ABCC	67
Gráfico 5.2: Correlación del pH NAG versus ABA (ICP-MS).....	69
Gráfico 5.3: Correlación del pH NAG versus ABA (XRF).	70
Gráfico 5.4: Correlación del NAP versus PNN (ICP-MS).....	71
Gráfico 5.5: Correlación del NAP versus PNN (XRF)......	71

Gráfico 5.6: Titulación de minerales a un ANC=13 kg H ₂ SO ₄ /t.	73
Gráfico 5.7: Titulación de minerales a un ANC=50 kg H ₂ SO ₄ /t.	74
Gráfico 5.8: Titulación de minerales a un ANC=200 kg H ₂ SO ₄ /t.	75
Gráfico 8.1: Variación de la temperatura de la muestra ACL-49.	88
Gráfico 8.2: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33	90
Gráfico 8.3: Variación de la temperatura de la muestra CM.	91
Gráfico 8.4: Variación de la temperatura de la muestra de Palabora.	92
Gráfico 8.5: Variación de la temperatura de la muestra Fosfork.	93
Gráfico 8.6: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25.	94
Gráfico 8.7: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1.	95
Gráfico 8.8: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33 (~1 gr).	96
Gráfico 8.9: Variación de la temperatura de la muestra CM (~1 gr).	97
Gráfico 8.10: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25 (~1 gr).	98
Gráfico 8.11: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1 (~1 gr).	99
Gráfico 8.12: Titulación del agua.	107

Índice Tablas

Tabla 2.1: Fuentes generadoras de drenaje minero [5].	6
Tabla 2.2: Características de las muestras de estudio.	14
Tabla 2.3: Potencial generador y su rango [24].	22
Tabla 2.4: Clasificación resultados NAG	23
Tabla 2.5: Rango promedio de amortiguamiento.	24
Tabla 2.6: Interpretación de los resultados del test columna.	27
Tabla 3.1: Reactivo de acuerdo al pH NAG.	39
Tabla 3.2: Recomendaciones para la titulación del ABCC.	42
Tabla 3.3: Peso bajo y sobre tamaño de la muestra de Cauquenes.	44
Tabla 3.4: Variaciones de la prueba convencional del NAG.	44
Tabla 3.5: NAG secuenciales realizado.	44
Tabla 3.6: Variación de la prueba ABCC convencional.	45
Tabla 3.7: Peso bajo y sobre tamaño de las muestras.	45
Tabla 4.1: Datos de algunos elementos obtenidos por ICP-MS en % en peso.	49
Tabla 4.2: Datos de algunos elementos obtenidos por XRF en % en peso.	49
Tabla 4.3: Resultados 1 de DRX de las muestras.	50
Tabla 4.4: Resultados 2 de DRX de las muestras.	51
Tabla 4.5 Resultados PN.	51
Tabla 4.6 Resultados finales del ABA en Kg CaCO ₃ /t.	52
Tabla 4.7: Resultados NAG de las muestras de estudio.	53
Tabla 4.8: Resultados del NAG cinético de Cauquenes.	54
Tabla 4.9: Resultados del NAG secuencial de Cauquenes.	55

Tabla 4.10: Resultados ABCC de Cauquenes.	56
Tabla 4.11: Resultados de las Muestras sometidas al NAG.....	58
Tabla 4.12: Resultados NAG de las pruebas con menos muestra.....	58
Tabla 4.13: Resultados de las Muestras sometidas al ABCC.	60
Tabla 4.14: Costo asociado a la realización de las pruebas.....	63
Tabla 4.15: Tiempo asociado a la realización de las pruebas.....	63
Tabla 5.1: % de carbonato de Palabora y AEL-33.	65
Tabla 5.2: PN y ANC en base al porcentaje de carbonato.	65
Tabla 5.3: Resultados PN del ABCC y ABA.....	66
Tabla 5.4: Correlación NAP/ IPNNI al ocupar XRF y ICP.....	72
Tabla 5.5: Comparación cálculos del PN.	76
Tabla 5.6: Costo por año de la realización del test NAG.....	76
Tabla 5.7: Costo por año de la realización del test ABCC.....	77
Tabla 5.8: VAC del NAG y ABCC.....	77
Tabla 8.1: Costos laboratorio AGQ.	102
Tabla 8.2: Costos laboratorio ALS.....	102
Tabla 8.3: Costos laboratorio SGS.....	103
Tabla 8.4: Costos laboratorio CESMEC.	103
Tabla 8.5: Costos reactivos Merck.	103
Tabla 8.6: Costo de los reactivos por ml del H ₂ O ₂ y por gr del NaOH.....	104
Tabla 8.7: Costos asociados al peróxido de hidrógeno.....	104
Tabla 8.8: Costos asociados al hidróxido de sodio.	105
Tabla 8.9: Costo total asociado al NAG.	105
Tabla 8.10 Costo reactivo por ml del HCL.....	106
Tabla 8.11: Costo de cada ABCC de las pruebas realizadas.....	106

