



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**MODELO MULTIVARIABLE DE INGRESO DE DILUCIÓN EN
MINERÍA DE CAVING
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

LENIN SALVADOR ARANCIBIA GUEVARA

PROFESORA GUÍA:
MARÍA ELENA VALENCIA VERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAÚL CASTRO RUIZ
PABLO PAREDES MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2017

Resumen

El método de explotación de Block/Panel Caving tiene dentro de sus dificultades principales evitar o retrasar la entrada temprana de dilución, pues genera un perjuicio económico a los proyectos mineros. Es por ello que se han generado una serie de herramientas que permiten simular el comportamiento de la dilución, pero con resultados deficientes y con enfoque en el largo plazo.

Por eso que el presente trabajo, tiene como objetivo generar modelos de predicción que permitan emular el comportamiento de la dilución a escala operacional, mediante evaluación de condiciones de entorno y variables operacionales.

Mediante la utilización de la metodología de construcción de modelos de regresión logística para casos raros, donde la variable dependiente es la primera entrada de dilución para extracciones menores al 100% de la columna in-situ. Y las variables independientes o predictoras son tanto de entorno (alturas de columna in-situ, porcentaje de columna in-situ extraída, estado de vecinos) como operacionales (velocidad de extracción y uniformidad del tiraje).

Se generan modelos para cada sector de la mina El Salvador (ICE, ICW, IN e IW) donde se puede distinguir diferencias en las variables de los modelos, dependiendo del tipo de mecanismo de entrada de dilución que gobierna al sector. Entonces para modelos de entrada lateral de dilución las variables a considerar son: estado de vecinos, uniformidad del tiraje y alturas de columnas in-situ; y para modelos de entrada vertical son: estado vecinos, uniformidad del tiraje, alturas de columnas in-situ y porcentaje de la columna in-situ extraída; también para IW que tiene entrada de dilución debido a un estallido de roca las variables son: estado vecinos, uniformidad del tiraje, velocidad de extracción y alturas de columnas in-situ.

Los modelos resultan de una buena calidad, donde se obtienen precisiones sobre el 80%, salvo para IW donde la precisión alcanza sólo 76%. Además los modelos minimizan de forma eficaz los errores asociados al PED (punto de entrada de la dilución) donde se obtienen errores totales del PED (RMSE) menores al 30%, a excepción de IW donde el RMSE es de 39%.

Haciendo una comparación entre los modelos de regresión logística y la herramienta de simulación FlowSim 2.0. Los modelos de regresión logística demuestran una mayor eficacia al momento de predecir la entrada de dilución al nivel puntos de extracción, teniendo mejores resultados en precisión y en minimizar los errores del PED, esto se demuestra de sobremanera en los sectores con mecanismo de dilución lateral, donde FlowSim tiene muy malos resultados.

Se concluye que la metodología es válida para predecir el comportamiento de la dilución a escala operacional. Y queda como trabajo ajustar y validar estos modelos usando otras bases de datos, y realizar una guía completa que permita dar recomendaciones operacionales y evaluar estrategias de producción con el fin de retrasar la entrada de dilución.

Abstract

The method of exploitation of Block/Panel Caving has among its main difficulties to avoid or delay the early entry of dilution, as it generates economic damage to the mining projects. It is therefore a series of tools have been generated to simulate the dilution behavior, but with poor results and a long-term focus.

It is therefore the present work, aims to generate predictive models that allow the emulation of the dilution behavior on an operational scale, through evaluation of environmental conditions and operational variables.

Using the methodology of construction of logistic regression models for rare cases, where the dependent variable is the first dilution input for extractions less than 100% of the column in situ. And the independent or predictive variables are both environment (in-situ column heights, percentage of in-situ column extracted, neighbors state) and operational variables (extraction velocity and uniformity).

Models are generated for each sector of the El Salvador mine (ICE, ICW, IN and IW) where differences in the variables of the models can be distinguished, depending on the type of dilution input mechanism that governs the sector. Then for dilution lateral input models the variables to be considered are: neighbors state, uniformity and height of columns in-situ; And for vertical input models are: neighboring state, uniformity, in-situ column heights and percentage of the in-situ column extracted; Also for IW that has dilution input due to a rock burst the variables are: neighboring state, uniformity, extraction velocity and in-situ column heights.

The models are of good quality, where accuracy is obtained over 80%, except for IW where the accuracy reaches only 76%. In addition, the models effectively minimize errors associated with the PED (dilution entry point) where total PED errors (RMSE) are less than 30%, with the exception of IW where the RMSE is 39%.

Making a comparison between logistic regression models and the FlowSim simulation tool. The logistic regression models show a greater efficiency in predicting the entry of dilution at the extraction point level, having better results in precision and in minimizing the errors of the PED, this is demonstrated very much in the sectors with lateral dilution mechanism, Where FlowSim 2.0 has very poor results.

It is concluded that the methodology is valid to predict the performance of the dilution on an operational scale. And it remains the job to adjust and validate these models using other databases, and to make a complete guide that allows to give operational recommendations and to evaluate production strategies in order to delay the entry of dilution.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, en especial a mis padres, Jorge y Verónica, por su amor, enseñanzas y valores que me entregaron, y por siempre confiar en mí. También a mis hermanos, Yonathan y Cristóbal, por todo el tiempo compartido, abrazos, ánimos y discusiones. A mi sobrina hermosa, por su cariño y siempre recordarme que nunca se deja de aprender, incluso de los más pequeños. A mis tías(os), primas(os), y familia en general, por los buenos momentos que siempre se intentan compartir.

A mi profesora guía, María Elena, por su tiempo, paciencia y ganas de querer aportar en la construcción de este trabajo. En especial, le agradezco por su amistad.

Al profesor Raúl, le agradezco la oportunidad de poder trabajar con él, sus sugerencias, preguntas y cuestionamientos, que siempre hacen mejorar. También agradecer a Pablo por tener el tiempo de leer este trabajo.

A todos mis compañeros(as) que compartieron en algún momento en el BCLab: Seba, Diego, Marcos, Alfonso, Gerson, Juanpi, Pera, Jimi, Pancho, Vanesa, Yina, Katherine, Doli, Chamo, Casafont, Matamoros, David, Sergio, Asieh, Rosello, María José (perdónenme si se me olvida alguien). Por las risas y conversaciones que hacen más agradable el trabajo en el laboratorio.

A todos los compañeros que he tenido, en el colegio y en la universidad, por el tiempo compartido en el estudio o en los carretes. Por los recuerdos que quedaran para siempre.

Quisiera agradecer a todas las personas e instituciones, que hacen posible y mantienen viva la educación pública en este país. A mis colegios y a mi universidad, el Clara Estrella, el Instituto Nacional y la Universidad de Chile, por todo lo aprendido, por su lucha incansable por la calidad, igualdad e integración. A todos(as) trabajadores(as) de estas instituciones, porque a pesar de muchas veces no recibir el reconocimiento que merecen, hacen su mejor esfuerzo, por enseñar no sólo conocimiento sino también valores, por mantener en buenas condiciones nuestros lugares de estudio y trabajo.

Tabla de Contenido

Capítulo 1	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
Capítulo 2	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
Capítulo 3	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
Capítulo 4	33
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
Capítulo 5	73
5.1.	Análisis univariabes	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
Capítulo 6	112
6.1. Conclusiones generales	112
6.2. Recomendaciones y trabajos futuros	113
Bibliografía	114
Anexos	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

Capítulo 1

1.1. Introducción y motivación

Con la progresiva profundización de los yacimientos y la disminución de las leyes, sumado a las nuevas normativas medioambientales (en Chile y en parte del mundo), ha crecido la explotación mediante métodos subterráneos en desmedro de la minería a cielo abierto. De acuerdo a Moss (2011), la proporción entre minería superficial y subterránea, se inclinará al 2021 a proporciones equivalentes.

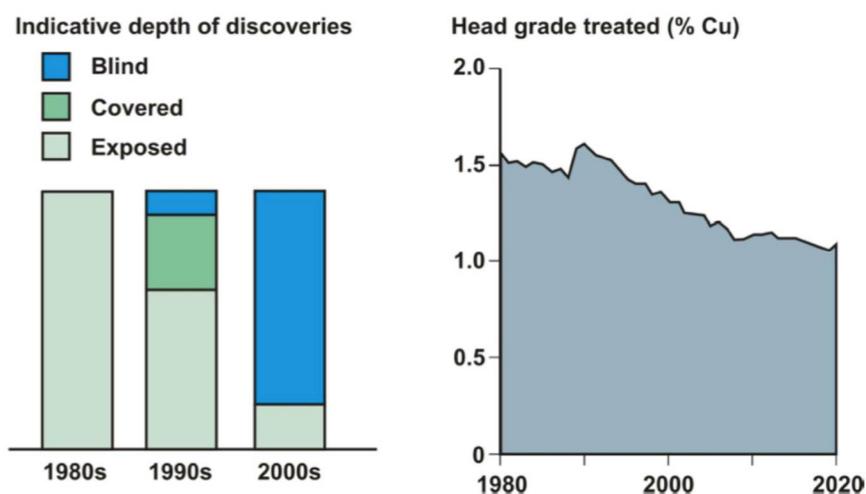


Figura 1: Tendencias en exploración y ley de cabeza (Moss, 2011)

En especial ha aumentado y muy posiblemente aumentará la explotación por medio de métodos de hundimiento, dado sus bajos costos de operación y sus altas tasas de extracción, esto se puede observar en la construcción de nuevos proyectos en Chile como lo son el proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS) y el proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM), ambos de CODELCO. También en la construcción de múltiples proyectos alrededor del mundo (Figura 2), donde se prevé que la producción (mediante métodos de Block/Panel Caving) pasará de 0.45 [Mton/día] a 1.42 [Mton/día] (Labbé, 2014), como se observa en las tablas 1 y 2.



Figura 2: Operaciones de minería masiva de hundimiento actuales y futuras (Labbé, 2014)

Tabla 1: Producciones actuales Minería masiva de Hundimiento (Labbé, 2014)

MINA	PAIS	PRODUCCIÓN [MTPA]
Ridgeway Deeps	Australia	5.6
Northparkes	Australia	3.65
El Teniente	Chile	47.5
El Salvador	Chile	16.0
Andina	Chile	10.0
Henderson Lv 7210	EEUU	11.7
Bell	Canada	0.9
Shabanie	Zimbawe	1.3
DOZ – Freeport	Indonesia	29.2
Lutopan	Filipinas	9.4
Philex	Filipinas	10
Palabora	Sudáfrica	14.6
New Afton	Canada	4.0
TOTAL		448,808 [ton/día]

Tabla 2: Producciones futuras Minería masiva de Hundimiento (Labbé, 2014)

MINA	PAIS	PRODUCCIÓN [MTPA]
Grasberg Underground	Indonesia	58.4
Deep Mill Level Zone (DMLZ)	Indonesia	29.2
KUCING LIAR	Indonesia	36.5
Oyu Tolgoi	Mongolia	32.9
Chuquicamata Subterranea	Chile	51.1
Nuevo Nivel Mina (DET)	Chile	65.7
Cadia East	Australia	25.6
North Parkes SC	Australia	30.0
Resolution Copper	EEUU	40.2
Bingham Canyon Underground	EEUU	26.5
Carrapateena	Australia	12.5
Golpu	Papua New Guinea	22.0
Argyle Underground	Australia	9.5
New Afton	Canadá	4.0
Pebble PLP	Alaska	73.0
Alemao SC	Brasil	0.4
TOTAL		1,417,267 [ton/día]

En especial, el PMCHS tiene como particularidad la presencia de la Falla Oeste, como se aprecia en la figura 3. El material al oeste de esta falla es considerado mineral estéril (diluyente) con ley de cobre 0% (Codelco, 2009), por lo tanto, esta falla podría provocar la entrada temprana de dilución en los puntos de extracción ubicados en la Cabecera Oeste.

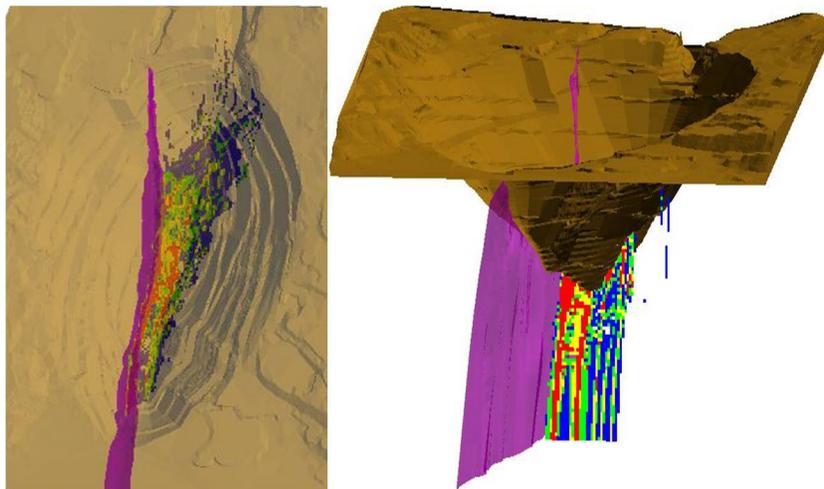


Figura 3: Falla oeste PMCHS

El costo de mover dilución es perjudicial en un proyecto minero. Dentro de un simple ejercicio de cálculo, se puede destacar que si se produce 10% más de dilución en vez de mineral esto tendrá como efecto un 16% menos de flujo de caja anual, como se observa en la figura 4.

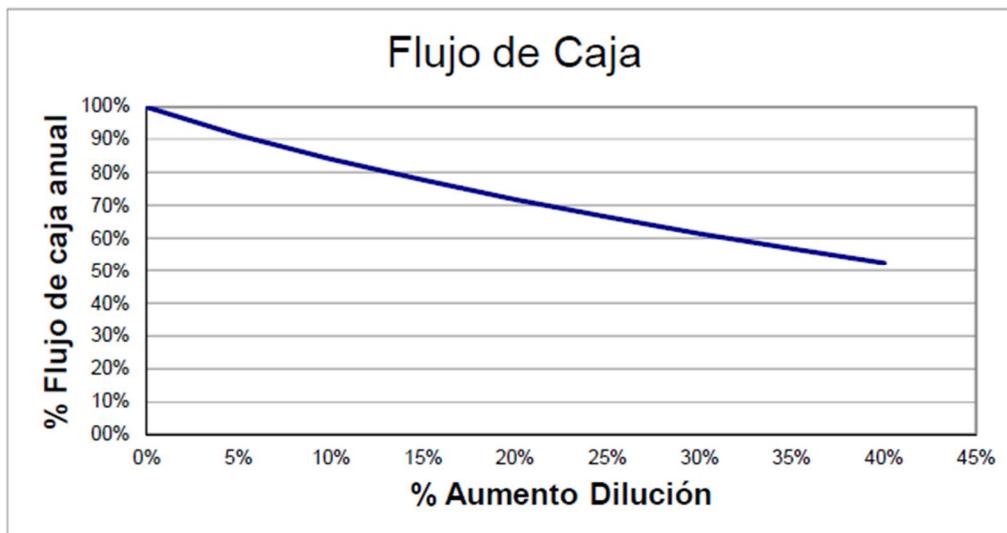


Figura 4: Flujo de caja anual vs Aumento dilución

Es por ello que se hace relevante estudiar las variables críticas para una correcta explotación. El estudio que se propone es con la finalidad de mejorar el conocimiento sobre la dilución en este tipo de método de explotación.

La dilución es un concepto fundamental en minería pues tiene implicancias en la definición del método de explotación y en el diseño minero. Además también puede tener influencia en el procesamiento de minerales.

La dilución es una parte integral de una operación minera de hundimiento y el objetivo es minimizarla en función de maximizar la utilidad del proyecto, sin embargo, dependiendo de su contenido de metal de interés podría ser rentable extraer una mezcla rica en diluyente, en función de aumentar la recuperación de mineral.

Por ende entender cuáles son las variables que influyen, y cómo afectan, en la entrada de dilución es fundamental para tener proyectos y operaciones más seguras en cuanto a definición de reservas, evaluación económica y estrategias de extracción óptimas. Para poder cumplir esto, se propone utilizar métodos estadísticos para determinar el riesgo de ingreso de dilución basado en la historia del punto de extracción, mediante la regresión logística multivariable.

Lo anterior puede llevar a tomar decisiones, que minimicen la probabilidad de entrada de dilución a los puntos de extracción, en base a factores operacionales y de entorno, incluso a una escala operacional (corte plazo).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Generar modelos predictivos de entrada de dilución a una escala operacional, basado en factores operacionales y de entorno, mediante una metodología que pueda ser aplicable a minas de Block/Panel Caving.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables operativas y de entorno que influyen en la entrada de dilución.
- Analizar cómo influyen esas variables en la entrada de dilución, mediante modelos de regresión logística.
- Comparar los modelos de regresión logística con otros métodos de cálculo de entrada de dilución.
- Proponer estrategias de extracción para evitar o retrasar la entrada de dilución.

1.3. Alcances

Para el desarrollo de este trabajo se considera una base de datos histórica (1994-2011) de la mina El Salvador recolectados por Codelco, por ende se asume la correcta toma de éstos.

Dado que se analizarán distintos sectores de la mina señalada, los cuales presentan diferentes condiciones geológicas y de operación, se propondrán modelos multivariados de regresión logística para cada sector.

Los modelos de regresión logística solo contemplarán las variables que se puedan obtener en la base de datos proporcionada.

Se toma como material diluyente, el quebrado que se encuentra sobre el mineral in-situ.

1.4. Contenidos del trabajo de memoria

A continuación, se exponen los capítulos que estructuran el presente trabajo de memoria con una descripción de sus respectivos contenidos:

Capítulo 1: Introducción. Se introduce el tema del presente trabajo, se plantea la motivación que justifica la realización de él, dando a conocer los principales objetivos y alcances que persigue y delimita el presente estudio.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica. Corresponde a la revisión del marco teórico y estado del arte de los antecedentes para la realización del trabajo de memoria. Además, se expone el análisis crítico sobre la revisión relacionada a la problemática en estudio

Capítulo 3: Metodología. Se dan a conocer los lineamientos y pasos a seguir para la construcción de los modelos de predicción de entrada de dilución

Capítulo 4: Estudio exploratorio de la base de datos. Se realiza un estudio de la base de datos viendo el comportamiento de las variables de interés.

Capítulo 5: Construcción modelos multivariados de ingreso de dilución. Se construyen los modelos multivariados de ingreso por sector, previo análisis univariable, se muestran los resultados obtenidos, se calibran los modelos y se realiza un análisis preliminar. Además se valida un modelo de ingreso de dilución. Se comparan los modelos de regresión multivariados de ingreso de dilución con herramientas de simulación de flujo.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones. Corresponde a las conclusiones obtenidas a partir del trabajo llevado a cabo, además de comentarios y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

2. Revisión bibliográfica

Debido a la eficiencia energética y el bajo costo para el transporte de material granular, el flujo gravitacional juega un importante rol en el ámbito minero, principalmente en los métodos de explotación subterráneos, tales como Sublevel Caving, Sublevel Stopping y Block/Panel Caving.

Dentro de estos métodos, el Block/Panel Caving es un método de bajo costo y alta productividad, y cuya eficiencia recae en el uso de la gravedad para generar el quiebre y el movimiento de gran cantidad de roca quebrada hacia un nivel de producción y, además, debido a la forma en que se lleva a cabo este flujo, impacta directamente tanto la recuperación del material de interés, como en la entrada de material diluyente en las unidades de extracción.

Es por ello que muchos autores han estudiado el comportamiento del flujo gravitacional y de su relación que tiene con la entrada de dilución. En esta sección se hace el esfuerzo de resumir el estado del arte que existe en relación a este tema.

2.1. Elipsoides de Extracción y Movimiento

Uno de los primeros en estudiar el fenómeno de flujo gravitacional a través de modelos físicos fue Kvpil (1965), quien mediante experimentos con arena, introduce 2 conceptos claves: elipsoide de extracción (IEZ), que corresponde al volumen definido por la ubicación original de todos los puntos que resultaran extraídos en el punto de extracción; y elipsoide de movimiento (IMZ) que corresponde al volumen definido por la interfaz entre los puntos que han cambiado de posición con respecto a la que tenían iniciada la extracción. Luego Kvpil (1992) establece relaciones geométricas entre ambas zonas, determinando que la relación de alturas entre el elipsoide de extracción y movimiento es de 1:2.5 y la relación entre los volúmenes es 1:15. (Figura 5)

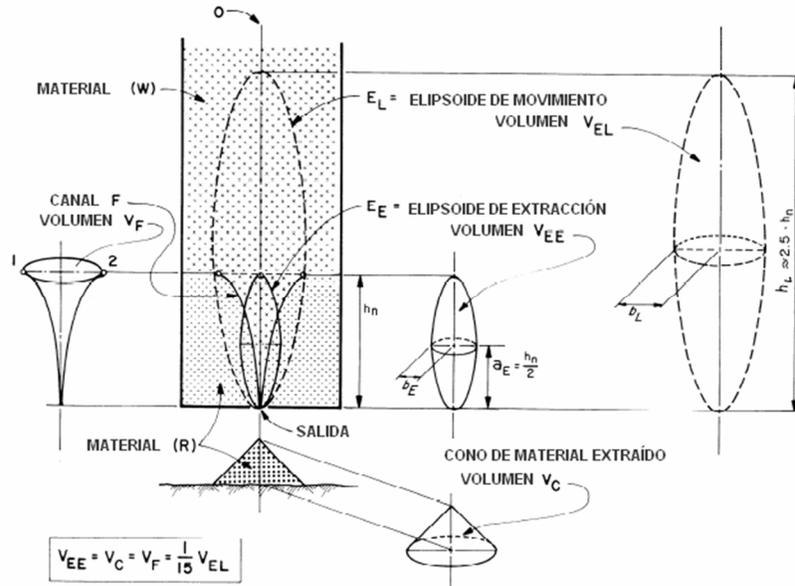


Figura 5: Relaciones geométricas de los elipsoides de extracción y de movimiento (Kvapil, 1992)

2.2. Teoría de Entrada de Dilución de Laubscher

Laubscher (2006) plantea una serie de parámetros que afectan a la entrada y contenido total de dilución, estos se describen a continuación:

- *Razón de volumen de mineral y área de contacto mineral-diluyente:*
Mientras mayor sea la razón entre el volumen de mineral y el área de contacto mineral-diluyente, menor será el contenido total de dilución extraído (Figura 6).

