

## Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1</b> .....	1
1.1. Introducción y motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo general .....	4
1.2.2. Objetivos específicos .....	4
1.3. Alcances .....	5
1.4. Contenidos del trabajo de memoria.....	5
<b>Capítulo 2</b> .....	6
2. Revisión bibliográfica .....	6
2.1. Elipsoides de Extracción y Movimiento .....	6
2.2. Teoría de Entrada de Dilución de Laubscher .....	7
2.3. Modelo de Susaeta (2004) .....	10
2.4. Mecanismos de entrada de dilución (Paredes, 2012) .....	15
2.5. Definiciones índices de comparación y test de diagnósticos.....	17
2.5.1. Matriz de contingencia.....	17
2.5.2. Error cuadrático medio .....	18
2.5.3. Error relativo medio.....	18
2.6. Definición dilución en Mina El Salvador.....	19
2.7. Simulaciones Mina El Salvador.....	21
2.7.1. Simulación Rebop .....	21
2.7.2. Simulación FlowSim 2.0.....	22
2.7.3. Conclusiones Simulaciones.....	23
2.8. Regresión Logística .....	24
2.8.1. Ajuste de la ecuación .....	24
2.8.2. Odds Ratio .....	24
2.8.3. Principio de parsimonia.....	25
2.8.4. Trabajos anteriores y actuales.....	25
2.8.5. Testeo de modelos.....	25
2.9. Conclusiones revision bibliográfica .....	26
<b>Capítulo 3</b> .....	29

3.	Metodología.....	29
3.1.	Pasos metodológicos .....	30
3.1.1.	Estudio exploratorio de datos: .....	30
3.1.2.	Construcción base de datos casos raros .....	31
3.1.3.	Análisis univariable .....	31
3.1.4.	Análisis multivariable .....	31
3.1.5.	Calibración y validación.....	32
3.1.6.	Recomendaciones operacionales .....	32
3.2.	Conclusiones metodología .....	32
<b>Capítulo 4</b>	.....	<b>33</b>
4.1.	Estudio exploratorio de datos y construcción de variables independientes.....	33
4.1.1.	Alturas in-situ .....	33
4.1.2.	Velocidad de extracción.....	39
4.1.3.	Uniformidad del tiraje (índice de Susaeta modificado) .....	48
4.1.4.	Porcentaje extracción columna in-situ .....	59
4.1.5.	Estado de vecinos (vecinos con dilución).....	62
4.2.	Análisis y conclusiones estudio exploratorio de datos.....	70
<b>Capítulo 5</b>	.....	<b>73</b>
5.1.	Análisis univariables .....	73
5.1.1.	Test univariable ICE .....	74
5.1.2.	Test Univariable ICW .....	75
5.1.3.	Test Univariable IN .....	75
5.1.4.	Test Univariable IW .....	76
5.2.	Modelos Multivariables.....	77
5.2.1.	Modelos ICE.....	78
5.2.2.	Modelos ICW .....	78
5.2.3.	Modelos IN .....	79
5.2.4.	Modelos IW .....	80
5.3.	Calibración Modelos.....	81
5.3.1.	Calibración Modelos ICE .....	81
5.3.2.	Calibración modelos ICW .....	83
5.3.3.	Calibración modelos IN .....	86

5.3.4. Calibración Modelos IW .....	89
5.4. Análisis modelos Multivariantes.....	92
5.5. Validación modelo Andina (Cifuentes, 2017).....	97
5.5.1. Validación Modelo Andina en ICE .....	97
5.5.2. Validación Modelo Andina en ICW.....	99
5.5.3. Validación Modelo Andina en IN.....	101
5.5.4. Validación Modelo Andina en IW.....	103
5.5. Capacidad de FlowSim de predecir la entrada temprana de la dilución .....	105
5.5.1. FlowSim en ICE .....	105
5.5.2. FlowSim en ICW.....	107
5.5.3. FlowSim en IN.....	108
5.6. Comparación entre Modelos de regresión logística con herramienta de simulación FlowSim .....	110
5.6. 1. Conclusiones comparación FlowSim con modelos de regresión logística .....	111
<b>Capítulo 6</b> .....	112
6.1. Conclusiones generales .....	112
6.2. Recomendaciones y trabajos futuros .....	113
<b>Bibliografía</b> .....	114
<b>Anexos</b> .....	117
Anexo A .....	117
Secuencias de extracción sectores Mina El Salvador .....	117
Uniformidad en planta .....	119
Distribución uniformidad por puntos.....	120
Anexo B .....	122
Curvas ROC .....	122
Errores PED por puntos de extracción FlowSim 2.0.....	126