Índice Figuras

Figura 2.1: División El Teniente [6].....	8
Figura 2.2: Tranque de relave Cauquenes [7].	9
Figura 2.3: Pueblo de Calañas, provincia de Huelva [8].....	9
Figura 2.4: Planta de concentración de MATSA en la actualidad [9].....	10
Figura 2.5: Pueblo Cueva de la Mora (2012) [10].....	10
Figura 2.6: Imágenes de la mina Cueva de la Mora [10].....	11
Figura 2.7: Mina Palabora [11].	11
Figura 2.8: Tranque de relave Palabora [11].	12
Figura 2.9: Mina Foskor [12].....	12
Figura 2.10: Tranque de relave Selati [13].	13
Figura 2.11: Localización Complejo Cobre Las Cruces [14].....	13
Figura 2.12: Planta hidrometalurgia y mina Corta Minera [14].	14

Figura 2.13: Compañía minera Antamina [24].	29
Figura 2.14: Rajo Lichtenberg de Wismut [22].	30
Figura 2.15: Minera Alumbreira [27].	30
Figura 2.16: Mina Huckleberry [28].	31
Figura 3.1: HANNA HI 5521	33
Figura 3.2 Pesa analítica.	33
Figura 3.3: Plancha y agitador magnético.	34
Figura 3.4: Peróxido de hidrógeno al 30%.	34
Figura 3.5: Hidróxido de sodio (pellet).	34
Figura 3.6: Ácido clorhídrico al 37%.	35
Figura 3.7: Roleo y cuarteo.	35
Figura 3.8: Tamiz malla 64 μm	36
Figura 3.9: Protocolo del ABA modificado [37].	37
Figura 3.10: Protocolo del NAG.	40
Figura 3.11: Protocolo del ABCC.	43
Figura 3.12: Antes y después de tamizarse y muestrearse la muestra de Cauquenes.	44
Figura 3.13: Antes y después de muestrear las muestras.	47
Figura 8.1: Muestra de Cauquenes después de ser sometido al test.	87
Figura 8.2: ABCC de Cauquenes	88
Figura 8.3: Antes y después de la muestra ACL-49 de ser sometida al NAG.	89
Figura 8.4: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG.	90
Figura 8.5: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG.	91
Figura 8.6: Antes y después de la muestra Palobora de ser sometida al NAG.	92
Figura 8.7: Antes y después de la muestra Fosfork de ser sometida al NAG.	93
Figura 8.8: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG.	94
Figura 8.9: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG.	95
Figura 8.10: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG (~1 gr).	96
Figura 8.11: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG (~1 gr).	97
Figura 8.12: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG (~1 gr).	98
Figura 8.13: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG (~1 gr).	99
Figura 8.14: Test ABCC de la muestra ACL-49.	100
Figura 8.15: Test ABCC de la muestra AEL-33.	100
Figura 8.16: Test ABCC de la muestra CM.	100
Figura 8.17: Test ABCC de la muestra Palabora.	101
Figura 8.18: Test ABCC de la muestra Foskor.	101
Figura 8.19: Test ABCC de la muestra Cola 25.	101
Figura 8.20: Test ABCC de la muestra Relave 1.	102