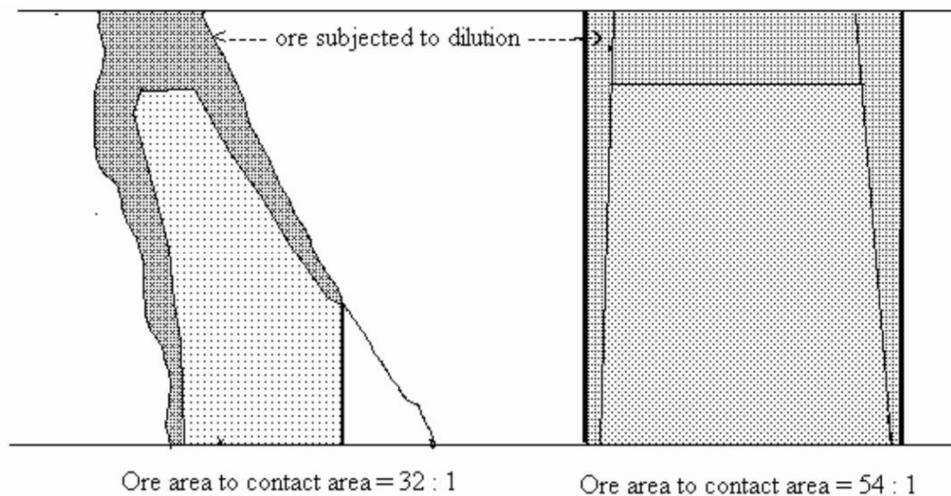


Figura 6: Razón de volumen de mineral y área de contacto mineral-diluyente

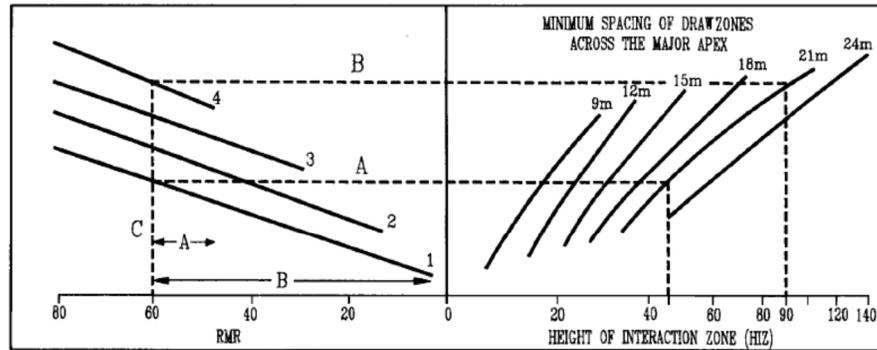
- *Disposición y forma mineral-diluyente:*
Mientras más irregular e inclinada sea la interfaz, mayor será el contenido de dilución en la mezcla extraída comparado con el caso de una interfaz lateral-vertical y de geometría regular.
- *Diferencia entre la fragmentación del mineral y el material diluyente:*
Entre más fina sea la fragmentación del material diluyente, relativa a la del mineral, mayor será el contenido de dilución en la mezcla y más temprana será la entrada del material diluyente al punto de extracción.
- *Interacción de los elipsoides de extracción:*
Mientras mayor sea la interacción entre los elipsoides de extracción, menor será el contenido de dilución que se extraiga de los puntos y más tardía será la entrada del material diluyente en ellos.
- *Velocidad de extracción*
Se debe tener un buen cálculo de la velocidad de extracción adecuada para impedir la entrada de dilución o fenómenos como sismicidad o estallidos de aire, y permitir la propagación del Caving. Se debe comenzar con poca velocidad e ir aumentando de hasta que se conecte el Caving y tratar de mantener una velocidad relativamente constante.
- *Alturas de columnas in-situ*
- *Diferencias de tonelajes extraídos entre los puntos activos.*

En base a estos a algunos de estos parámetros, Laubscher (2000) propone una relación (2.1) para estimar el punto de entrada de dilución (PED):

$$PED (\%) = \frac{H_c * S - HIZ}{H_c * S} * DCF * 100 \quad (2.1)$$

- Punto entrada de dilución, PED (%): Es el porcentaje de columna in-situ extraída en el cual se reporta ingreso de dilución.
- Altura de columna del punto de extracción, H_c : Corresponde a la altura medida desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/material diluyente.
- Esponjamiento alcanzado en la columna, S: El cual corresponde al aumento relativo de volumen que experimenta la roca debido a su fragmentación. Es medido a través del factor de esponjamiento (S). Laubscher (1994), propone que los factores de esponjamiento típicos según tipo de fragmentación esperada de la roca son 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.
- Altura de interacción, HIZ: Corresponde a la altura desde la cual se producirá interacción entre los elipsoides de extracción. Laubscher afirma que ésta será función de la diferencia en la calidad de roca, medida a través de la diferencia entre el RMR del material diluyente y el mineral, y el espaciamiento de los puntos de extracción a través del ápex mayor. (Figura 7)

RMR OF ALL MATERIAL IN THE POTENTIAL DRAW COLUMN TO BE USED IN CALCULATION AS FINES FLOW MUCH FURTHER THAN COARSE

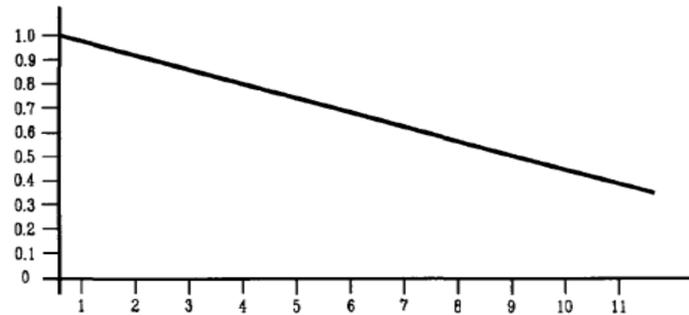


RMR Range	Curves	Examples	Ratings	Range	D.Z.Spacing	H.I.Z
0 - 14	NO.1	A	50 - 60	10	21m	45m
15 - 29	NO.2					
30 - 49	No.3					
+50	No.4	B	5 - 60	55	21m	90m

VERTICAL LINE "C" LOCATED AT HIGHEST RATING OF MATERIAL IN DRAW COLUMN

Figura 7: Altura de Interacción (HIZ) (Laubscher, 1994)

- Diferencia de extracción entre el punto y sus vecinos, DCF: Se refiere a la diferencia entre los tonelajes extraídos de un punto de extracción con respecto a sus vecinos en un determinado período de tiempo. Laubscher (1994) propone una medida de esta diferencia a través de un índice de control de tiraje (DCF) cuyo cálculo se basa en la desviación estándar de los tonelajes extraídos entre un punto y sus vecinos a una escala de extracción mensual (Figura 8).



Standard Deviation x 100 of Tonnage of Working Drawpoints

D/Ps	W/1	E/1	W/2	E/2	W/3	E/3	W/4	E/4
Monthly Tonnage	2000	800	1000	2500	600	1500	800	1800
	Mean = 1375 Standard Deviation = 682/100 = 7							
	Draw Control Factor = 0.6							

Figura 8: Factor de control de tiraje (DCF) (Laubscher, 1994)

Una vez definido el PED, Laubscher (1994) establece un modelo volumétrico de mezcla basado en la división de la columna de extracción en tajadas que poseen un volumen, densidad y leyes iniciales determinados, esto se puede observar en la figura 9.

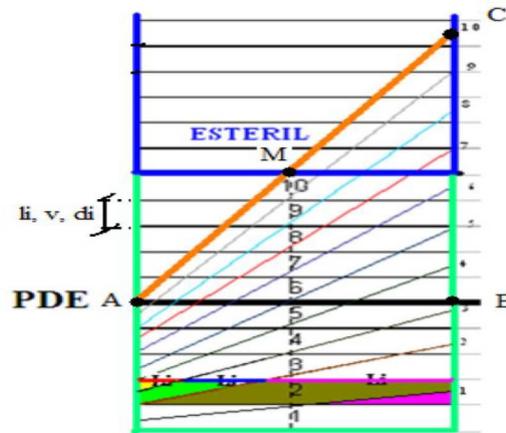


Figura 9: Modelo esquemático de curvas de mezclas utilizadas en el modelo de Laubscher (1994)

Se puede notar que la ecuación propuesta por Laubscher es una aproximación determinista basada en reglas empíricas (Paredes, 2012) y no considera todos los parámetros que él mismo propone.

2.3. Modelo de Susaeta (2004)

De los experimentos realizados por Susaeta con arena (2004) concluye que pueden establecerse 2 velocidades de flujo gravitacional. La primera es aquella que tienen las partículas dentro del elipsoide de flujo aislado y Susaeta la denomina “velocidad de tiraje aislado” (V_{ta}). La segunda, denominada “velocidad de tiraje interactivo” (V_{ti}), corresponde a aquella que tendrán las partículas que viajan fuera de la zona de baja densidad que forma el elipsoide de flujo aislado

Con esto el flujo puede clasificarse en 3 condiciones que quedan definidas por la diferencia entre la V_{ti} y la V_{ta} , estas son (figura 10):

- *Tiraje Aislado*: Condición de flujo donde V_{ta} es mayor que cero y V_{ti} es igual a cero.
- *Tiraje Aislado-Interactivo*: Condición de flujo donde V_{ta} es mayor que V_{ti} (ambas mayores que cero).
- *Tiraje Interactivo*: Condición de flujo donde V_{ta} es igual a V_{ti} (ambas mayores a cero).

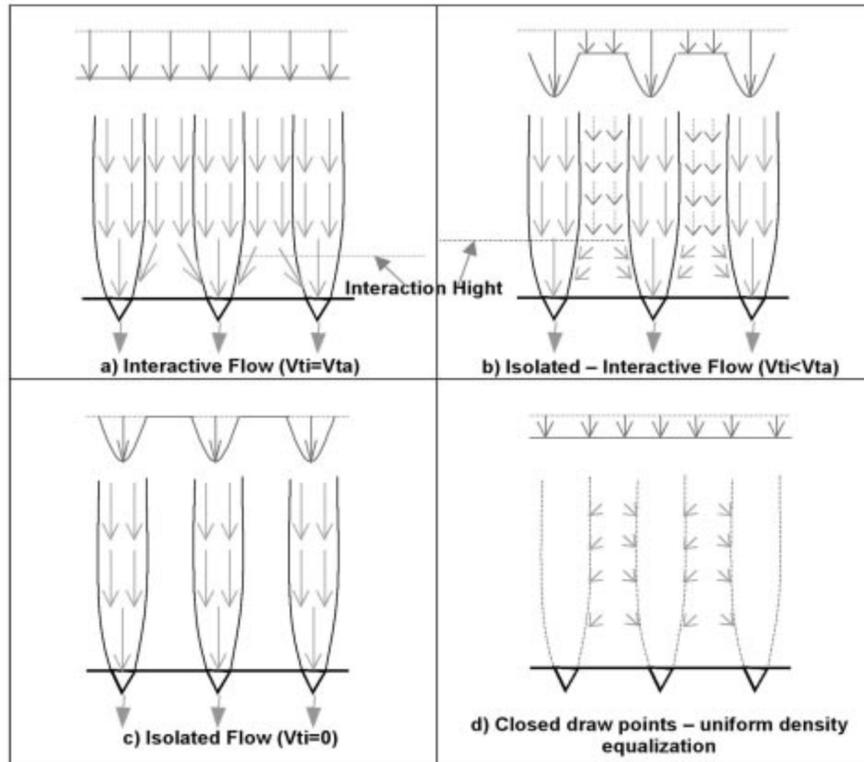


Figura 10: Condiciones de flujo (Susaeta, 2004).

Susaeta (2004) plantea que a medida que el comportamiento del flujo sea más interactivo, la dilución observada en el punto de extracción será menor. Además, postula que cuando el flujo se comporte como Tiraje Aislado-Interactivo o Tiraje Interactivo, la dilución que se observe al principio de la extracción del punto corresponderá a dilución lateral y luego comenzará el ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción. Mientras que para el caso de Tiraje Aislado, la primera observación de dilución en el punto corresponderá al ingreso del material diluyente ubicado sobre la columna de extracción y el contenido de dilución observado en el punto aumentará a medida que se siga realizando la extracción de forma más agresiva que para los otros casos (figura 11). También el autor indica que, mientras más pareja sea la extracción de un punto con respecto a sus vecinos, más cercano será el flujo del material quebrado a una condición de Tiraje Interactivo y, por lo tanto, menor será la dilución extraída y mayor será la recuperación de mineral.

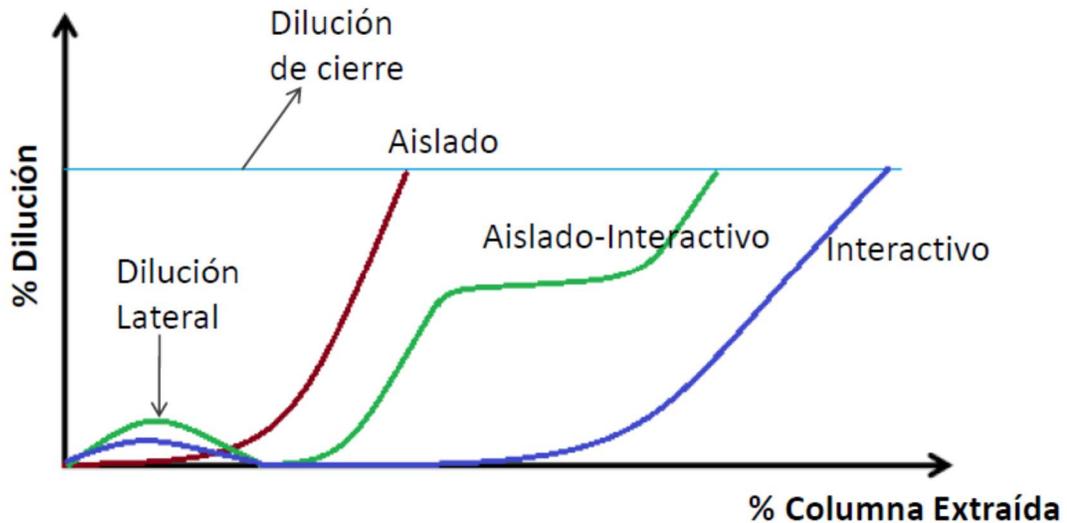


Figura 11: Comportamiento de dilución según modelo de Susaeta (Susaeta, 2004)

En un segundo trabajo (Susaeta, 2004) plantea una ecuación (2.2) que indica la uniformidad de un tiraje, llamado Índice de Uniformidad (I.U.):

$$I.U. = \Delta + \Gamma * \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 * n} * \sum_{i=1}^n (t_{max} - t_i) \quad (2.2)$$

- Δ : Número de vecinos inactivos.
- Γ : Factor de normalización igual a 99/89.
- t_p : Tonelaje extraído del punto en un período de tiempo determinado.
- t_i : Tonelaje extraído del punto i perteneciente a la vecindad del punto en cuestión en el período de tiempo determinado.
- $t_{máx}$: Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- $t_{mín}$: Tonelaje máximo extraído de la vecindad del punto en el mismo período de tiempo.
- n : Número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto en cuestión.

La primera dimensión (Δ) corresponde al número de vecinos inactivos del punto, mientras que la segunda se denomina "Índice de uniformidad específico". Para determinar en qué condición de tiraje se encuentra un punto con un determinado índice de uniformidad en un determinado período de tiempo, Susaeta (2004) utiliza la matriz presente en la figura 12.

		Índice de Uniformidad Específico				
		0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1
Número de puntos inactivos en vecindad	0	UNIF	UNIF	UNIF	SEMI	SEMI
	1	UNIF	UNIF	SEMI	SEMI	SEMI
	2	UNIF	SEMI	SEMI	SEMI	AISLADO
	3	SEMI	SEMI	SEMI	AISLADO	AISLADO
	4	SEMI	SEMI	AISLADO	AISLADO	AISLADO
	5	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO
	6	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO

Figura 12: Matriz de Uniformidad (Susaeta, 2004)

Esta matriz puede ser modificada dependiendo de los criterios y usos que se le quieran dar (Susaeta, 2004).

A partir de esta definición, Susaeta (2004), introduce el “porcentaje de uniformidad” definiéndolo como el porcentaje de tiempo (o de toneladas extraídas) durante el cual un punto se encuentra extrayendo en condición uniforme. Tal ejercicio puede usarse equivalentemente para definir el “porcentaje de semi-uniformidad” y el “porcentaje de desuniformidad” (aislado).

Mediante un estudio relacionó I.U. con el PED (base de datos de extracciones reales de las minas El Salvador, El Teniente y Andina) como se puede observar en las figuras 13 y 14 (Susaeta, 2004). Donde evidencia la relación que existe entre el % de toneladas extraídas de manera uniforme y semi-uniforme (en toda la vida útil del punto) con el PED.

Sector	Uniformity Index		% Dilution Entry
	%t = Isolation	% t = Unif. + semiuni	
Inca Norte	34	66	57
Inca Central	57	43	41
Quebrada Teniente	19	81	62
Teniente 4	34	66	54

Figura 13: Relación I.U. y PED para El Teniente y El Salvador (Susaeta, 2004).

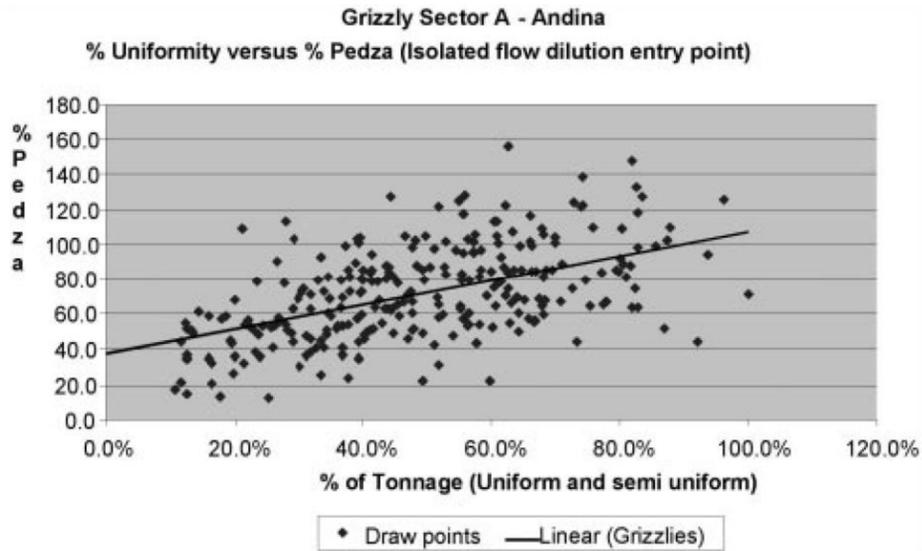


Figura 14: Gráfico I.U. (%tonelaje) y PED para el Sector Parrillas de Andina (Susaeta, 2004)

Otros estudios que relacionan el I.U. con PED mediante datos mina han sido realizados por Susaeta et al. (2008), Castillo (2009) y Paredes (2012). También hay estudios que relacionan el PED con la uniformidad del tiraje (no necesariamente el I.U.) mediante modelos físicos como Pineda (2012), Iribarra (2014), Vergara (2016), este último relacionó la uniformidad con PEQ (punto de entrada de quebrado). Y otros estudios que han comparado los distintos tipos de índices de uniformidad (figura 15) (Santibáñez, 2008), y otro que ha calculado el I.U. de Susaeta para distintos rangos de tiempo y de vecinos (Castillo, 2009) donde se estableció que los parámetros óptimos es un periodo de tiempo de 3 turnos (un día) y una vecindad de 7 puntos (incluyendo el punto a analizar).

Índice de Uniformidad	Formulación	Autor	Parámetros	Rango	
Índice de uniformidad (vectorial)	$I.U. = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{max} - t_i)$	Susaeta 2004	<ul style="list-style-type: none"> ➤ toneladas puntuales, máximo y mínimo ➤ n° de vecinos ➤ n° de puntos inactivos 	Matriz de Uniformidad	
Draw Control Factor	Ábaco empírico (Figura 8)	Laubscher 1994	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Desviación estándar de toneladas acumulados 	0.3	No Uniforme
Índice de uniformidad normalizado	$NUI = \frac{\sum_{i=1}^n (te_{p0} - te_{pi})}{n \cdot \bar{te} \cdot 100}$	División El Salvador 2000	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tonelajes puntuales y promedio ➤ número de vecinos 	[0,1[Uniforme
				[1,2[Semi-Uniforme
				[2,∞[No Uniforme
Índice de uniformidad de la pendiente	$SUI = 1 - \frac{1}{90} \cdot tg^{-1} \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{(n-1) \cdot 100} \right)$	Santibáñez 2008	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tonelajes máximo y mínimo ➤ número de vecinos 	1	Uniforme
				0	No Uniforme

Figura 15: Resumen índices de uniformidad (Paredes, 2012).