## Índice de Figuras

Figura 1: Tendencias en exploración y ley de cabeza (Moss, 2011).....	1
Figura 2: Operaciones de minería masiva de hundimiento actuales y futuras (Labbé, 2014) .....	2

Figura 3: Falla oeste PMCHS .....	3
Figura 4: Flujo de caja anual vs Aumento dilución .....	3
Figura 5: Relaciones geométricas de los elipsoides de extracción y de movimiento (Kvapil, 1992) .	7
Figura 6: Razón de volumen de mineral y área de contacto mineral-diluyente.....	7
Figura 7: Altura de Interacción (HIZ) (Laubscher, 1994).....	9
Figura 8: Factor de control de tiraje (DCF) (Laubscher, 1994).....	9
Figura 9: Modelo esquemático de curvas de mezclas utilizadas en el modelo de Laubscher (1994)	10
Figura 10: Condiciones de flujo (Susaeta, 2004).....	11
Figura 11: Comportamiento de dilución según modelo de Susaeta (Susaeta, 2004) .....	12
Figura 12: Matriz de Uniformidad (Susaeta, 2004) .....	13
Figura 13: Relación I.U. y PED para El Teniente y El Salvador (Susaeta, 2004).....	13
Figura 14: Gráfico I.U. (%tonelaje) y PED para el Sector Parrillas de Andina (Susaeta, 2004).....	14
Figura 15: Resumen índices de uniformidad (Paredes, 2012).....	14
Figura 16: Perfiles de secuencia de mecanismos de entrada vertical (Paredes, 2012).....	15
Figura 17: Perfiles de secuencia de entrada de dilución lateral (Paredes & Castro, 2014) .....	16
Figura 18: Secuencia de eventos de colapsos y air blast en el comienzo de la secuencia IW (De Nicola & Fishwick, 2000) .....	16
Figura 19: Vista en planta sectores Mina El Salvador (Paredes, 2012) .....	19
Figura 20: Comportamiento %Dilución vs %Extracción, ICE01116E.....	20
Figura 21: Comportamiento %Dilución acumulada vs %Extracción, ICE0116E .....	20
Figura 22: Comparación PED medio [%] entre FlowSim, Rebop y datos mina (Valencia, 2014)...	23
Figura 23: Comparación de Desviación estándar del PED con error cuadrático medio entre FlowSim, Rebop y datos mina (Valencia, 2014).....	23
Figura 24: Ejemplo curva ROC .....	26
Figura 25: Diagrama Metodología.....	30
Figura 26: Alturas de columnas in-situ ICE.....	33
Figura 27: Histograma y estadísticas básicas, alturas de columnas in-situ ICE .....	33
Figura 28: Alturas de columnas in-situ ICW.....	34
Figura 29: Histograma y estadísticas básicas, alturas de columnas in-situ ICW .....	34
Figura 30: Alturas de columnas in-situ IN.....	35
Figura 31: Histograma y estadísticos básicos, alturas de columnas IN.....	35
Figura 32: Alturas de columnas in-situ, IW .....	36
Figura 33: Histograma y estadísticos básicos, alturas de columnas IW .....	36
Figura 34: Alturas de columna in-situ respecto al PED, ICE.....	37
Figura 35: Alturas de columna in-situ respecto al PED, ICW.....	37
Figura 36: Alturas de columna in-situ promedio respecto al PED, IN.....	38
Figura 37: Alturas de columna in-situ promedio respecto al PED, IW.....	38
Figura 38: Velocidad de extracción mensual, ICE .....	39
Figura 39: Velocidad de extracción mensual, ICW .....	39
Figura 40: Velocidad de extracción mensual, IN.....	40
Figura 41: Velocidad de extracción mensual, IW.....	40
Figura 42: Definición cluster .....	41