2.4. Mecanismos de entrada de dilución (Paredes, 2012)

Pablo Paredes (2012) propone 3 mecanismos de entrada de dilución, luego de hacer un análisis de datos de las minas Andina y El Salvador:

- *Entrada de Dilución debido a desplazamiento vertical:*
Cuando la fuente de dilución se ubica encima del panel a explotar y existe una propagación regular del cave back hacia ella, la dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical (figura 16)

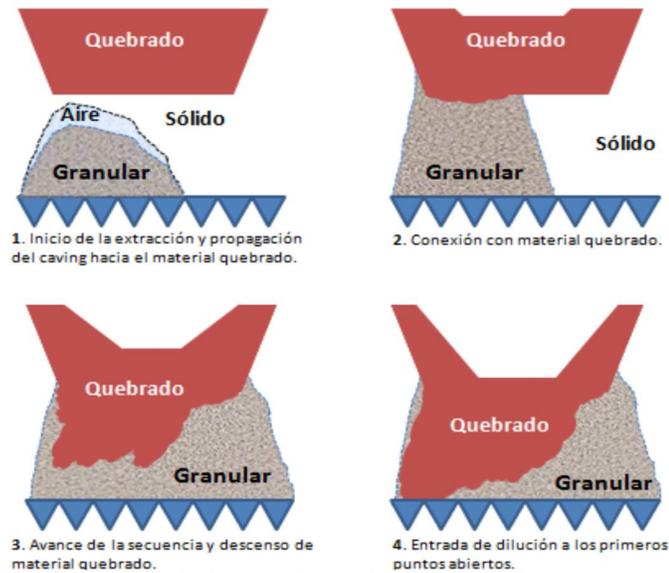


Figura 16: Perfiles de secuencia de mecanismos de entrada vertical (Paredes, 2012)

- *Entrada de Dilución debido a desplazamiento lateral:*
Cuando el panel en cuestión se ubica al costado de un sector previamente explotado, a medida que su secuencia avanza, el cave back se propaga hacia la interfaz con el material quebrado. Si se genera un espacio de aire suficientemente grande para permitir el ingreso de material quebrado y el ángulo de la pila de material granular permite el flujo lateral del material, éste viajará hasta los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado (figura 17).

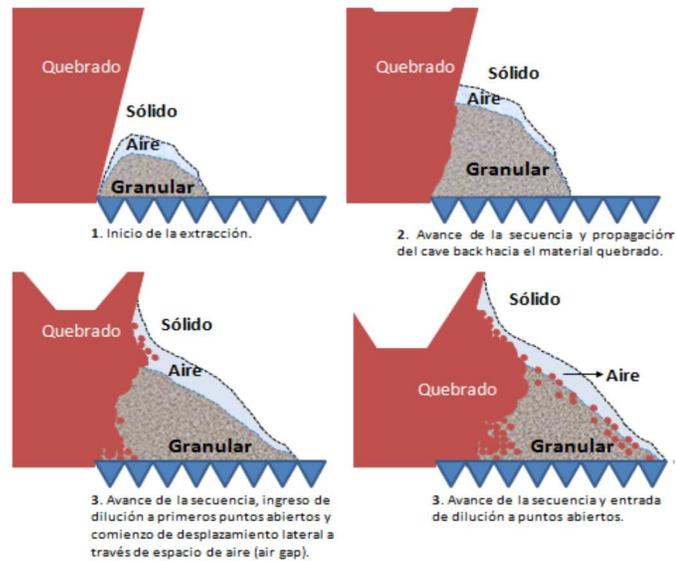


Figura 17: Perfiles de secuencia de entrada de dilución lateral (Paredes & Castro, 2014)

- Entrada de Dilución posterior a un evento de colgadura del cave back:*

Si el radio hidráulico del área inicial abierta no es suficiente para propagar el caving, ocurrirá un colgadura del cave back. Si habiendo ocurrido esto, se continúa la extracción del área abierta sin incorporar más área, el vacío generado por la extracción no se llenará de material fragmentado y se acumulará un bolsón de aire. Una vez que se incorpore área nueva a la extracción, el cave back se propagará de manera repentina y la dilución ubicada encima del panel explotado ingresará a los puntos de extracción luego de un estallido de aire (figura 18).

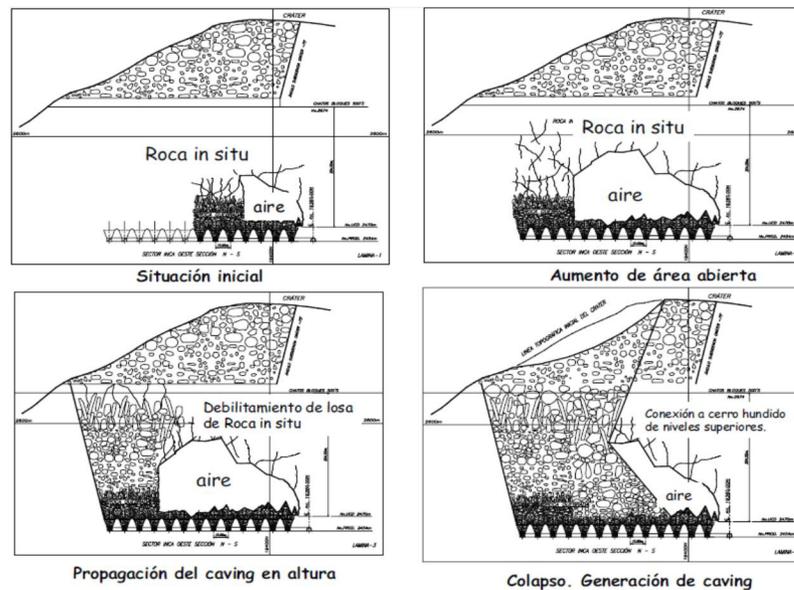


Figura 18: Secuencia de eventos de colapsos y air blast en el comienzo de la secuencia IW (De Nicola & Fishwick, 2000)

Finalmente Paredes (2012) plantea un mecanismo de entrada de dilución para cada sector a analizar, como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3: Mecanismos de entrada de dilución por sector (Paredes, 2012)

Sector (Mina)	Tipo de dilución
ICE (El Salvador)	Dilución lateral proveniente del norte
IN (El Salvador)	Dilución lateral proveniente del sur
IW (El Salvador)	Estallido de aire debido a colgadura del cave back
ICW (El Salvador)	Entrada vertical de dilución
Parrillas Norte (Andina)	Dilución vertical (riolita)
	Dilución lateral (quebrado)
Parrillas Sur (Andina)	Dilución lateral (riolita)
LHD Norte (Andina)	Dilución vertical (riolita)
LHD Sur (Andina)	Dilución vertical (riolita)
	Dilución vertical (quebrado)

2.5. Definiciones índices de comparación y test de diagnósticos

2.5.1. Matriz de contingencia

Para evaluar modelos basados en datos reales se utiliza la metodología de matrices de contingencia, que permite obtener indicadores sobre el desempeño de un modelo estadístico. Como este trabajo es precisamente obtener modelos de regresión logística, es fundamental tener una forma de validarlos.

El cálculo de la matriz de contingencia se basa en el porcentaje de casos correctamente clasificados por el estimador, de acuerdo al contraste entre los estados de eventos predichos y observados. Para este fin se definen variables de verdaderos positivos (VP), falsos positivos (FP), falsos negativos (FN) y verdaderos negativos (VN) de acuerdo al acierto entre la estimación y la observación de un evento (Ver tabla 4).

Tabla 4: Matriz de Contingencia

		Casos reales	
		Positivo	Negativo
Casos hipotéticos	Positivo	Verdadero Positivo (VP)	Falso Positivo (FP)
	Negativo	Falso Negativo (FN)	Verdadero Negativo (VN)

De esto se establece una serie de parámetros que permiten comparar distintos modelos de estimación como: sensibilidad (2.3), especificidad (2.4), precisión (2.5), sesgo (2.6), confiabilidad (2.7), PSS (2.8).

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{VP+FN} \quad (2.3)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{VN+FP} \quad (2.4)$$

$$\text{Precisión} = \frac{VP+VN}{VP+FP+FN+VN} \quad (2.5)$$

$$\text{Sesgo} = \frac{VP+FP}{VP+FN} \quad (2.6)$$

$$\text{Confiabilidad} = \frac{\left(\frac{VP}{VP+FN} + \frac{VN}{VN+FP}\right)}{2} \quad (2.7)$$

$$\text{PSS} = \frac{VP}{VP+FN} - \frac{FP}{FP+VN} \quad (2.8)$$

Cuando el PSS es mayor a cero ($PSS > 0$), significa que los aciertos son mayores a las falsas alarmas. Luego, la metodología de pronóstico puede ser utilizada, dado que es posible inferir que existe cierta capacidad de pronóstico. La lógica de este parámetro se sostiene en que a pesar de que existan numerosos aciertos, la valoración del predictor disminuye si el número de falsas alarmas aumenta.

2.5.2. Error cuadrático medio

Para el cálculo de la precisión la variable simulada o modelada, estima la variable observada, se introduce el error cuadrático medio (Pielke, 2002), por sus siglas en inglés se abrevia como RMSE. El RMSE posee la misma unidad de medida que la variable estudiada y se calcula como la ecuación 2.9.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(V_{sim} - V_{obs})^2}{N}} \quad (2.9)$$

2.5.3. Error relativo medio

El RMSE posee la misma unidad de medida que la variable estudiada, por lo que se hace necesario contar con un índice construido en términos relativos, de manera de observar el comportamiento relativo de la variable simulada con respecto a la variable observada. Por esto, se define en la ecuación 2.10 el error relativo medio.

$$\text{Error relativo medio} [\%] = \frac{RMSE}{\sum_{i=1}^N \frac{V_{obs}}{N_{obs}}} * 100 \quad (2.10)$$

2.6. Definición dilución en Mina El Salvador

Mina El Salvador (Codelco, Chile), se ubica en la tercera región de Atacama y es explotada por el método de Panel Caving. El material diluyente de esta mina corresponde a la limonita, que se distingue por su particular color rojo, lo cual permite ser usado como marcador geológico. Esta característica posibilita a los operadores identificar el tonelaje y porcentaje de dilución observada a medida que se realiza la extracción de las columnas de mineral.

La base de datos corresponde a la extracción histórica desde Julio de 1994 hasta Mayo de 2011 de 4 sectores: Inca Central Este (ICE), Inca Central Oeste (ICW), Inca Norte (IN) e Inca Oeste (IW). Un resumen de la extracción respecto a tonelajes y leyes por sector se encuentra resumido en la tabla 5. De forma gráfica en la figura 19, se observa la configuración de los sectores productivos de la mina El Salvador con sus correspondientes cotas de nivel de hundimiento (UCL).

El Salvador posee una base de datos robusta de la limonita como dilución estimada en los puntos de extracción. El modelo de bloques cuenta con la categorización de bloques según tipo de roca (incluyendo el quebrado), sin embargo, no existe en la información una medida del contenido de limonita en cada bloque. Por lo tanto, para efectos de estimar la dilución en las simulaciones se utiliza el quebrado (PEQ) como marcador geológico (Paredes, 2012).

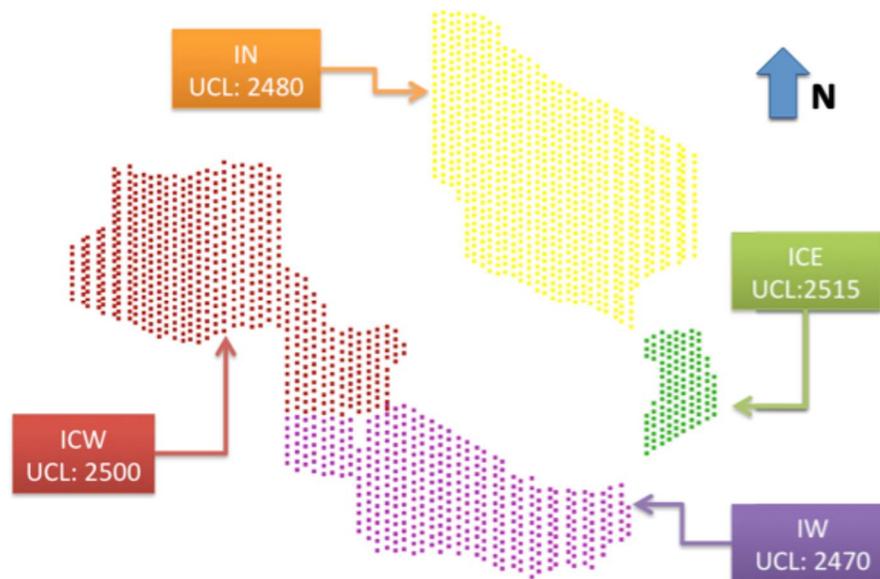


Figura 19: Vista en planta sectores Mina El Salvador (Paredes, 2012)

Tabla 5: Resumen Mina El Salvador (Paredes, 2012)

Sector	Número de puntos con extracción	Tonelaje Extraído del sector [kt, mensual]		Leyes de Cu Extraídas [kt, mensuales]	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est
ICE	108	57.7	51.8	0.56	0.06
ICW	471	258.4	100.1	0.64	0.05
IN	578	297.6	205.2	0.57	0.11
IW	202	164.5	87.3	0.54	0.05

Para definir el punto de entrada de dilución (PED), Paredes (2012) observó que muchas veces la dilución tiene comportamiento de pulso, es decir, entra en ciertos períodos y luego desaparece, hasta un momento que entra en forma definitiva. Por ende, Paredes (2012) define el PED como el porcentaje de la columna in-situ extraída donde ingresa la dilución acumulada al 3%, pues esto representa un volumen robusto de datos, eliminando aquellas sin entrada de dilución significativa, mientras que los criterios del 5% y 10% generan pérdidas de información. En las figuras 20 y 21 se observa el comportamiento anteriormente descrito para un punto en particular del sector ICE.

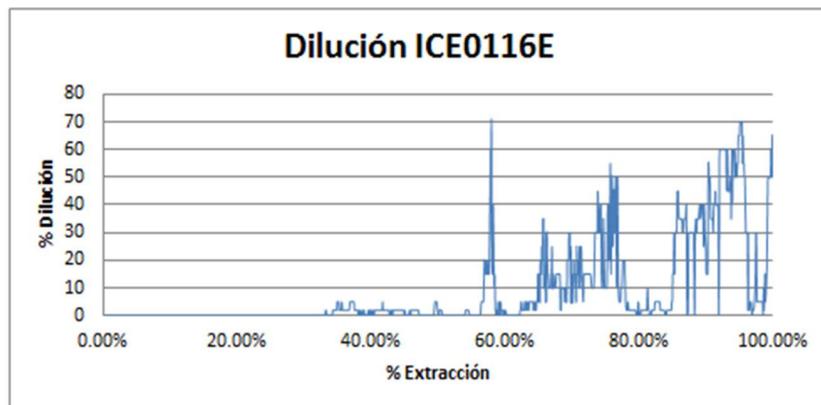


Figura 20: Comportamiento %Dilución vs %Extracción, ICE0116E

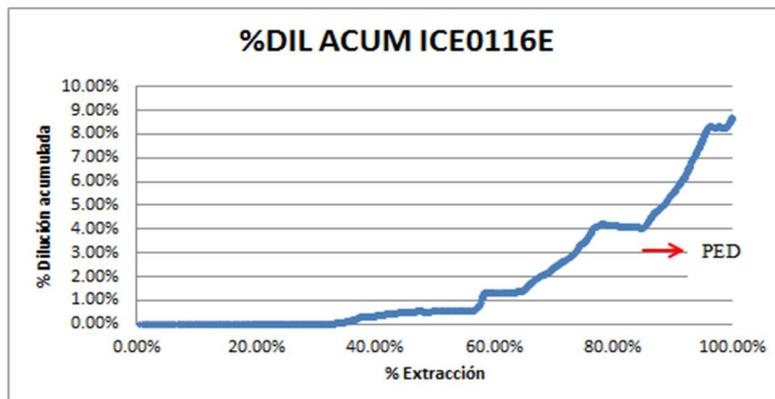


Figura 21: Comportamiento %Dilución acumulada vs %Extracción, ICE0116E

Tabla 6: Puntos con dilución, El Salvador

Sector	Puntos con dilución	Puntos con dilución PED<100%	PED promedio [%]	PED promedio <100%
ICE	58	44	57 ⁺ ₋ [54]	49 ⁺ ₋ [32]
ICW	168	77	103 ⁺ ₋ [40]	68 ⁺ ₋ [25]
IN	356	289	78 ⁺ ₋ [70]	39 ⁺ ₋ [25]
IW	138	119	67 ⁺ ₋ [48]	43 ⁺ ₋ [26]

En la tabla 6, se hace un resumen de los puntos dilución y el PED promedio para cada sector de la mina, además se hace el resumen de los puntos con dilución temprana (PED<100%) y su PED promedio. Con esto, se puede decir que, los sectores ICE, IN e IW la diferencia entre puntos con dilución y puntos con dilución temprana no es muy alta (cerca al 20%), en cambio, en el sector ICW si hay una notable entre los puntos con dilución y los puntos con dilución temprana (más de 50%). Además, a excepción del sector ICE, se ven claras diferencias en el PED promedio si se considera todos los puntos con dilución o sólo los con dilución temprana.

2.7. Simulaciones Mina El Salvador

2.7.1. Simulación Rebop

Paredes (2012) realizó simulaciones con datos de la Mina El Salvador para 4 sectores de ella. Las simulaciones se efectuaron en 2 dimensiones, primero se comparó la capacidad predictiva de la herramienta en términos de tonelajes, leyes y entrada de dilución (fecha) a nivel de sector, y luego en términos de punto de entrada de dilución (PED (3%)) a nivel de puntos de extracción.

En Rebop se realizan 4 sets de parámetros diferentes en términos de tamaño de fragmentación e inclusión de la propagación del cave back para las simulaciones. En la tabla 7 se presentan los mejores resultados para cada sector analizado.

Tabla 7: Mejores resultados simulaciones Rebop, El Salvador (Paredes, 2012)

Sector	Período ingreso de dilución al sector (real - simulado)	PED [%] real	PEQ [%] simulado	RMSE [%]	Confiabilidad [%]
ICE	-1	57 [±] [54]	30 [±] [13]	59	77
ICW	1	103 [±] [40]	96 [±] [23]	37	84
IN	2	78 [±] [70]	71 [±] [43]	75	73
IW	39	67 [±] [48]	102 [±] [37]	67	82

Se puede concluir que las mejores simulaciones se dan para el sector ICW, donde el mecanismo de entrada de dilución propuesto es vertical (Paredes, 2012), en cambio, para los sectores con entrada de dilución lateral (ICE e IN) la confiabilidad de la simulación no es muy alta. Otro caso se da para el sector IW donde la confiabilidad es relativamente alta, pero hay un error grande en cuanto al tiempo que el simulador predice la entrada de dilución al sector con un error de 39 meses, esto se debe a que en este sector la entrada de dilución se produjo por un estallido de roca debido a la colgadura del cave back (Paredes, 2012) (De Nicola & Fishwick, 2000).

2.7.2. Simulación FlowSim 2.0

Valencia (2014) realizó simulaciones de los sectores ICE e ICW de la mina El Salvador con FlowSim. En estas simulaciones, Valencia (2014) determinó que FlowSim pronostica de forma correcta los puntos con entrada de dilución, pero tiende a pronosticar dilución en puntos que en la realidad no se observa (falsos positivos). En la tabla 8, se resumen los índices de comparación, donde se advierte que los valores de sensibilidad son bastantes más altos que los de especificidad, lo que indica que el simulador tiende a sobreestimar los puntos con dilución.

Tabla 8: Resumen parámetros evaluadores según matriz de contingencia para sectores de Mina El Salvador (Valencia, 2014)

Sector	ICE	ICW
Precisión	78%	82%
Sesgo	1.42	2.36
Sensibilidad	93%	95%
Especificidad	60%	75%
PSS	52%	71%

En cuanto a la estimación del PED, se calcula la diferencia absoluta entre el valor simulado y el valor real. Es aquí que Valencia (2014), determinó que las mayores diferencias de PED se encuentran a los falsos positivos, por ejemplo en el sector ICW, el error asociado a los verdaderos positivos es cercano al 30%, mientras que el error asociado en el caso de falsos positivos asciende al 80%. Con esto, sumado a lo anterior (sensibilidad y especificidad) denota que FlowSim tiene una tendencia clara a sobreestimar el ingreso de dilución. Esta sobrestimación se hace notoria en zonas aledañas a puntos realmente diluidos, pues, el simulador tiene dificultades para establecer el área de influencia de la extracción por punto (Valencia, 2014).

También, Valencia (2014) comparó FlowSim con Rebop, mediante 2 parámetros, tiempo de respuesta y calidad de la respuesta. En relación al tiempo de respuesta, Rebop al menos toma 7 días en simular, mientras que FlowSim tomó 10 horas para el sector ICE y 3 días para ICW. En cuanto a la calidad de la respuesta, Valencia (2014) estableció que FlowSim siempre tiene una mejor simulación que su caso análogo en Rebop, en establecer el PED (figura 22) y en tiene una menor dispersión de los datos (figura 23).

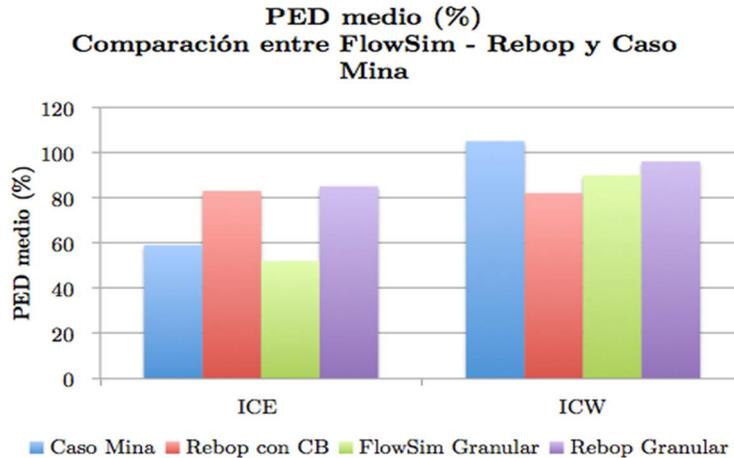


Figura 22: Comparación PED medio [%] entre FlowSim, Rebop y datos mina (Valencia, 2014)

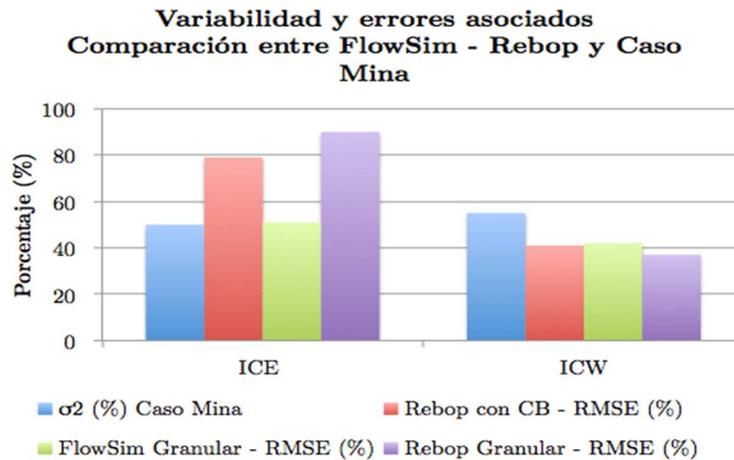


Figura 23: Comparación de Desviación estándar del PED con error cuadrático medio entre FlowSim, Rebop y datos mina (Valencia, 2014)

2.7.3. Conclusiones Simulaciones

Luego de analizar las simulaciones realizadas en Rebop y FlowSim, se concluye que no son tan precisas y/o confiables en predecir la existencia de dilución en los puntos de extracción, en particular no son capaces de predecir de buena forma la entrada de dilución en los sectores con mecanismo de dilución lateral (ICE e IN) donde la confiabilidad o precisión no supera el 80%. Además estos softwares tiene errores notables en los PED simulados comparados con los reales, por ende no son capaces de emular la entrada de dilución a escala operacional (corto plazo).

Es por esto, que se hace necesaria la creación una herramienta que prediga de mejor manera la entrada de dilución a los puntos de extracción (confiabilidad y/o precisión) y que puede servir para el corto plazo (disminuyendo los errores entre el PED real y el modelado).

Por ello se propone, la creación de una herramienta que prediga la entrada de dilución utilizando la regresión logística multivariable, la cual permite calcular la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, en este caso la entrada de dilución, en base a la historia de eventos anteriores.

2.8. Regresión Logística

La regresión logística es un tipo de análisis de regresión utilizado para predecir el resultado de una variable categórica (una variable que puede adoptar un número limitado de categorías) en función de las variables independientes o predictoras. El análisis de regresión logística se enmarca en el conjunto de Modelos Lineales Generalizados (GLM) que usa como función de enlace la función logit. La regresión logística utiliza las ecuaciones 2.11 y 2.12 (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013):

$$\text{Logit}(p(x)) = \ln\left(\frac{p(x)}{1-p(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \dots + \beta_n * X_n \quad (2.11)$$

$$p(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 * X_1 + \dots + \beta_n * X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 * X_1 + \dots + \beta_n * X_n}} \quad (2.12)$$

En este tipo de modelos (regresión logística) las variables independientes no necesitan tener una distribución normal (Tabachnick & Fidell, 2013). No hay requerimientos respecto a relaciones lineales o varianzas equivalentes. Otra ventaja de esta herramienta es que debido a su naturaleza, sus resultados siempre son positivos. Además las variables predictoras es pueden ser continuas, discretas, dicotómicas o una mezcla de ellas (Valencia, 2016). También esta regresión permite trabajar con eventos raros (King & Zeng, 2001).

2.8.1. Ajuste de la ecuación

Los valores β deben cumplir con la metodología de máxima verosimilitud (Ibragimov, 2011). La cual tiene por objetivo maximizar la probabilidad de obtener los datos observados. La máxima verosimilitud no es el único método, pero en general es el más utilizado y aceptado (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013).

2.8.2. Odds Ratio

Se define odds ratio, como la oportunidad de que ocurra un evento dado el aumento en una unidad una condición de riesgo. En regresión logística se calcula la odds ratio, de una variable o condición, como se muestra en la ecuación 2.13 (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013):

$$OR = e^{\beta_i} \quad (2.13)$$

Por ende, si β_i es mayor a 0, significa que el aumento de la variable predictora implica un alza en la probabilidad de ocurrencia del evento, lo contrario se da si β_i es menor a 0. Con esto, se debe tener cuidado que dentro del intervalo de confianza de los β de las variables

independientes, no incluya el β igual a 0, pues significa que la variable puede no ser de interés en el modelo de regresión logística. Una variación en la variable predictora tiene un cambio en la odds ratio como se muestra en ecuación 2.14 (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013).

$$\Delta OR(x_1; x_2) = e^{\beta_i(x_2-x_1)} \quad (2.14)$$

2.8.3. Principio de parsimonia

El modelo de regresión logística debe ser lo más simple posible, es decir en lo posible debe tener el menor número de variables posible. Debe ser consistente e interpretable. Una mayor cantidad de variables en la regresión aumenta la desviación estándar del error. Todas las variables a ser integradas en el modelo deben ser testeadas. Debe demostrarse que la variable predictora es estadísticamente significativa para la variable dependiente (Valencia, 2016).

Cada una de las variables candidatas a ser predictoras debe ser sometida a un test univariable con la variable dependiente. En general se utiliza el test de Chi-cuadrado para evaluar la significancia estadística.

Una vez comprobada la significancia estadística de las variables predictoras por separado se procede a testear el modelo de forma multivariable utilizando máxima verosimilitud.

2.8.4. Trabajos anteriores y actuales

La regresión logística ha sido probada en ciencias médicas (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013) (De la Fuente, 2011) con gran éxito.

También se ha escogido utilizar esta herramienta, debido a que existen ejemplos en ciencias de la Tierra como estudio realizado para la predicción de derrumbes en las zonas montañosas (Van Den Eeckhaut et al., 2006) y recientemente se ha aplicado directamente en minería para predicción de entrada de agua-barro (Navia, Castro, & Valencia, 2014) (Garcés, Castro, Valencia, & Armijo, 2016) (Valencia, 2016).

2.8.5. Testeo de modelos

Considerando la metodología para seleccionar variables predictoras, es probable que se tenga como resultado más de un modelo de regresión logística. Para ello es necesario evaluar el éxito de cada uno de estos. Diversos autores, según el objetivo del modelo consideran coeficientes que permiten evaluar este tema, como por ejemplo:

- Criterio de información de Aikake
- Área bajo la curva ROC
- Dxy de Somers
- Goodman Krustal Gamma

Dentro de los criterios de evaluación se encuentra el análisis ROC o area bajo la curva ROC, esto es un gráfico que tiene en sus ejes la sensibilidad (ecuación 2.4) y 1-la especificidad (ecuación 2.5). El mejor método posible de predicción se situaría en un punto en la esquina superior izquierda, o coordenada (0,1) del espacio ROC, representando un

100% de sensibilidad (ningún falso negativo) y un 100% también de especificidad (ningún falso positivo). A este punto (0,1) también se le llama una clasificación perfecta. Por el contrario, una clasificación totalmente aleatoria (o adivinación aleatoria) daría un punto a lo largo de la línea diagonal, que se llama también línea de no-discriminación, desde el extremo inferior izquierdo hasta la esquina superior derecha (independientemente de los tipos de bases positivas y negativas). Un ejemplo típico de adivinación aleatoria sería decidir a partir de los resultados de lanzar una moneda al aire, a medida que el tamaño de la muestra aumenta, el punto de un clasificador aleatorio de ROC se desplazará hacia la posición (0.5, 0.5). Si se calcula el área bajo la curva (AUC) esta toma valores entre 0.5 a 1, donde 0.5 es el peor valor de predicción y 1 una predicción perfecta, normalmente valores mayores a 0.9 de AUC significa que el modelo es de buena calidad. En la figura 24 se ve un ejemplo de curva ROC

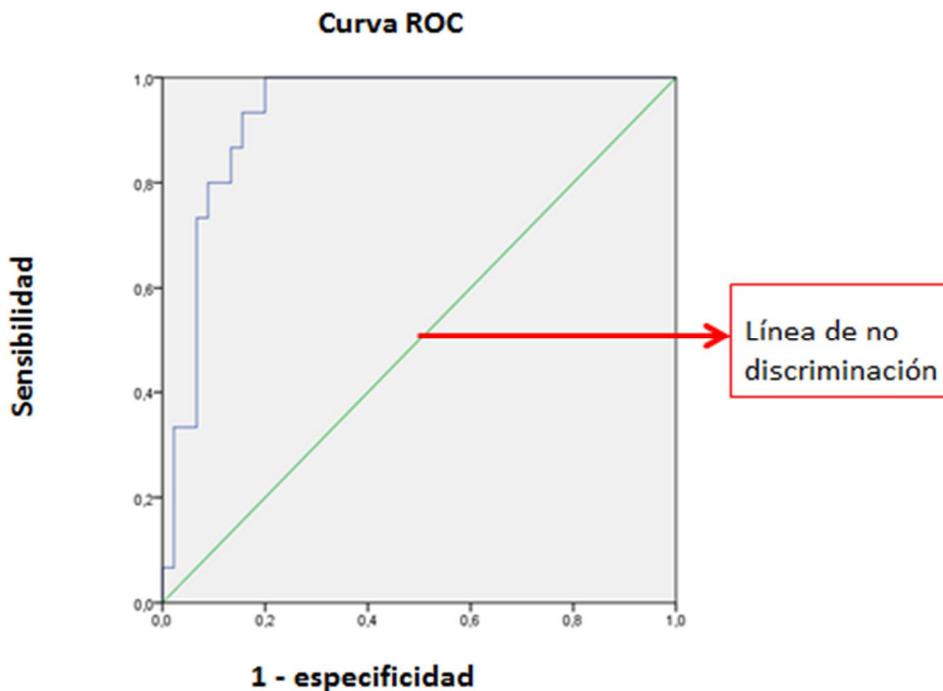


Figura 24: Ejemplo curva ROC

2.9. Conclusiones revision bibliográfica

Aun cuando existen herramientas para la estimación de la dilución en el largo plazo como: ecuaciones deterministas basadas en reglas empíricas (Laubscher, 2000), ecuaciones basadas en experimentos (Susaeta, 2004) y softwares que mediante diversos mecanismos predicen la dilución en un plan minero, en general no han sido capaces de establecer planes altamente confiables en relación a la dilución. Además softwares como Rebo y FlowSim tienen limitaciones en cuanto a la capacidad de cálculo (tiempo de simulación).

También estos softwares, no son capaces de emular el fenómeno de ingreso de dilución en minería de Caving a escala operacional (corto plazo). Por ende, es necesaria la creación de una herramienta para predecir el comportamiento de la dilución más confiable y para el corto plazo. En la tabla 9 se resumen todos los modelos anteriormente descritos en la revisión bibliográfica, describiendo sus ventajas y desventajas, donde queda claro que se necesita una nueva herramienta que pueda emular el fenómeno de la dilución en el corto plazo y que pueda simular de buena forma la dilución lateral. También se describe los beneficios y limitantes que tendría esta nueva herramienta.

Tabla 9: Resumen Modelos predictivos de dilución

	Inputs necesarios	Outputs	Ventajas	Desventajas
Laubscher (2000)	-Variables de entorno (Alturas de columnas, esponjamiento, alturas de interacción, fragmentación). -Plan de producción.	-PED -Cantidad de dilución en el plan.	-Fácil de utilizar (no hay necesidad de utilizar software).	-Es una aproximación determinista basado en reglas empíricas. -No toma en cuenta la dilución lateral.
Susaeta (2004)	-Plan de producción.	-PED	-Fácil de utilizar (no hay necesidad de utilizar software). -Tiene una validación en un caso real (Sector Parrillas Andina)	- Se basa sólo en una variable: la uniformidad del tiraje. -Ha sido utilizado en otras minas, donde su relación con el PED no es tan buena (Paredes, 2012).
Rebop (Paredes, 2012)	-Plan de producción -Modelo de bloques.	-PED -Cantidad de dilución en el plan.	-Puede simular de buena manera la entrada de dilución vertical en el largo plazo.	-No puede simular la entrada de dilución lateral de forma correcta. -No puede emular el fenómeno de entrada de dilución en el corto plazo. -Requiere elevados tiempos de simulación.
FlowSim 2.0 (Valencia, 2014)	-Plan de producción. -Modelo de bloques.	-PED -Cantidad de dilución en el plan.	-Simula de buena forma la entrada de dilución vertical. -Es una mejor herramienta de simulación que Rebop.	- No puede simular la entrada de dilución lateral de forma correcta. -No puede emular el fenómeno de entrada de dilución en el corto plazo
Regresión logística	-Plan de producción. -Variables de entorno (alturas de columna in-situ, puntos iniciales con dilución, fragmentación, preacondicionamiento)	-PED	-Toma en cuenta la historia del sector analizado. -Pretende modelar de mejor forma la entrada de dilución lateral. -Pretende ser una herramienta para tomar decisiones en	-Es una herramienta nueva, para este tipo de análisis, por ende, todavía no comprueba su eficacia. -Puede requerir la construcción de un programa computacional para hacer más rápido el

			el corte plazo, mediante variables operacionales.	proceso de cálculo.
--	--	--	---	---------------------

El estudio del estado del arte si permite establecer posibles variables predictoras del fenómeno de entrada de dilución, mediante la regresión logística, como se aprecia en la tabla 10. Se escoge el uso de éste tipo de herramienta estadística, pues está construida para variables dicotómicas, lo cual es el caso de la dilución, además ha sido efectiva en estudios en minería como: predecir la estabilidad de pilares de roca (Wattimena, 2014) y en ingreso de agua-barro a los puntos de extracción (Garcés, Castro, Valencia, & Armijo, 2016).

Tabla 10: Posibles variables predictoras de la entrada de dilución

Variable	Tipo	Sentido del β	Explicación Variable
Columna in-situ extraída [%]	Operacional	Positivo	A mayor % columna in-situ extraída mayor probabilidad de entrada de dilución, pues se está más cerca del quebrado o de la fuente de dilución (Laubscher, 2006).
Uniformidad [%]	Operacional	Negativo	A mayor uniformidad del tiraje menor probabilidad de entrada de dilución, pues se extrae de manera pareja los puntos sin sobre exigir a ciertos donde podría entrar la dilución en forma temprana. Esto lo comprueba el estudio hecho por Susaeta (2004).
Alturas de columnas in-situ [m]	Entorno	Negativo	A mayor altura de columna in-situ menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues existe una mayor separación entre la extracción inicial y la fuente de dilución (Laubscher, 2006).
Fragmentación (mineral/diluyente)	Entorno	Positivo	A menor relación entre fragmentación mineral/diluyente, o cuando más cercana a 1 sea, menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues es menor la migración de finos y por ende de dilución (Laubscher, 2006), (Bridgwater et al., 1978) (Hashim & Sharrock, 2012).
Velocidad de extracción [ton/(m ² * día)]	Operacional	Positivo	A mayor velocidad de extracción mayor probabilidad de entrada de dilución, en especial si hay cambios de velocidad de un período a otro (Laubscher, 2006), o notables diferencias de velocidad entre puntos de extracción (Vergara, 2016).
Vecinos con dilución [%]	Entorno	Positivo	A mayor cantidad de vecinos con dilución, mayor es la probabilidad de entrada de dilución, pues se piensa que la entrada de dilución no es puntual sino que contamina a toda una zona de un sector. Esto también se cree pues ocurre de forma similar en la entrada de agua barro (Garcés et al., 2016).
Medida de preacondicionamiento	Entorno	Negativo	A mayor intensidad del preacondicionamiento, menor es la probabilidad de entrada de dilución, pues se evitaría grandes diferencias de fragmentación entre el mineral y el diluyente, evitando la migración de finos.

Capítulo 3

3. Metodología

En esta memoria se trabaja con los datos recolectados de los sectores Inca Central Este (ICE), Inca Central Oeste (ICW), Inca Norte (IN) e Inca Oeste (IW) de la mina El Salvador, perteneciente a Codelco, entre los años 1994 y 2011. La información presente en los datos se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Información recolectada por Codelco

División Codelco	Información general	Tonelajes y leyes extraídas	Estimación contenido de dilución
El Salvador	<ul style="list-style-type: none">• Modelo de bloques.• Topografía.• Cotas niveles de producción y hundimiento	Tonelajes y leyes extraídas a nivel de puntos de extracción a escala de turno, consolidada con mediciones en la planta de tratamiento.	Estimación de contenido de dilución (limonita) a través de observaciones mensuales en puntos de extracción, desde el comienzo hasta el final de la extracción de los sectores

Para realizar los modelos probabilísticos de entrada de dilución se utiliza como herramienta la regresión logística, este tipo de regresión ha sido utilizado con éxito en ciencias médicas, y también se ha comenzado a usar en ciencias de la tierra, como el estudio realizado para predecir derrumbes en las zonas montañosas de Bélgica (Van Den Eeckhaut et al., 2006) y recientemente existe una aplicación directa en minería en la predicción en la entrada de agua barro (Garcés, Castro, Valencia, & Armijo, 2016) (Valencia, 2016).

La regresión logística necesita de una variable dependiente (Y) y una serie de variable predictoras o independientes (x_1, \dots, x_n). Como variable dependiente se utilizará la primera entrada de dilución acumulada al 3%, según lo propuesto por Paredes (2012), siempre y cuando el porcentaje de extracción sea menor al 100% de la columna in-situ, pues se quiere determinar la entrada temprana de dilución, por ende, solamente se tomarán datos con un % porcentaje de extracción de columna menor al 100% (esto queda sujeto al estudio exploratorio de los datos). Las variables predictivas que se usarán están en la tabla 12 sin perjuicio que, dependiendo del modelo, éstas pueden ser modificadas. Se escogieron estas variables debido al análisis del estado del arte y se descartaron otras (tabla 13) debido a que no era posible obtenerlas con la base de datos con la que se cuenta.

Tabla 12: Variables Independientes a considerar

Variable Independiente	Tipo
Porcentaje extracción de columna (in-situ)	Operación
Índice de Uniformidad (Susaeta)	Operación
Observación de Vecinos (Estado)	Entorno
Alturas columnas in-situ	Entorno
Velocidad de extracción	Operación

Tabla 13: Variables no consideradas

Variable Independiente	Tipo
Fragmentación (mineral/diluyente)	Entorno
Medida de preacondicionamiento	Entorno

Como se ha mencionado con el uso de la regresión logística se pretende construir modelos para todos los sectores que se han de analizar, también validar estos modelos y compararlos entre ellos para evaluar posibles relaciones, como por ejemplo observar si existe relación entre el mecanismo de entrada de dilución y los modelos predictivos.

Para construir estos modelos se deben seguir una serie de pasos y/o procedimientos para su correcta realización como: hacer un estudio exploratorio de datos; análisis univariable y análisis multivariable; calibración y validación del modelo; recomendaciones operacionales (uniformidad y velocidad). Esto se observa en la figura 25.

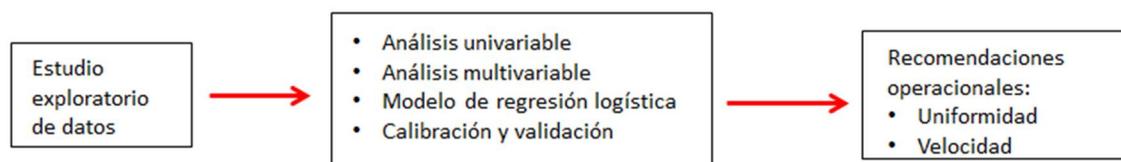


Figura 25: Diagrama Metodología

3.1. Pasos metodológicos

A continuación se describen con más detalles los pasos a seguir para la construcción de los modelos multivariables de regresión logística.

3.1.1. Estudio exploratorio de datos:

En esta etapa se realiza un análisis a la base de datos histórica (1994-2011) de la mina El Salvador, en función de cumplir las siguientes etapas:

- Cálculo de las variables independientes: alturas de columnas in-situ, velocidades de extracción, uniformidad de la extracción, %columna in-situ extraída y estado de vecinos.
- Definición de la variable dependiente.
- Se analiza, la relación que tiene las variables predictoras con la variable dependiente.

3.1.2. Construcción base de datos casos raros

Para realizar el análisis multivariable se usa la técnica de regresión logística para eventos raros (King & Zeng, 2001), pues la cantidad de eventos positivos representan menos 1% del total de datos. Esta técnica propone utilizar todos los datos con eventos positivos y esto representará un 25% de la base de datos utilizada, y se completa la base de datos con eventos negativos. En la tabla 14 se explican los tipos que se toman en la regresión logística, sin perjuicio, que debido a un análisis a la base de datos estos pueden ser modificados.