Figura 43: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), ICE .....	42
Figura 44: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), ICE.....	42
Figura 45: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), ICE .....	43
Figura 46: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), ICW .....	43
Figura 47: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), ICW .....	44
Figura 48: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), ICW .....	44
Figura 49: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), IN .....	45
Figura 50: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), IN.....	45
Figura 51: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), IN .....	46
Figura 52: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), IW .....	46
Figura 53: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), IW .....	47
Figura 54: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), IW .....	47
Figura 55: matrices de uniformidad de Susaeta modificadas .....	48
Figura 56: Uniformidad Mina El Salvador.....	49
Figura 57: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, ICE.....	50
Figura 58: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, ICW.....	50
Figura 59: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, IN .....	51
Figura 60: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, IW .....	52
Figura 61: Uniformidad vs PED (corto plazo), ICE .....	53
Figura 62: Uniformidad vs PED (mediano plazo), ICE.....	53
Figura 63: Uniformidad vs PED (largo plazo), ICE .....	54
Figura 64: Uniformidad vs PED (corto plazo), ICW .....	54
Figura 65: Uniformidad vs PED (mediano plazo), ICW.....	55
Figura 66: Uniformidad vs PED (largo plazo), ICW .....	55
Figura 67: Uniformidad vs PED (corto plazo), IN.....	56
Figura 68: Uniformidad vs PED (mediano plazo), IN .....	56
Figura 69: Uniformidad vs PED (largo plazo), IN.....	57
Figura 70: Uniformidad vs PED (corto plazo), IW.....	57
Figura 71: Uniformidad vs PED (mediano plazo), IW .....	58
Figura 72: Uniformidad vs PED (largo plazo), IW .....	58
Figura 73: Comparación %Columna extraída, ICE .....	59
Figura 74: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, ICE .....	59
Figura 75: Comparación %Columna extraída, ICW .....	60
Figura 76: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, ICW .....	60
Figura 77: Comparación %columna extraída, IN .....	61
Figura 78: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, IN.....	61
Figura 79: Comparación %columna extraída, IW .....	62
Figura 80: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, IW .....	62
Figura 81: Números de puntos diluidos en el tiempo, ICE .....	63
Figura 82: Evolución temporal de la dilución, ICE .....	63
Figura 83: Histogramas números de vecinos con dilución, ICE.....	64
Figura 84: Número de puntos con dilución, ICW.....	64