Tabla 14: Tipos de eventos para la regresión logística

Tipo de evento	Evento	Razón
Positivo	Primera entrada de dilución acumulada al 3%, cuando hay una extracción de la columna in-situ menor al 100%	Se necesita el por qué entra la dilución, además debido a la definición de la dilución en este trabajo, cuando ingresa ésta lo hace de forma permanente, es por ello, que se escoge solo la primera entrada de dilución. Se requiere determinar entrada temprana de dilución, por eso, la extracción debe ser menor al 100% de la columna in-situ.
Negativo	Extracciones de la columna in-situ menores al 100 %, sin dilución	Se necesitan saber las razones del no ingreso de dilución a los puntos de extracción. Se requiere determinar entrada temprana de dilución, por eso, la extracción debe ser menor al 100% de la columna in-situ.

3.1.3. Análisis univariable

Se realiza un análisis univariable a cada variable candidata a entrar al modelo multivariable, para poder pasar el test univariable, ésta debe tener una significancia menor a 0.25.

3.1.4. Análisis multivariable

Con las variables que pasen el test univariable se trate de construir un modelo que incluya tanto variables de entorno como operacionales. Es importante que el modelo sea entendible, fácil de interpretar y que entregue herramientas para evitar o retrasar la entrada de dilución.

Para que una variable pueda ingresar al modelo multivariable, su significancia debe ser menor 0.05, pero para no perder una posible variable valiosa, se aceptará una significancia

de 0.1. Otro criterio para el ingreso de una variable al modelo multivariable es que su β tenga sentido con la teoría y la lógica, sino debe ser eliminada del modelo.

Para comparar modelos de forma preliminar se comparan estadísticos como: precisión, confiabilidad y área bajo la curva ROC. Esto es solo un análisis preliminar pues es en base a los datos para casos raros y no es a toda la base datos.

Los mejores modelos pasan a la etapa siguiente.

3.1.5. Calibración y validación.

Los modelos multivariables se calibran con la base de datos completa de cada sector, en función de encontrar la probabilidad de corte recomendable que, por un lado, maximice la precisión y/o confiabilidad y, por otro lado, minimice el error en el PED, es decir, se busca un óptimo que compatibilice esas 2 variables.

Además a modo de validación se puede usar un modelo en un sector distinto que con el que fue creado.

3.1.6. Recomendaciones operacionales

Finalmente se entregan recomendaciones operacionales a modo de evitar o retrasar la entrada de dilución.

3.2. Conclusiones metodología

Dado impacto negativo que tiene la dilución en el negocio minero, se propone llevar a cabo una metodología que permite evaluar estrategias de extracción y dar recomendaciones operacionales con el fin de retrasar la entrada de la dilución. Para ello se construyen modelos multivariables de regresión logística, los cuales para su correcta elaboración deben cumplir una serie de etapas.

Lo fundamental resulta en definir en forma correcta la variable que se intenta predecir, en este caso la primera entrada de dilución (con dilución acumulada al 3%) antes de extraer toda la columna in-situ. Se escoge esta variable pues se desea estudiar la entrada temprana de dilución y que no afecte así al negocio minero.

Es importante que los modelos incluyan variables operacionales para generar recomendaciones a fin de tener planes de producción que permitan evitar la entrada temprana de dilución.

Capítulo 4

4.1. Estudio exploratorio de datos y construcción de variables independientes

Para poder realizar la regresión logística es importante hacer un análisis de los datos que se están estudiando, en específico de las variables que se quieren incluir en los modelos.

4.1.1. Alturas in-situ

Las alturas de columnas in-situ del sector ICE van desde los 21 [m] hasta los 638 [m], donde la mayoría de los puntos se sitúan entre los 100-200 [m], la desviación de las alturas es muy alta (figura 27). Las columnas de menor altura se encuentran en la parte oeste del sector (figura 26).

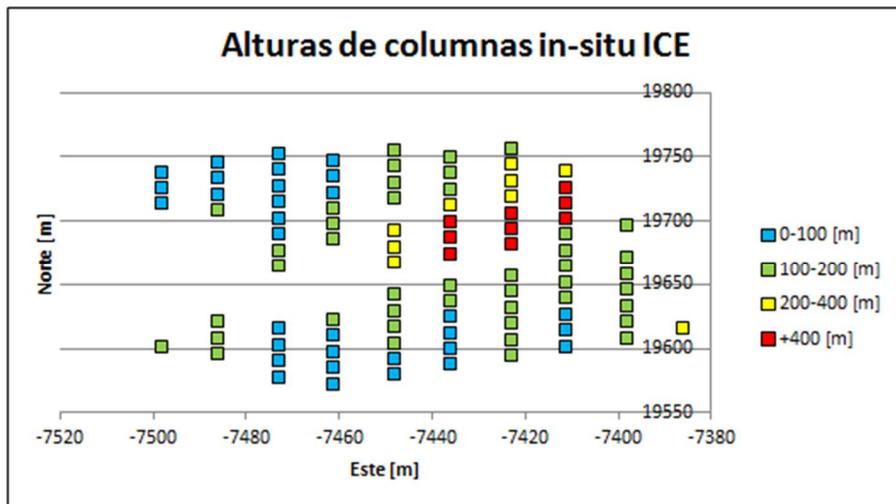


Figura 26: Alturas de columnas in-situ ICE

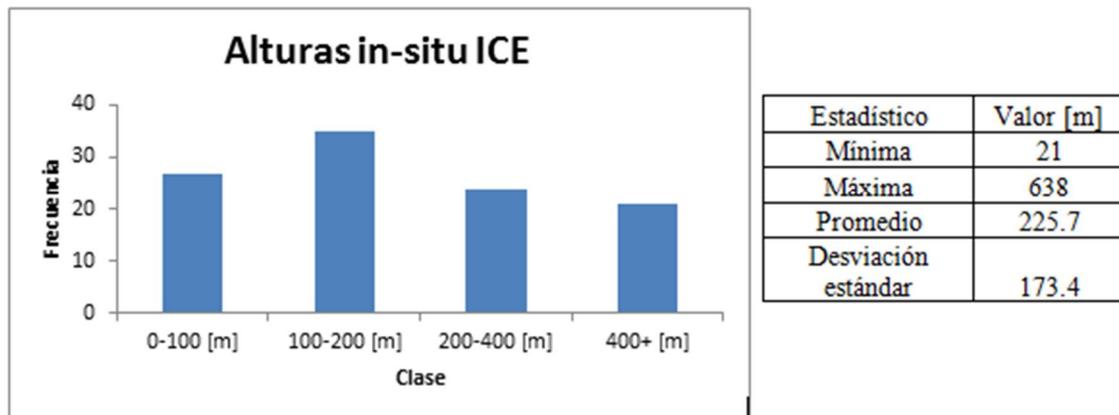


Figura 27: Histograma y estadísticas básicas, alturas de columnas in-situ ICE

Las alturas de columnas in-situ del sector ICW van desde los 18 [m] hasta los 635 [m], donde la gran mayoría de los puntos se sitúan entre los 100-200 [m] (figura 29). Las alturas menores se ubican en la parte sureste del sector (figura 28).

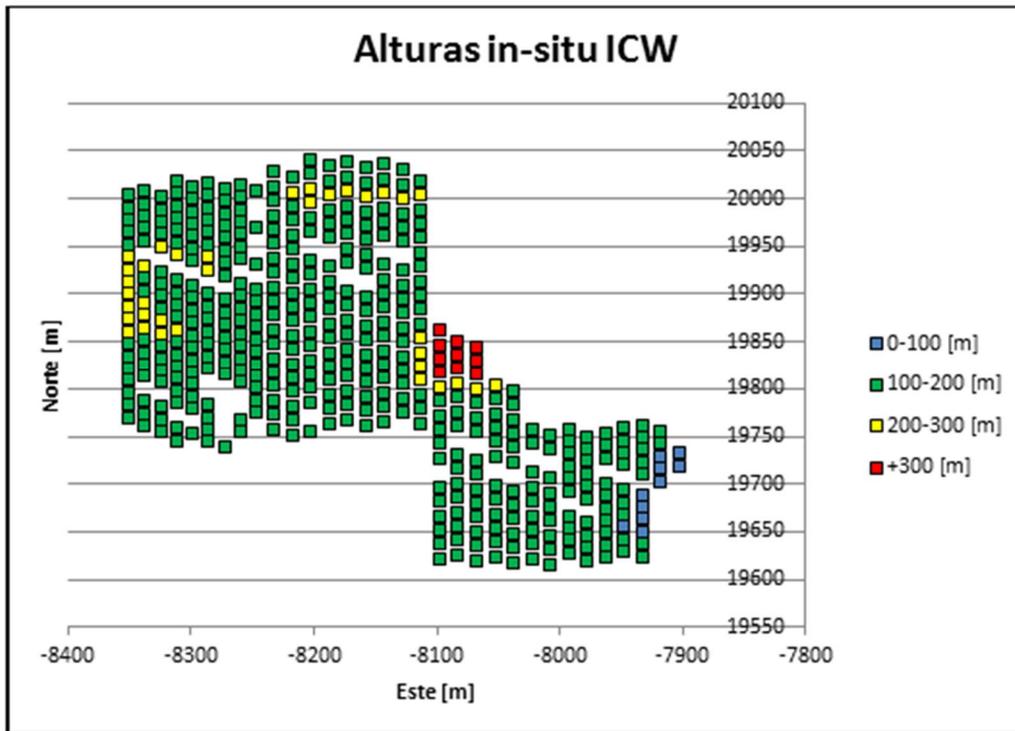


Figura 28: Alturas de columnas in-situ ICW

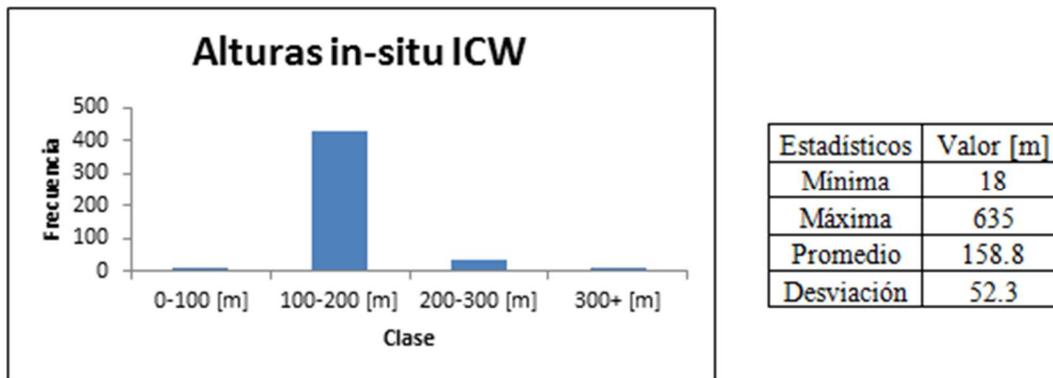


Figura 29: Histograma y estadísticas básicas, alturas de columnas in-situ ICW

Las alturas de columnas in-situ del sector IN van desde los 40 [m] hasta los 576 [m], donde la gran mayoría de los puntos se sitúan entre los 100-200 [m] (figura 31). Las mayores alturas se ubican en zona noreste del sector (figura 30).

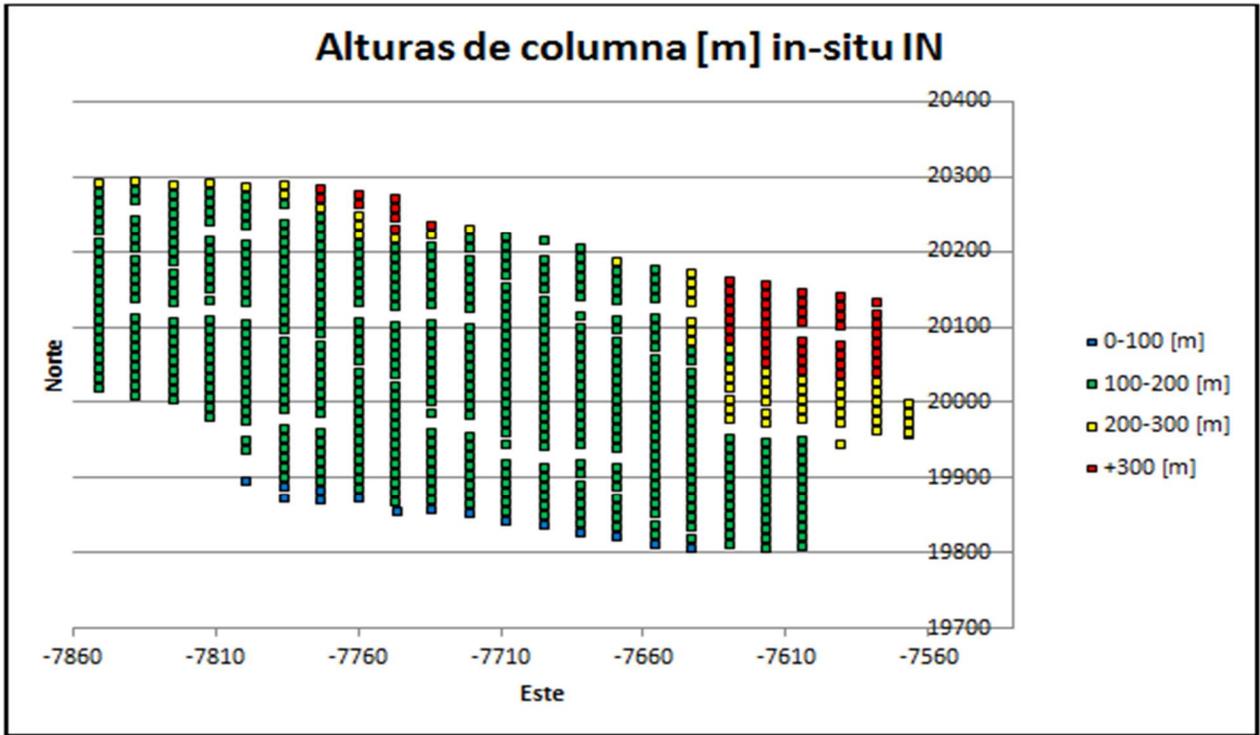
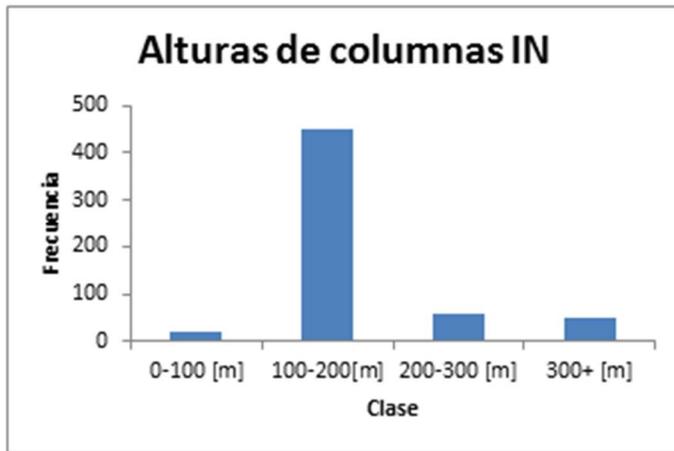


Figura 30: Alturas de columnas in-situ IN



Estadísticos	Valor [m]
Máximo	576
Mínimo	40
Promedio	181.4
Desviación estándar	85.7

Figura 31: Histograma y estadísticos básicos, alturas de columnas IN

Las alturas de columnas in-situ del sector IW van desde los 110 [m] hasta los 360 [m], donde la gran mayoría de los puntos se sitúan entre los 200-300 [m] (figura 33). Las alturas van disminuyendo cuando se avanza hacia el norte (figura 32).

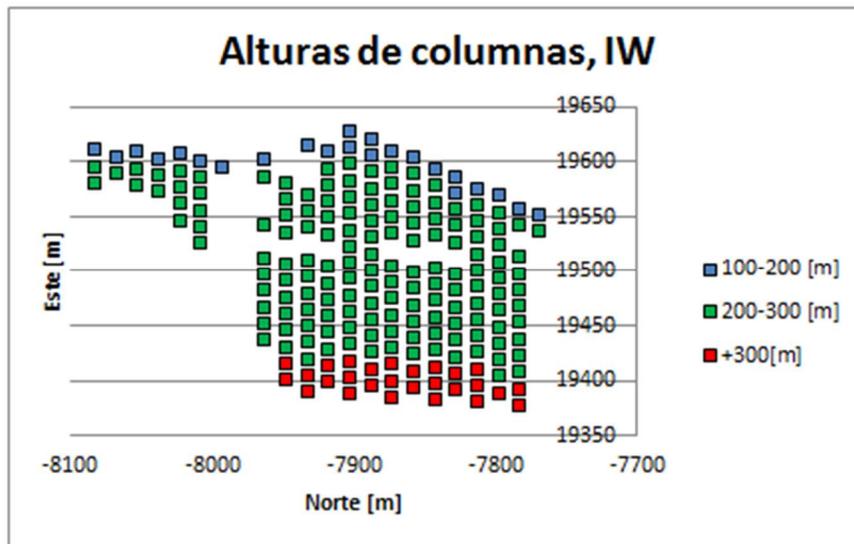


Figura 32: Alturas de columnas in-situ, IW

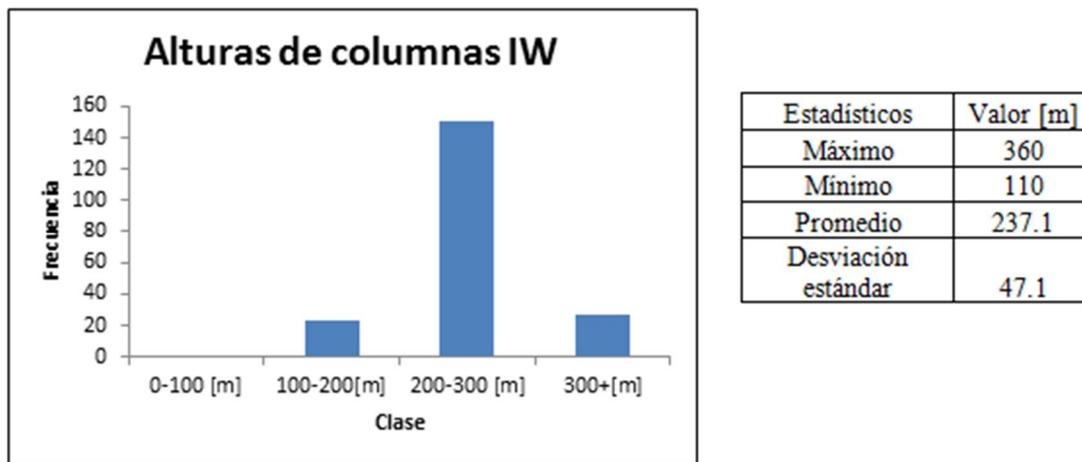


Figura 33: Histograma y estadísticos básicos, alturas de columnas IW

Luego se realiza un análisis del comportamiento del PED con respecto a las alturas de columnas in-situ, para los diferentes sectores de la mina. Esto sirve para verificar si la altura de columna in-situ tiene una incidencia en la entrada de dilución o en una entrada de dilución más temprana.

En la figura 34, se aprecia que la altura de columna in-situ tiene relación clara con el PED, es decir, que a medida que disminuye el PED hay menores alturas de columna in-situ. También, al analizar los puntos sin dilución se nota que éstos tienen una altura de columna in-situ mucho mayor al de los puntos con dilución.

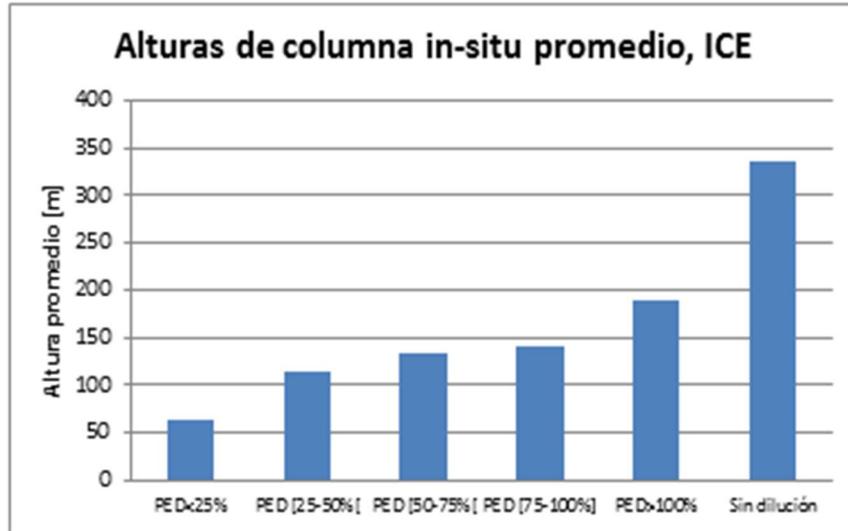


Figura 34: Alturas de columna in-situ respecto al PED, ICE

En el sector ICW (figura 35), se observa que no hay mayor diferencia en las alturas de columna in-situ de los puntos con dilución (cuando se divide por rangos de PED), pero si se ve una diferencia en la altura de columna in-situ de los puntos sin dilución con respecto a los puntos con dilución.

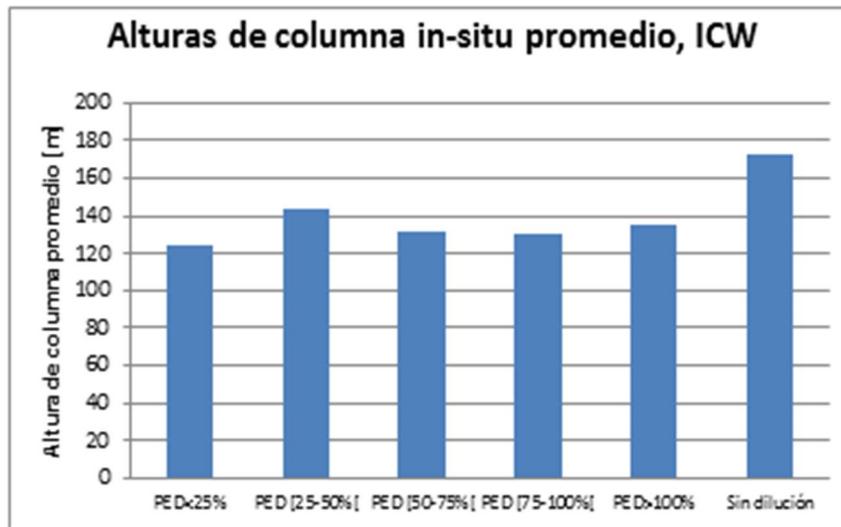


Figura 35: Alturas de columna in-situ respecto al PED, ICW

El sector IN (figura 36) es un caso similar al de ICW, es decir, no se aprecia mayor diferencia en la altura de columna in-situ promedio entre los puntos con dilución respecto al PED, pero si se ve una clara diferencia en la altura de columna in-situ promedio de los puntos sin dilución y los puntos con dilución.

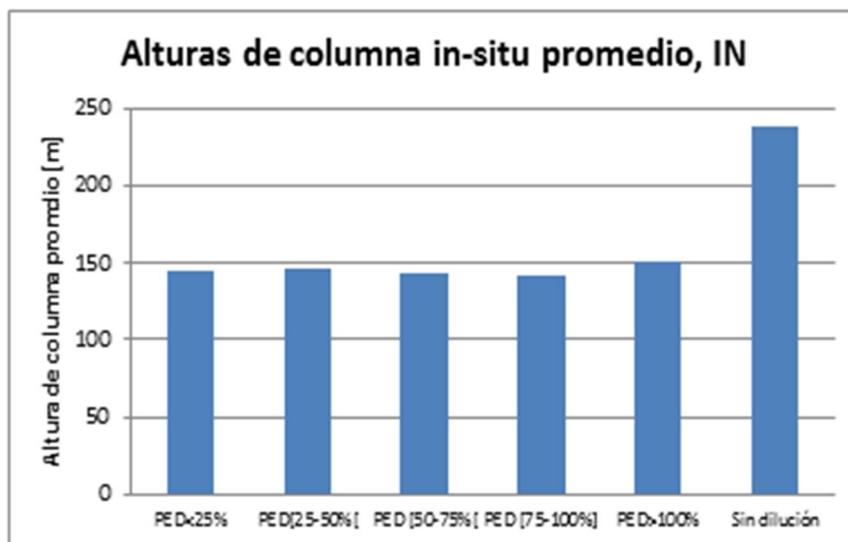


Figura 36: Alturas de columna in-situ promedio respecto al PED, IN

El sector IW (figura 37), es un caso un poco especial, pues la altura de columna in-situ promedio mayor se da para los puntos con PED < 25%, luego en los otros puntos con dilución se tiene una altura de columna in-situ promedio similar y menores a la altura de columna in-situ promedio de los puntos sin dilución.

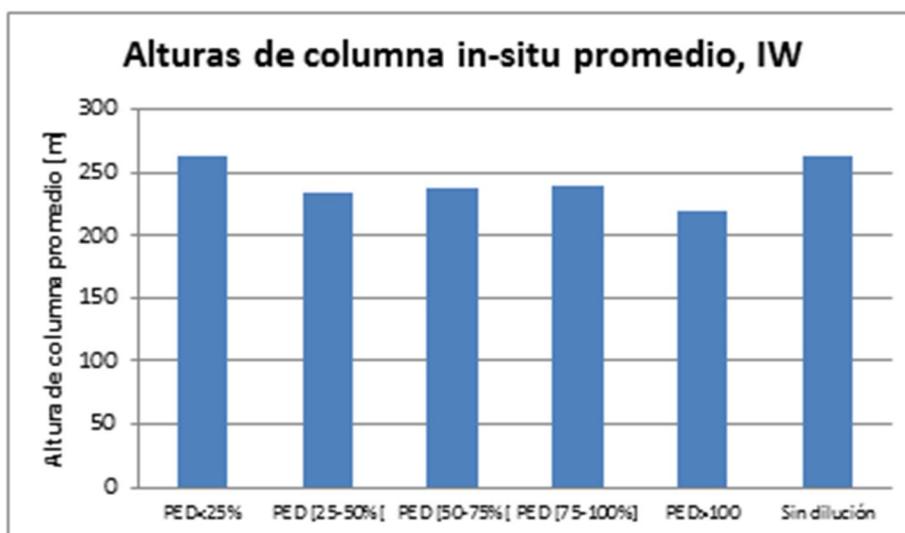


Figura 37: Alturas de columna in-situ promedio respecto al PED, IW

En conclusión, se aprecia claramente una diferencia entre la altura de columna in-situ promedio de los puntos con dilución con respecto a los puntos sin dilución. Sin embargo, no se observa una relación de la altura de columna in-situ promedio con el PED, a excepción del sector ICE.

4.1.2. Velocidad de extracción

Las velocidades de extracción son relativamente bajas (menos de 0.5 [ton/ (m²*día)]) y normalmente disminuyen en el tiempo debido al agotamiento de los sectores.

En el sector ICE se observa (figura 38) que rápidamente se aumenta la velocidad de extracción para alcanzar las máximas velocidades entre los años 2004 y 2005, y también se aprecia claramente que las velocidades disminuyen notablemente desde comienzos del año 2007 y se mantienen relativamente constantes el final de la medición.



Figura 38: Velocidad de extracción mensual, ICE

De forma similar al sector ICE, en el ICW también se alcanzan rápidamente las máximas velocidades de extracción, que se dan entre los años 2000-2004, luego a comienzos del año 2005 hay una disminución en las velocidades de extracción y se mantienen relativamente constantes hasta finales de la medición (figura 39).



Figura 39: Velocidad de extracción mensual, ICW

En IN, al comienzo de la extracción se extrae con velocidades muy altas (sobre 1[ton/(m²*día)], para luego disminuir a valores medios entre los años 1995-2000. Y finalmente desde el año 2000 se ve una disminución hasta llegar hasta valores bajísimos de velocidad al final de la medición (figura 40).



Figura 40: Velocidad de extracción mensual, IN

En IW, las velocidades tienen un comportamiento más volátil, pasando de período de velocidad bajas a altas y viceversa (figura 41).

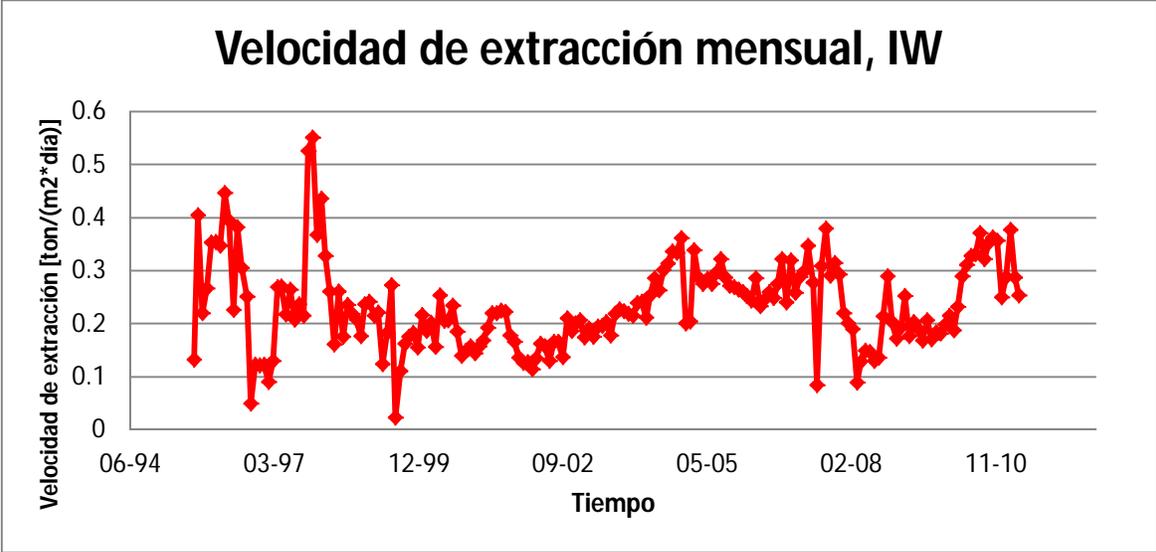


Figura 41: Velocidad de extracción mensual, IW

Como la velocidad mensual del sector no entrega una información clara de cómo se extrajo el punto de extracción, se calculan distintos tipos de velocidades según del sector donde se mide y del rango de tiempo que se ocupa, como se observa en la tabla 15. Esto da 18 combinaciones de velocidades de extracción.

Tabla 15: Tipos de velocidades calculadas

División velocidad	Lugar	Tiempo
Tipo de Velocidad [ton/(m ² *día)]	Velocidad promedio del punto	7 días
		30 días
	Velocidad promedio del cluster	3 meses
		6 meses
	Velocidad máxima del cluster promedio	9 meses
		1 año

Se define cluster como el punto de extracción y su vecindad geométrica, como se aprecia en la figura 42. Se hace este análisis del cluster, pues puede ser que explique de mejor forma la importancia de la variable.

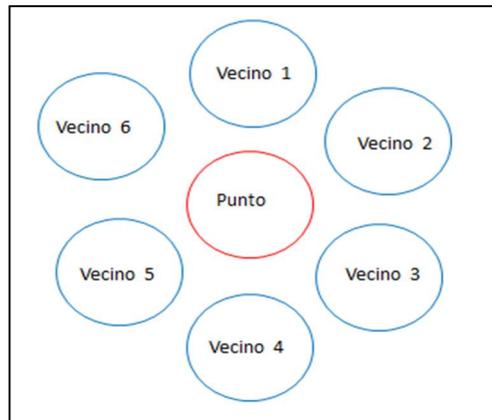


Figura 42: Definición cluster

Se hace un análisis del comportamiento de la velocidad (antes de la entrada de la dilución) con respecto al PED para cada sector y para los puntos sin dilución antes de la extracción del 100% de la columna in-situ o antes de su última extracción.

En el sector ICE, la velocidad de los puntos sin dilución es menor a los puntos con dilución como se observa en las figuras 43, 44 y 45 (corto, mediano y largo plazo). Además, entre los punto con dilución cuando el PED aumenta también hay un aumento en la velocidad, esto se nota en especial en el mediano y largo plazo (figuras 44 y 45), es decir, que para las entradas de dilución más tempranas existen menores velocidades de extracción. Comparando el análisis del punto con el del cluster no se aprecian mayores diferencias.

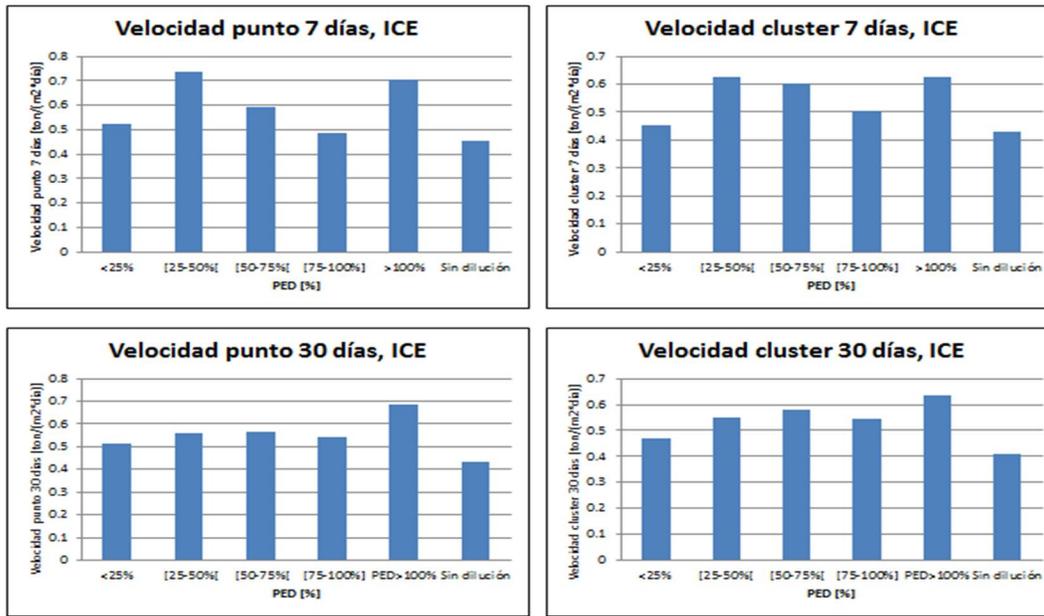


Figura 43: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), ICE

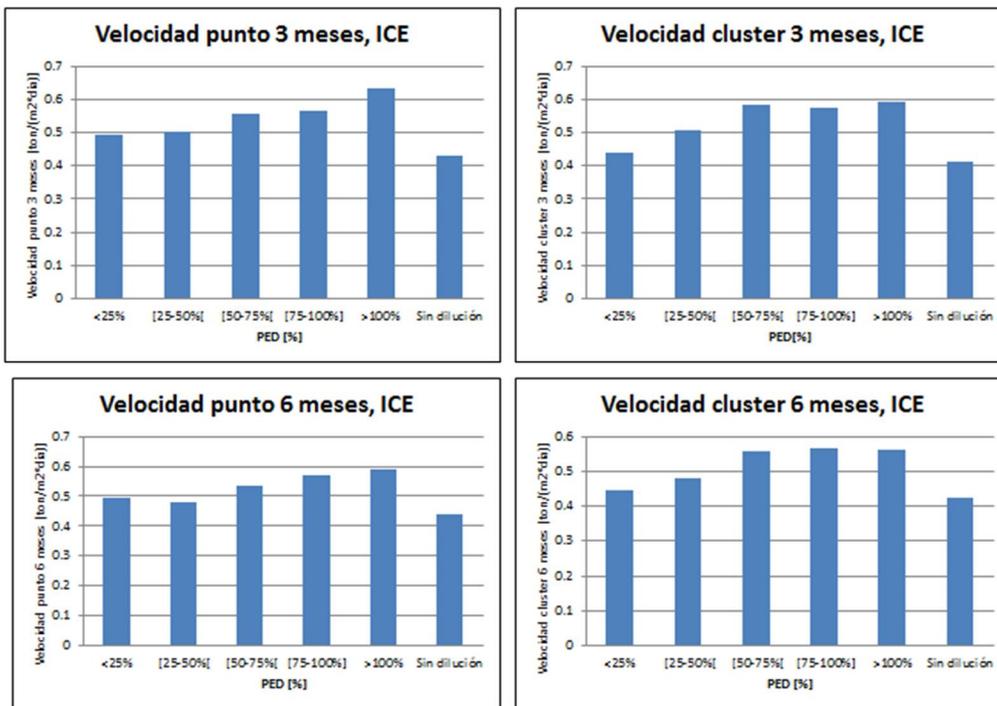


Figura 44: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), ICE

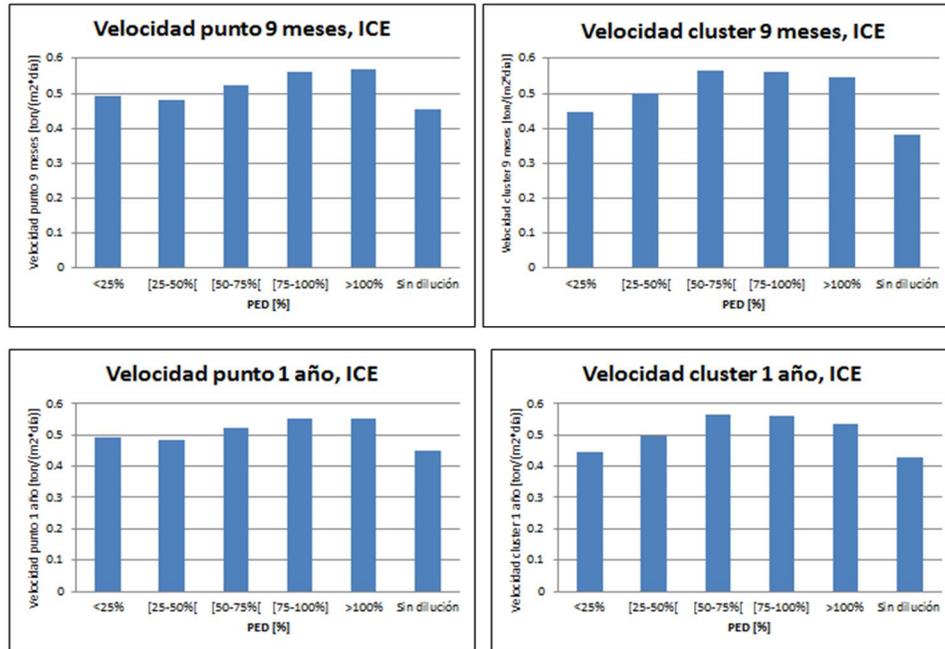


Figura 45: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), ICE

En el sector ICW, la velocidad de los puntos sin dilución es menor a los puntos con dilución como se observa en las figuras 46, 47 y 48. Al contrario del sector ICE, en este caso entre más temprana es la entrada de la dilución más alta es la velocidad de extracción, en especial para el PED <25% y para el análisis de la velocidad del cluster, lo anterior se da en el mediano y largo plazo (figuras 47 y 48).

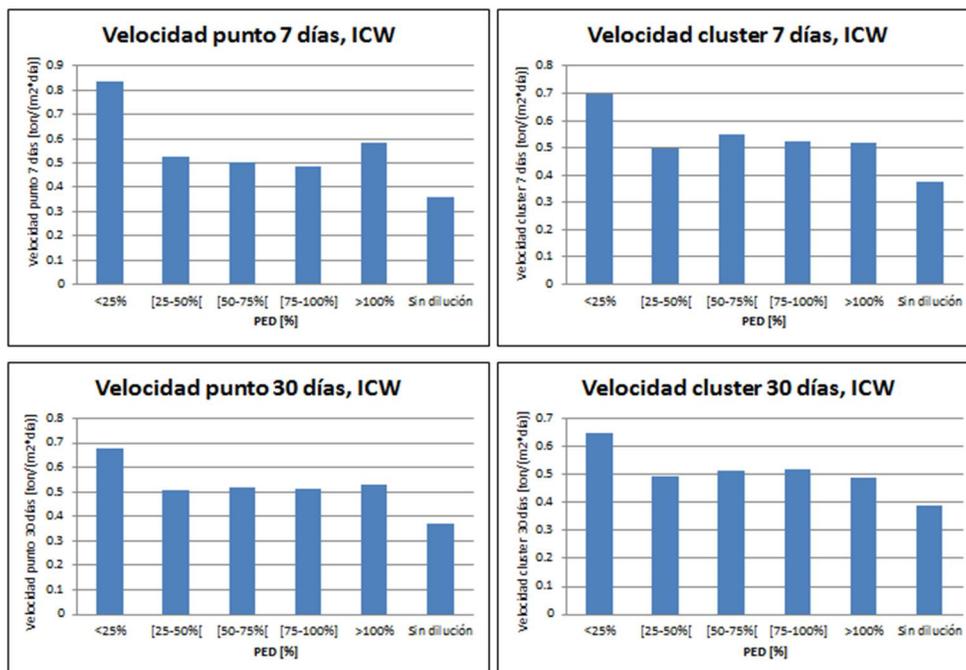


Figura 46: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), ICW

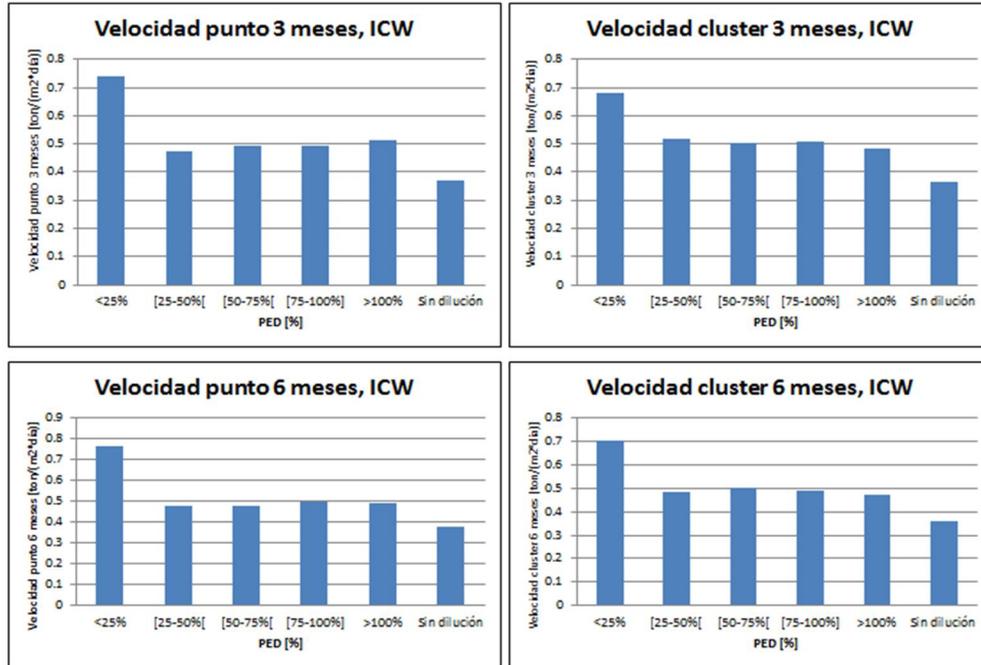


Figura 47: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), ICW

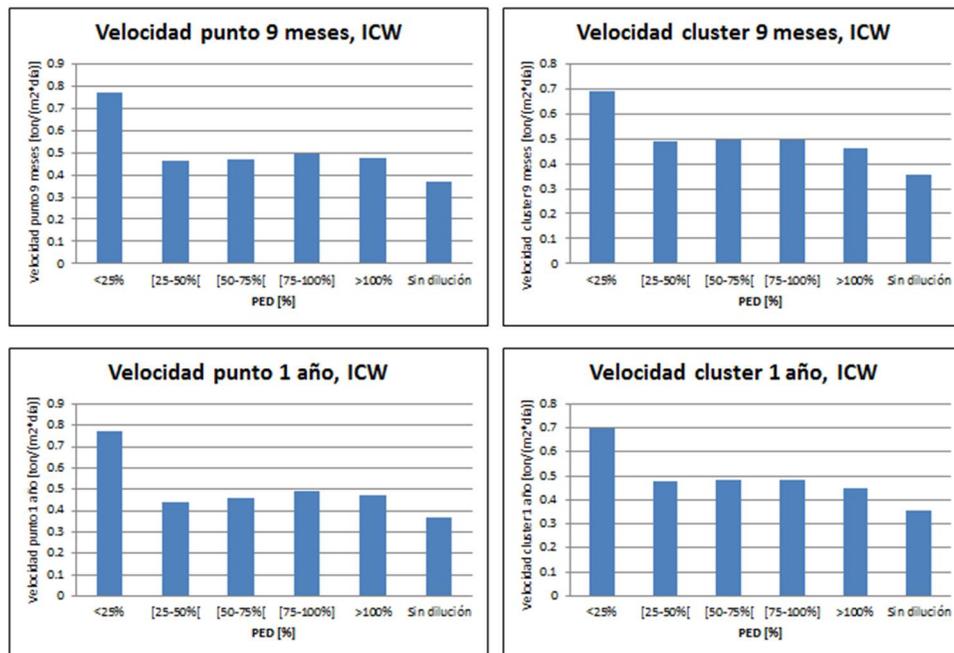


Figura 48: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), ICW

En el sector IN, la velocidad de los puntos sin dilución es menor a los puntos con dilución como se observa en las figuras 49, 50 y 51. Además, entre más temprana es la entrada de la dilución mayor es la velocidad de extracción, esto se ve con más claridad en el corto y mediano plazo (figuras 49 y 50). No hay mayor diferencia entre el análisis del punto o del cluster.