Figura 85: Evolución temporal de la dilución (2001-2005), ICW .....	65
Figura 86: Evolución temporal (2009-2011), ICW .....	65
Figura 87: Histogramas números de vecinos con dilución, ICW .....	66
Figura 88: Números de puntos con dilución, IN.....	66
Figura 89: Evolución temporal de la dilución (1995-1998), IN .....	67
Figura 90: Evolución temporal de la dilución (1999-2003), IN .....	67
Figura 91: Histogramas número de vecinos con dilución, IN .....	68
Figura 92: Números de puntos con dilución, IW .....	68
Figura 93: Evolución temporal de la dilución (2000-2003), IW .....	69
Figura 94: Evolución temporal de la dilución (2006-2011), ICW .....	69
Figura 95: Histogramas números de vecinos con dilución, IW .....	69
Figura 96: PED real vs PED modelo, Modelo 1 ICE, Probabilidad de corte 0.5 .....	81
Figura 97: PED real vs PED modelado, Modelo 2 ICE, Probabilidad de corte 0.5 .....	82
Figura 98: Histograma error PED [%], Modelo 2 ICE .....	82
Figura 99: Matriz de contingencia, Modelo 2 ICE .....	83
Figura 100: Error PED [%] Modelo 2 ICE, por puntos de extracción (VP).....	83
Figura 101: PED real vs PED modelado, Modelo 1 ICW, Probabilidad de corte 0.65.....	84
Figura 102: PED real vs PED modelado, Modelo 2 ICW, Probabilidad de corte 0.85.....	85
Figura 103: Histograma error PED [%], Modelo 2 ICW .....	85
Figura 104: Matriz de contingencia, Modelo 2 ICW .....	86
Figura 105: Error PED, Modelo 2 ICW, por punto de extracción (VP).....	86
Figura 106: PED real vs PED modelado, Modelo 1 IN, Probabilidad de corte 0.80 .....	87
Figura 107: PED real vs PED modelado, Modelo 2 IN, Probabilidad de corte 0.65 .....	88
Figura 108: Histograma error PED [%], Modelo 2 IN.....	88
Figura 109: Matriz de contingencia, Modelo 2 IN.....	89
Figura 110: Error PED, Modelo 2 IN, por punto de extracción (VP) .....	89
Figura 111: PED real vs PED modelado, Modelo 1 IW, Probabilidad de corte 0.85 .....	90
Figura 112: PED real vs PED modelado, Modelo 2 IW, Probabilidad de corte 0.65 .....	91
Figura 113: Histograma error PED [%], Modelo 2 IW .....	91
Figura 114: Matriz de contingencia, Modelo 2 IW .....	92
Figura 115: Error PED, Modelo 2 IW, por punto de extracción (VP) .....	92
Figura 116: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, ICE.....	95
Figura 117: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, ICW .....	95
Figura 118: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, IN.....	96
Figura 119: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, IW .....	96
Figura 120: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en ICE, Probabilidad de corte 0.65 .....	98
Figura 121: Histograma error PED [%], Modelo Andina en ICE.....	98
Figura 122: Matriz de contingencia, Modelo Andina en ICE.....	99
Figura 123: Error PED, Modelo Andina en ICE, por punto de extracción (VP) .....	99
Figura 124: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en ICW, Probabilidad de corte 0.8.....	100
Figura 125: Histograma error PED [%], Modelo Andina en ICW .....	100
Figura 126: Matriz de contingencia, Modelo Andina en ICW .....	101

Figura 127: Error PED, Modelo Andina en ICW, por punto de extracción (VP).....	101
Figura 128: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en IN, Probabilidad de corte 0.5 .....	102
Figura 129: Histograma error PED [%], Modelo Andina en IN.....	102
Figura 130: Matriz de contingencia, Modelo Andina en IN.....	103
Figura 131: Error PED, Modelo Andina en IN, por punto de extracción (VP) .....	103
Figura 132: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en IW, Probabilidad de corte 0.25 .....	104
Figura 133: Histograma error PED [%], Modelo Andina en IW .....	104
Figura 134: Matriz de contingencia, Modelo Andina en IW .....	105
Figura 135: Error PED, Modelo Andina en IN, por punto de extracción (VP) .....	105
Figura 136: PED real vs PED modelado, FlowSim en ICE .....	106
Figura 137: Histograma error PED [%], FlowSim en ICE.....	106
Figura 138: Matriz de contingencia, FlowSim en ICE.....	107
Figura 139: PED real vs PED modelado, FlowSim en ICW .....	107
Figura 140: Histograma error PED [%], FlowSim en ICW.....	108
Figura 141: Matriz de contingencia, FlowSim en ICW .....	108
Figura 142: PED real vs PED modelado, FlowSim en IN .....	109
Figura 143: Histograma error PED [%], FlowSim en IN.....	109
Figura 144: Matriz de contingencia, FlowSim en IN.....	110
Figura 145: Secuencia de extracción ICE (Paredes, 2012) .....	117
Figura 146: Secuencia de extracción ICW (Paredes, 2012).....	117
Figura 147: Secuencia de extracción IN (Paredes, 2012).....	118
Figura 148: Secuencia de extracción IW (Paredes, 2012).....	118
Figura 149: Uniformidad del punto, ICE .....	119
Figura 150: Uniformidad del punto, ICW .....	119
Figura 151: Uniformidad del punto, IN .....	119
Figura 152: Uniformidad del punto, IW.....	120
Figura 153: Uniformidad.2 del punto, IW.....	120
Figura 154: Distribución uniformidad de puntos, ICE.....	120
Figura 155: Distribución uniformidad de puntos, ICW .....	121
Figura 156: Distribución uniformidad de puntos, IN.....	121
Figura 157: Distribución uniformidad de puntos, IW .....	121
Figura 158: Curva ROC Modelo 1 ICE .....	122
Figura 159: Curva ROC, Modelo 2 ICE .....	122
Figura 160: Curva ROC, Modelo 1 ICW .....	123
Figura 161: Curva ROC Modelo 2 ICW .....	123
Figura 162: Curva ROC Modelo 1 IN.....	124
Figura 163: Curva ROC Modelo 2 IN.....	124
Figura 164: Curva ROC Modelo 1 IW.....	125
Figura 165: Curva ROC Modelo 2 IW.....	125
Figura 166: Error PED por punto de extracción, FlowSim en ICE .....	126
Figura 167: Error PED por punto de extracción, FlowSim en ICW .....	126
Figura 168: Error PED por punto de extracción, FlowSim en IN.....	126