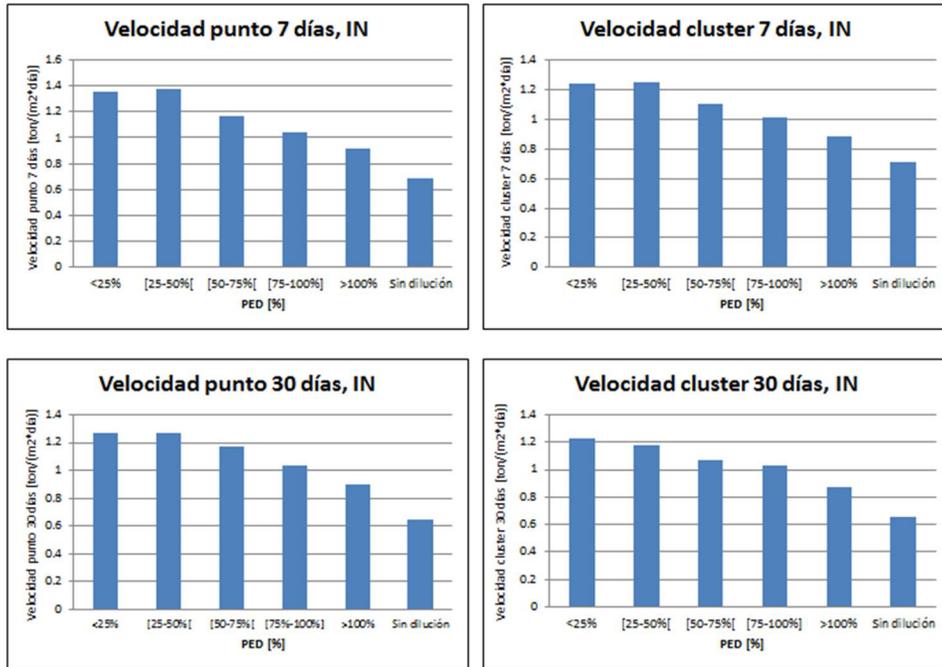


Figura 49: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), IN

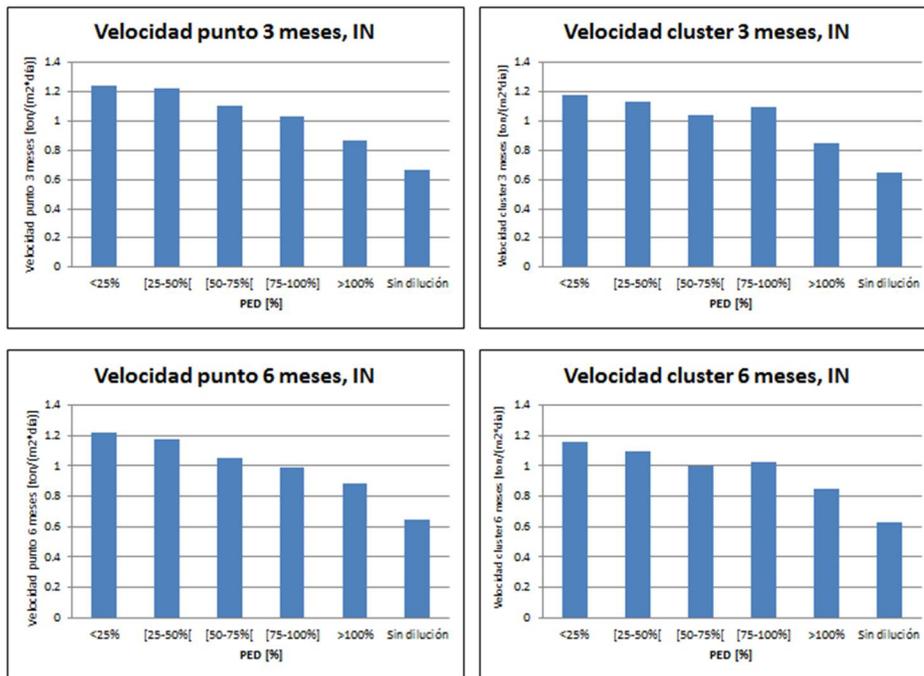


Figura 50: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), IN

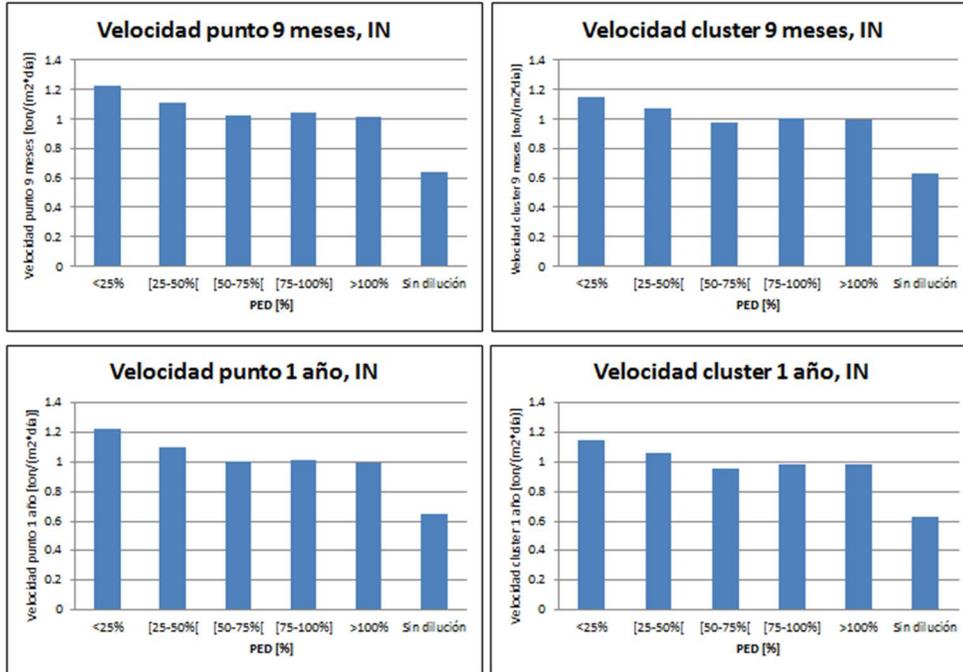


Figura 51: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), IN

En el sector IW, sólo en el corto plazo se puede ver una menor velocidad de los puntos sin dilución (figura 52), en especial para la velocidad del punto en 7 días. En el mediano plazo y largo plazo, la velocidad de los puntos con dilución es menor a los de los puntos sin dilución, para los casos del punto y del cluster, como se observa en las figuras 53 y 54.

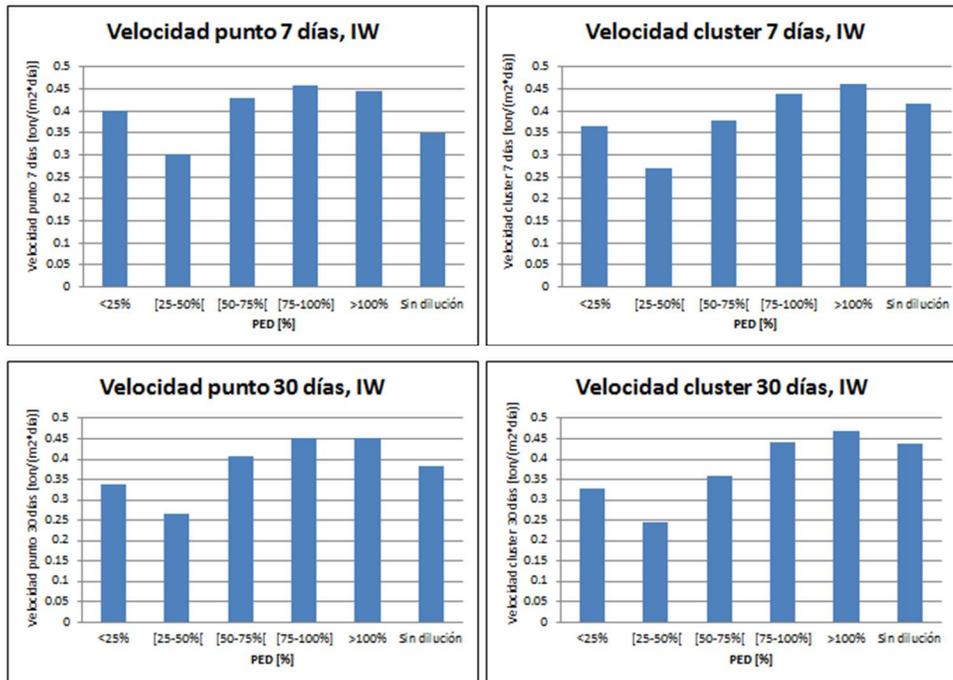


Figura 52: Velocidad de extracción vs PED (corto plazo), IW

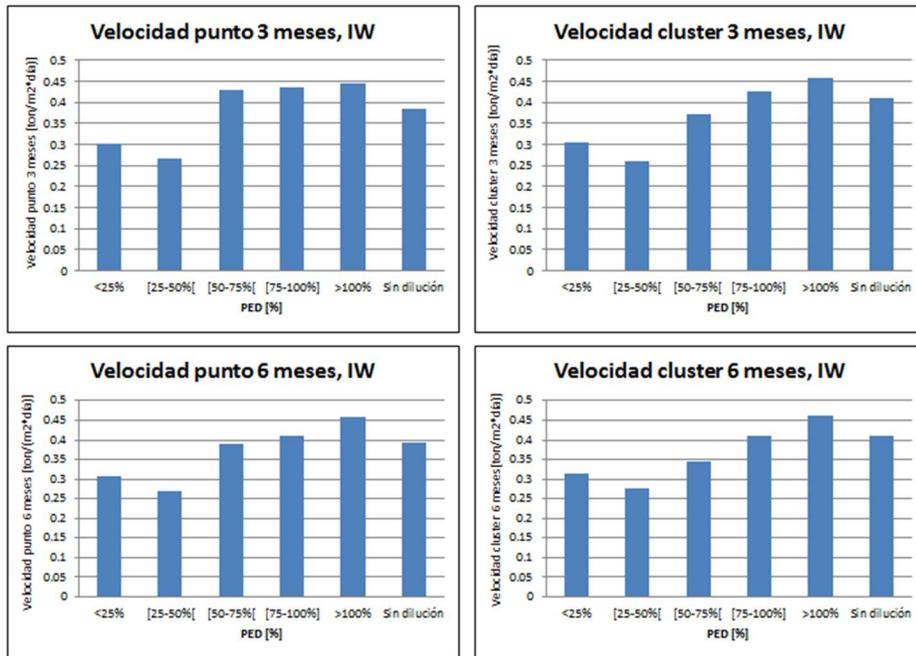


Figura 53: Velocidad de extracción vs PED (mediano plazo), IW

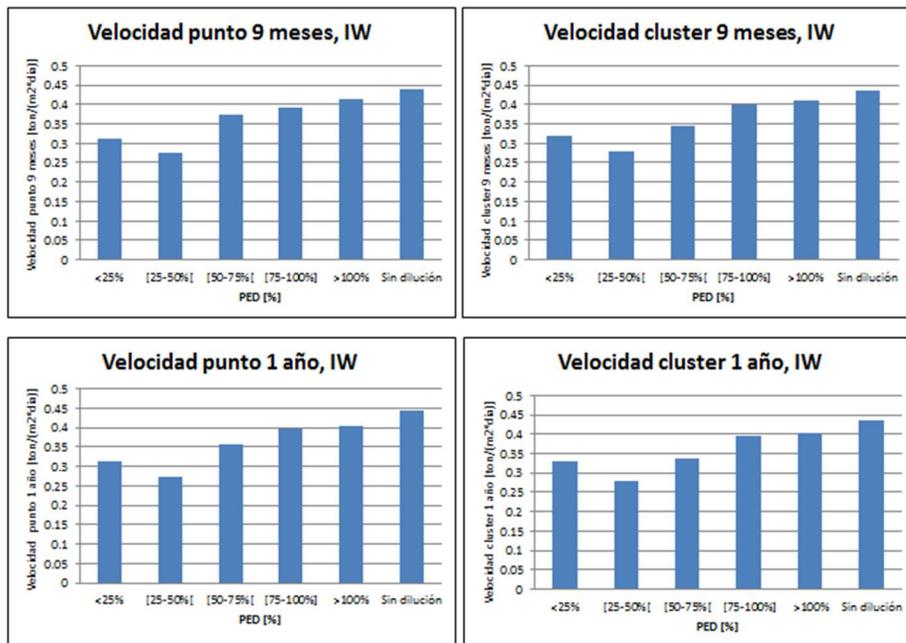


Figura 54: Velocidad de extracción vs PED (largo plazo), IW

En general se puede ver que existe una relación entre la velocidad de extracción y la dilución, pues en general los puntos con dilución tienen velocidades mayores a los puntos sin dilución. Además en sectores como ICW e IN, se aprecia una relación entre el PED y la velocidad, pues a menor PED (dilución más temprana) hay una mayor velocidad de extracción.

4.1.3. Uniformidad del tiraje (índice de Susaeta modificado)

Para calcular la uniformidad del tiraje se ha decidido utilizar el índice de Susaeta, porque es la medida de uniformidad del tiraje más utilizada y que ha demostrado mejor comportamiento a escala mina, pero, modificado de tal forma que sólo tome 2 valores: uniforme y aislado, pues así será más fácil de utilizar a escala operacional. Para ello se divide la uniformidad en 3 posibles matrices donde se va “bajando” la uniformidad en la diagonal, como se puede ver en la figura 55. La uniformidad se calcula todos los días, es decir, todos los días se analiza si se extrae uniformemente, pues según lo propuesto por Castillo (2009), es la mejor forma de calcular la uniformidad.

Índice de uniformidad		Índice de Uniformidad Específico				
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Números de puntos inactivos en la vecindad	0	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado
	1	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado
	2	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	3	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	4	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

Índice de uniformidad 1		Índice de Uniformidad Específico				
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Números de puntos inactivos en la vecindad	0	Unif.	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado
	1	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado
	2	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado
	3	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	4	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

Índice de uniformidad 2		Índice de Uniformidad Específico				
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Números de puntos inactivos en la vecindad	0	Unif.	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado
	1	Unif.	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado
	2	Unif.	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado
	3	Unif.	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado
	4	Unif.	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	5	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado
	6	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado	Aislado

Figura 55: Matrices de uniformidad de Susaeta modificadas

De forma similar al tratamiento que se le hace con la velocidad, para la uniformidad también se trabaja con distinción entre el lugar, la escala temporal en la cual se calcula la uniformidad y la matriz de uniformidad que se utiliza. Se hace esta división en la uniformidad para poder analizar de buena manera cuál es la mejor “uniformidad” que explica la entrada de dilución. La uniformidad a distintas escala de tiempo se calcula como total de toneladas extraídas uniformemente en ese período y en ese lugar dividido por el total de toneladas extraídas en ese período y en ese lugar.

Tabla 16: Tipos de uniformidades calculadas

División Uniformidad	Lugar	Matriz	Tiempo
Tipo de Uniformidad [% toneladas extraídas uniformemente]	Punto	Uniformidad	7 días
			30 días
	Cluster	Uniformidad.1	3 meses
			6 meses
		Uniformidad.2	9 meses
			1 año

Esto da un total de 36 combinaciones de uniformidad.

Para hacer un análisis preliminar, primero se calcula la uniformidad que tienen los puntos de extracción para toda su vida útil (al igual a lo hecho por Susaeta (2004)), teniendo como referencia la primera matriz de uniformidad antes mencionada. En la tabla 17, se observa cantidad de puntos que hay en función del % toneladas extraídas uniformemente, se aprecia que el sector ICE es donde mayor uniformidad existe, en cambio, en el sector IW es donde se extrajo con menor uniformidad. Tomando en cuenta toda la mina, la mayoría no supera el 50% de extracción de manera uniforme (figura 56). En anexos se puede observar la uniformidad de los puntos de extracción en planta y las distribuciones de la uniformidad para cada sector.

Tabla 17: Uniformidad de los sectores El Salvador

Sector	0-25%	25-50%	50-75%	75-100%
ICE	13	34	39	21
ICW	187	262	31	2
IN	354	194	28	3
IW	190	5	3	3
Total	744	495	101	29

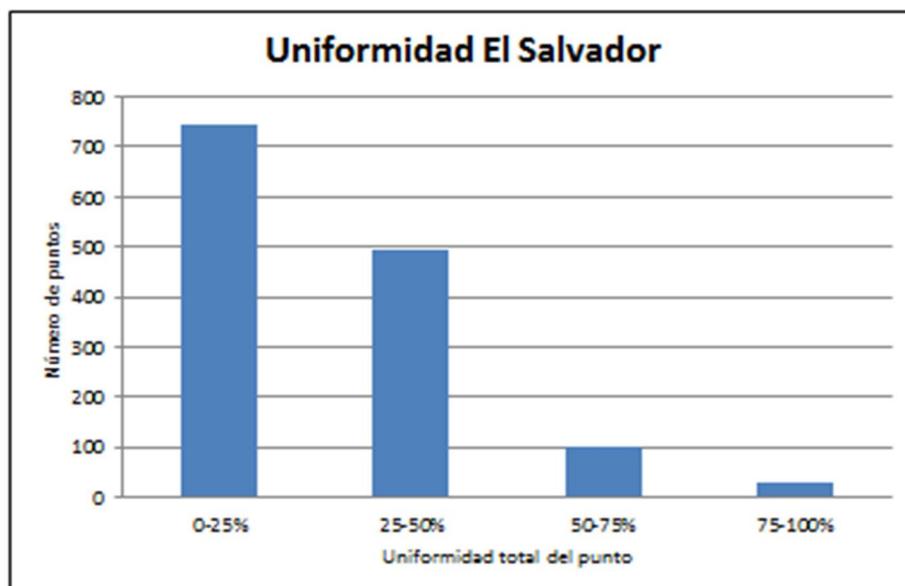


Figura 56: Uniformidad Mina El Salvador

Dentro del análisis de esta variable, se realiza un estudio de la relación que existe entre la uniformidad (por punto o por cluster; con diferentes matrices de uniformidad y a distintas escalas temporales) y la entrada temprana de la dilución (para $PED < 80\%$ y $PED < 50\%$). A continuación se muestran las mejores relaciones (por R^2) que existen para los diferentes sectores (figuras 57, 58, 59 y 60).