## Índice de tablas

Tabla 1: Producciones actuales Minería masiva de Hundimiento (Labbé, 2014).....	2
Tabla 2: Producciones futuras Minería masiva de Hundimiento (Labbé, 2014) .....	2
Tabla 3: Mecanismos de entrada de dilución por sector (Paredes, 2012) .....	17
Tabla 4: Matriz de Contingencia .....	17
Tabla 5: Resumen Mina El Salvador (Paredes, 2012) .....	20
Tabla 6: Puntos con dilución, El Salvador .....	21
Tabla 7: Mejores resultados simulaciones Rebop, El Salvador (Paredes, 2012).....	21
Tabla 8: Resumen parámetros evaluadores según matriz de contingencia para sectores de Mina El Salvador (Valencia, 2014).....	22
Tabla 9: Resumen Modelos predictivos de dilución .....	27
Tabla 10: Posibles variables predictoras de la entrada de dilución.....	28
Tabla 11: Información recolectada por Codelco.....	29
Tabla 12: Variables Independientes a considerar .....	30
Tabla 13: Variables no consideradas .....	30
Tabla 14: Tipos de eventos para la regresión logística .....	31
Tabla 15: Tipos de velocidades calculadas .....	41
Tabla 16: Tipos de uniformidades calculadas .....	48
Tabla 17: Uniformidad de los sectores El Salvador.....	49
Tabla 18: Análisis estudio exploratorio de datos .....	70
Tabla 19: Resumen variables analizadas.....	73
Tabla 20: Test Univariable, ICE.....	74
Tabla 21: Test Univariable, ICW.....	75
Tabla 22: Test Univariable, IN .....	76
Tabla 23: Test Univariable, IW .....	77
Tabla 24: Modelo 1 ICE.....	78
Tabla 25: Modelo 2 ICE.....	78
Tabla 26: Modelo 1 ICW .....	79
Tabla 27: Modelo 2 ICW .....	79
Tabla 28: Modelo 1 IN.....	79
Tabla 29: Modelo 2 IN.....	80
Tabla 30: Modelo 1 IW.....	80
Tabla 31: Modelo 2 IW .....	80
Tabla 32: Estadísticos Modelo 2 ICE.....	82
Tabla 33: Estadísticos Modelo 2 ICW .....	84
Tabla 34: Estadísticos Modelo 1 IN.....	87
Tabla 35: Estadísticos Modelo 2 IN.....	87
Tabla 36: Estadísticos Modelo 1 IW.....	90
Tabla 37: Estadísticos Modelo 2 IW.....	90



Tabla 38: Resumen estadísticos Modelos Multivariables .....	93
Tabla 39: Análisis comparativo variables de los modelos .....	94
Tabla 40: Modelo Multivariable Andina (Cifuentes, 2017) .....	97
Tabla 41: Estadísticos Modelo Andina en ICE.....	97
Tabla 42: Estadísticos Modelo Andina en ICW .....	100
Tabla 43: Estadísticos Modelo Andina en IN.....	102
Tabla 44: Estadísticos Modelo Andina en IW .....	104
Tabla 45: Estadísticos FlowSim en ICE.....	106
Tabla 46: Estadísticos FlowSim en ICW .....	107
Tabla 47: Estadísticos FlowSim en IN.....	109
Tabla 48: Comparación ICE.....	110
Tabla 49: Comparación ICW.....	111
Tabla 50: Comparación IN.....	111
Tabla 51: Comparación IW .....	111