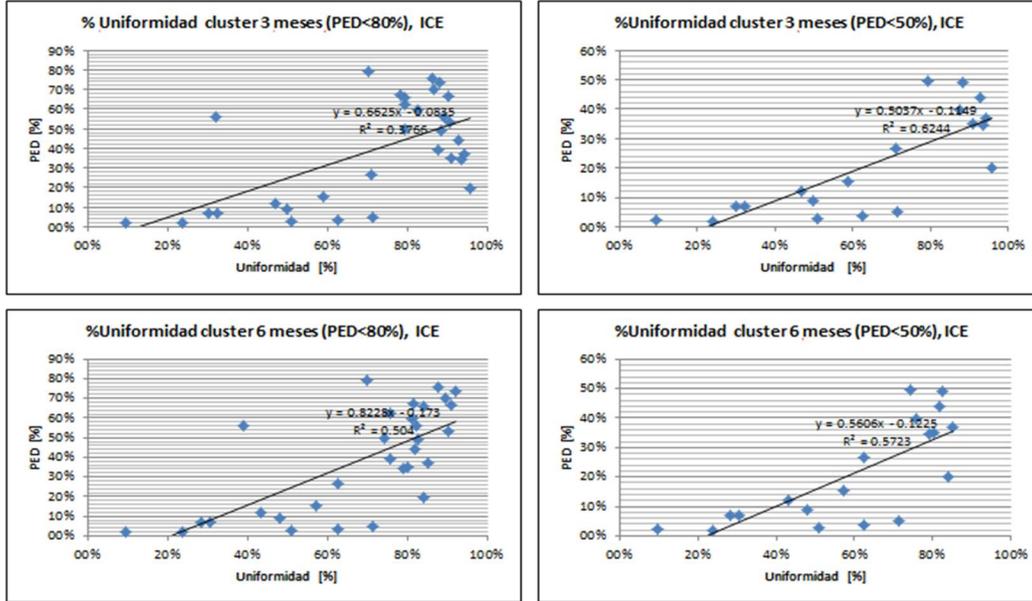


Figura 57: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, ICE

En el sector ICE, las mejores relaciones entre el PED y la uniformidad del tiraje, se dan para los rangos temporales de 3-6 meses usando la uniformidad del cluster (ver figura 57), donde los R^2 mayores se dan en el caso del PED<80% es para la uniformidad del cluster a los 6 meses ($R^2=0.50$) y para la el caso del PED<50% es la uniformidad del cluster a los 3 meses ($R^2=0.63$).

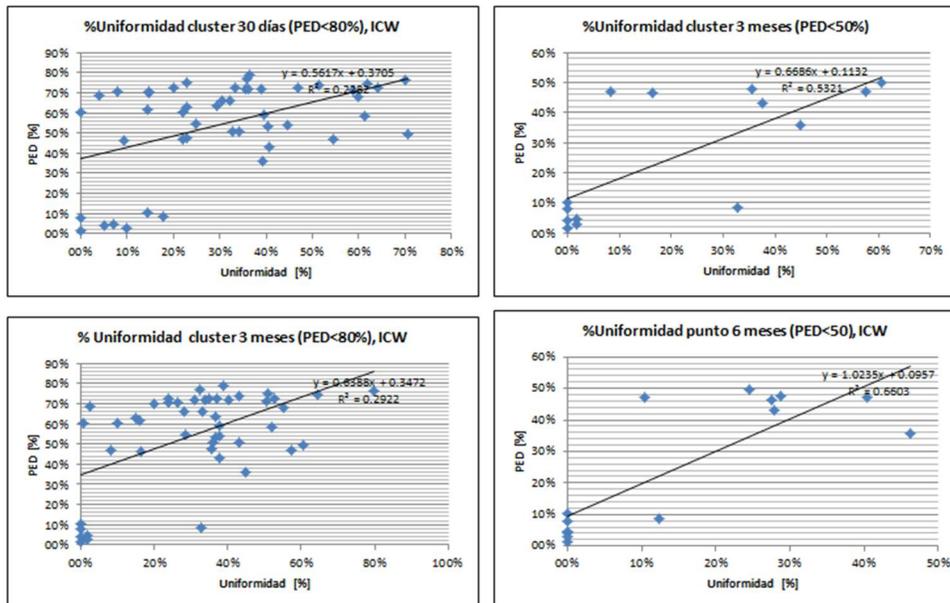


Figura 58: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, ICW

En el caso del sector ICW, los R^2 mayores se dan en el caso del PED<80% es para la uniformidad del cluster a los 30 días ($R^2=0.29$) y para la el caso del PED<50% es la uniformidad del punto a los 3 meses ($R^2=0.66$), como se aprecia en la figura 58.

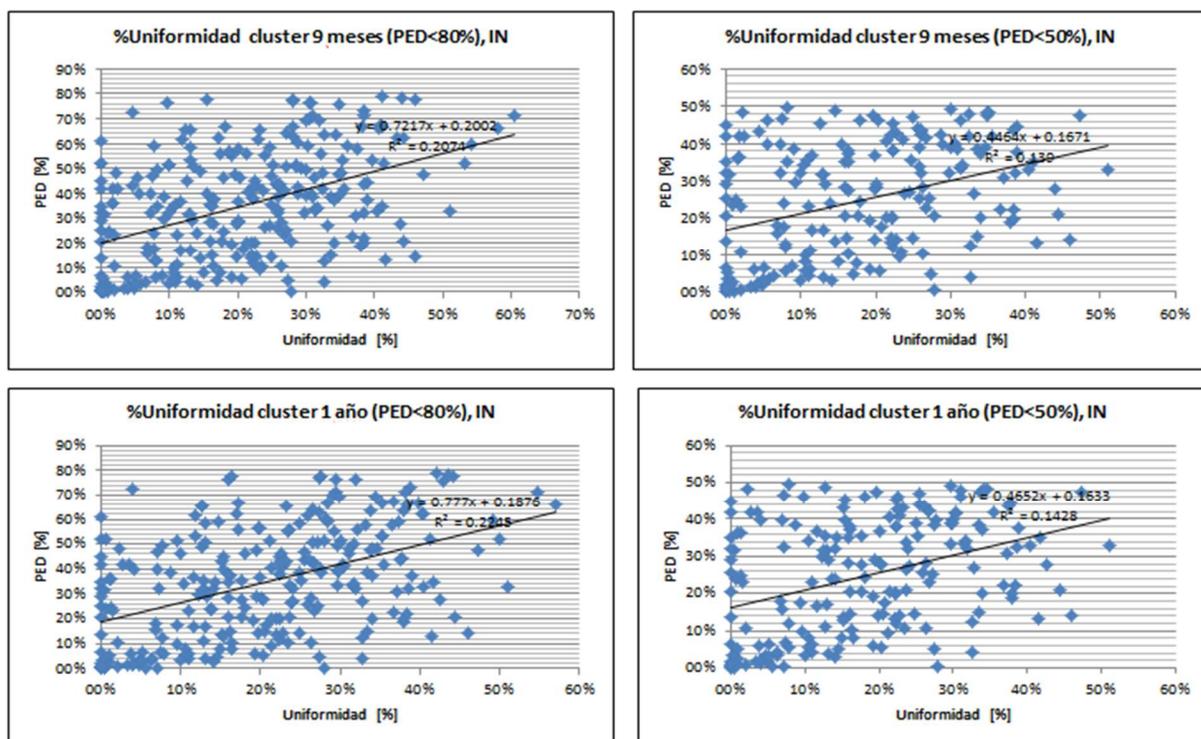


Figura 59: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, IN

En el caso del sector IN, los R^2 mayores se dan en el caso del PED<80% es para la uniformidad del cluster a 1 año ($R^2=0.22$) y para la el caso del PED<50% es la uniformidad del cluster a 1 año ($R^2=0.14$). Para este sector se puede notar que las relaciones entre el PED y la uniformidad son muy bajas, y por ende, no se pueden relacionar linealmente (figura 59).

En el caso del sector IW, la relación entre el PED y la uniformidad es nula, porque la mayoría de las uniformidades antes de la entrada de dilución es 0% uniforme. Esto se observa para todos los rangos temporales usados, para la uniformidad del punto y del cluster y para todas las matrices utilizadas. Algunos ejemplos de esto se ven en la Figura 60.

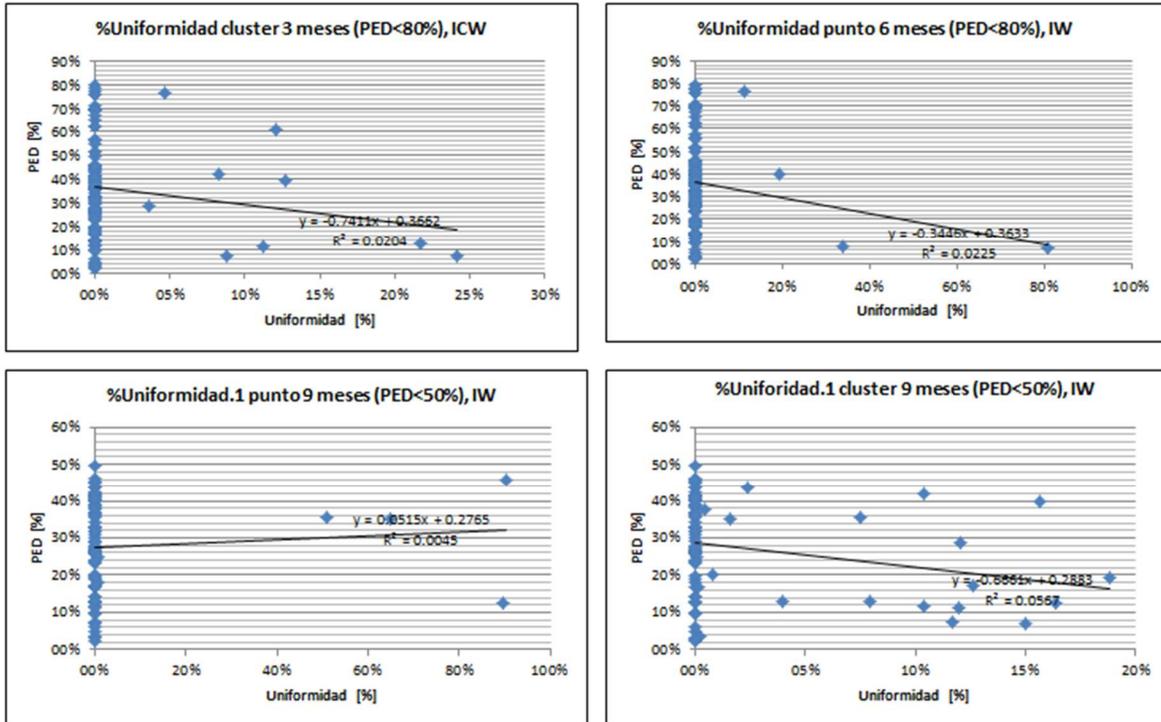


Figura 60: Mejores relaciones PED vs Uniformidad, IW

Las mejores relaciones entre el PED y la uniformidad, se dan en los sectores ICE e ICW para rangos de tiempos entre 3-6 meses, aunque los R^2 no superan los 0.66. Además en los sectores IN e IW no existe una relación lineal entre la uniformidad y el PED. Como conclusión no se puede utilizar solamente la uniformidad para determinar el PED, pero lo que si se va a hacer es ver la influencia que tiene la uniformidad en la entrada de dilución a un punto de extracción mediante la regresión logística para casos raros.

Otro análisis que se puede realizar es uno similar al realizado para la velocidad, es decir, ver el comportamiento que tiene la uniformidad antes de la entrada de la dilución con respecto al PED y con respecto a los puntos sin dilución ver la uniformidad antes de la extracción del 100% de la columna o antes de su última extracción.

En el sector ICE, la uniformidad de los puntos con dilución es mayor que la de los puntos sin dilución para todos los rangos temporales, como se observan en las figuras 61, 62 y 63. Además se aprecia que en el mediano y largo plazo entre más uniforme más se retrasa la entrada de dilución (figuras 62 y 63).

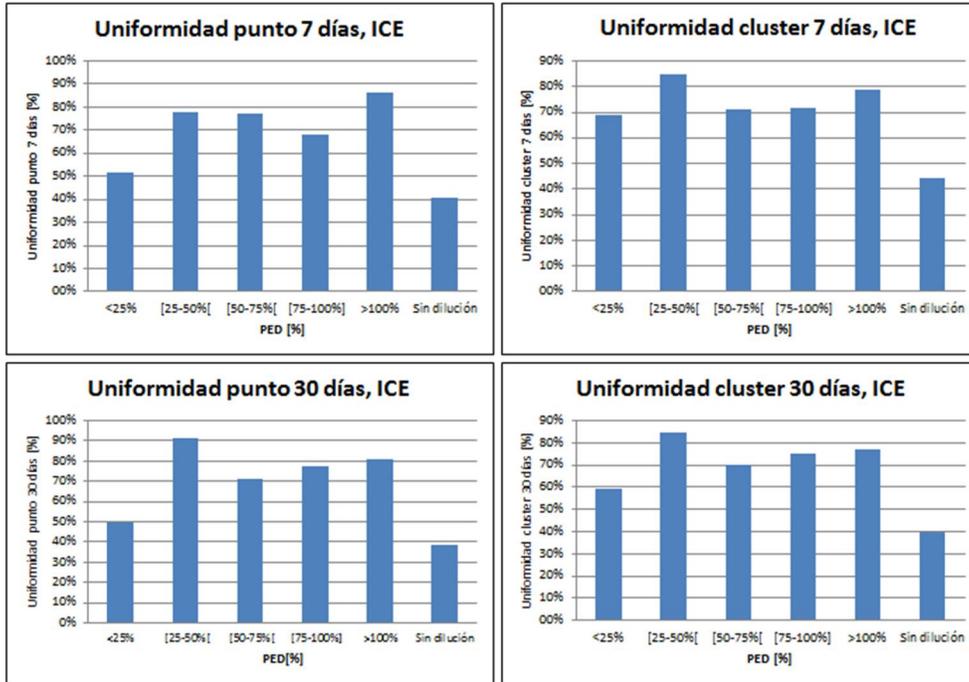


Figura 61: Uniformidad vs PED (corto plazo), ICE

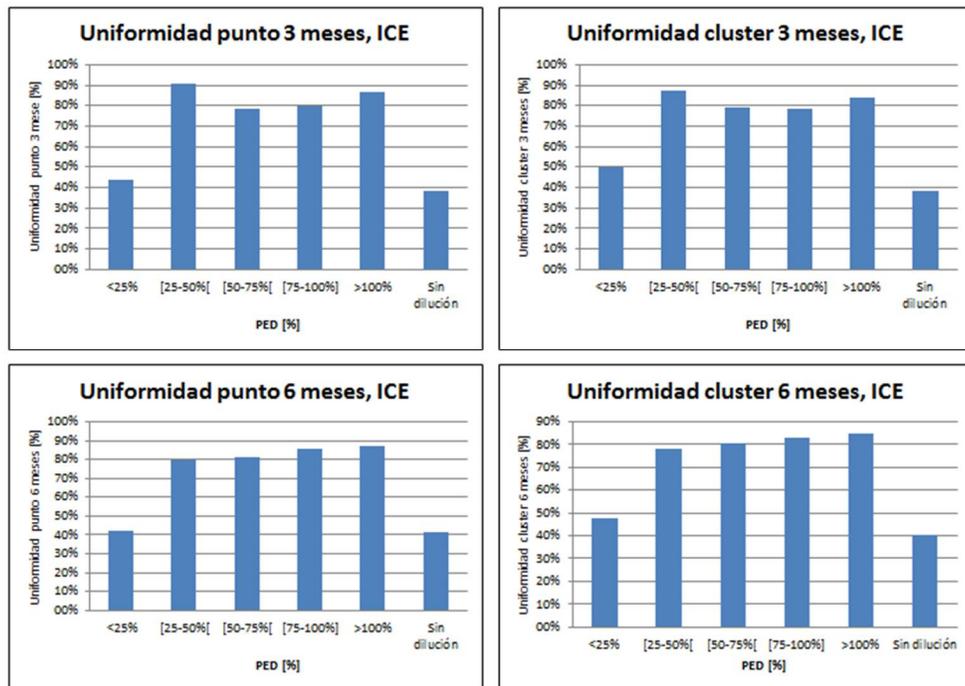


Figura 62: Uniformidad vs PED (mediano plazo), ICE

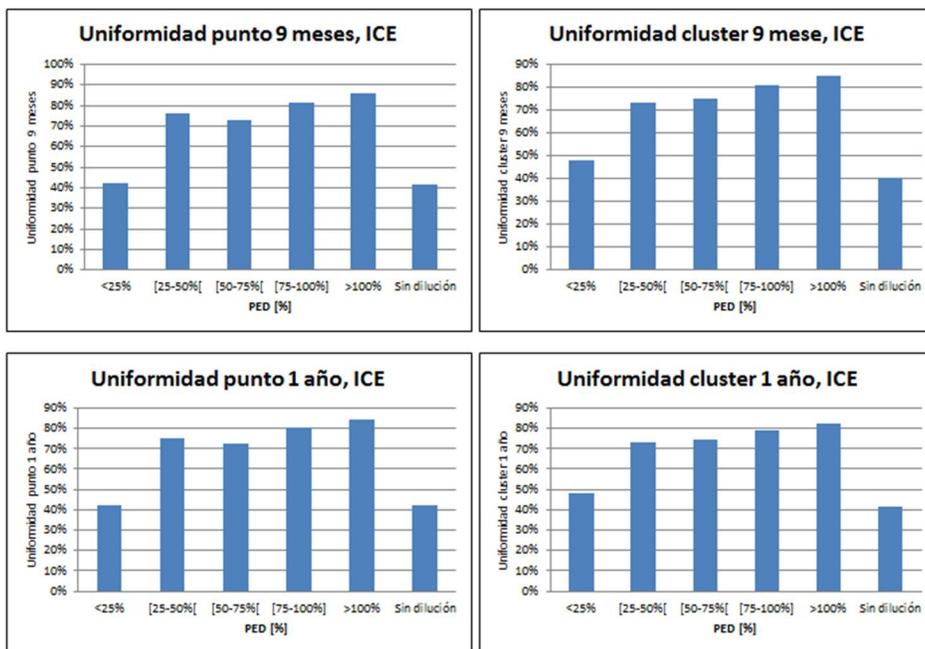


Figura 63: Uniformidad vs PED (largo plazo), ICE

En el sector ICW, existe una cierta relación entre el PED y % uniformidad, pues a mayor PED hay mayor uniformidad, esto se da con más claridad en el corto plazo, como se observa en la figura 64, no se da esta relación en el mediano y largo (figuras 65 y 66). Los puntos sin dilución tienen una uniformidad promedio mayor al de los puntos con dilución en el corto plazo, y en el mediano y largo plazo las uniformidad son muy similares.

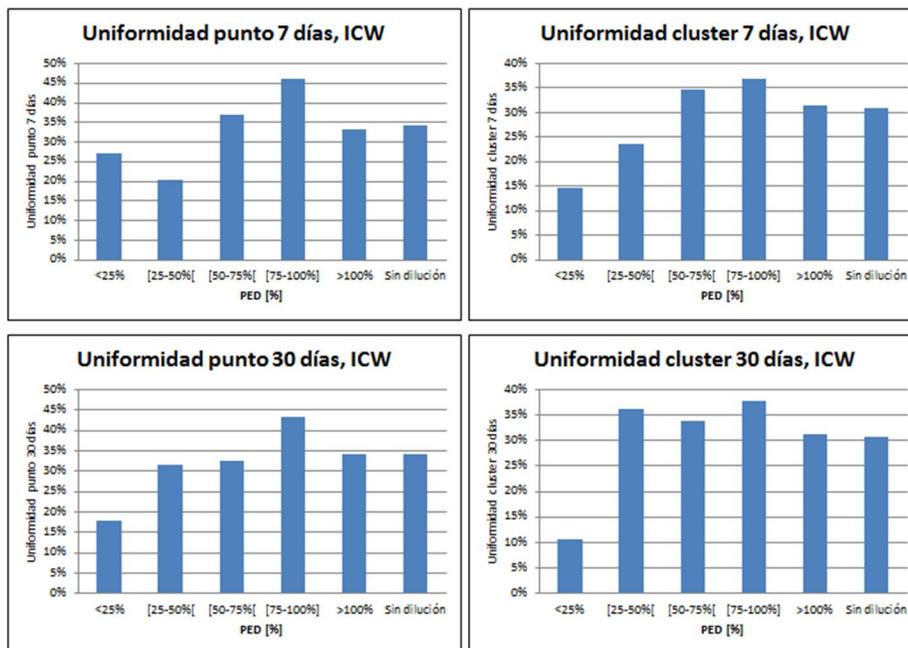


Figura 64: Uniformidad vs PED (corto plazo), ICW

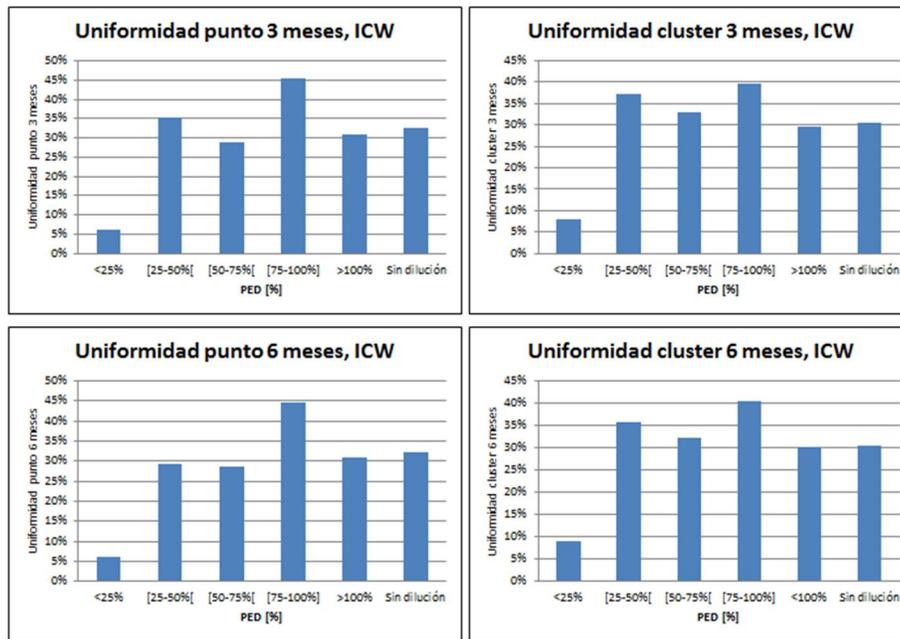


Figura 65: Uniformidad vs PED (mediano plazo), ICW

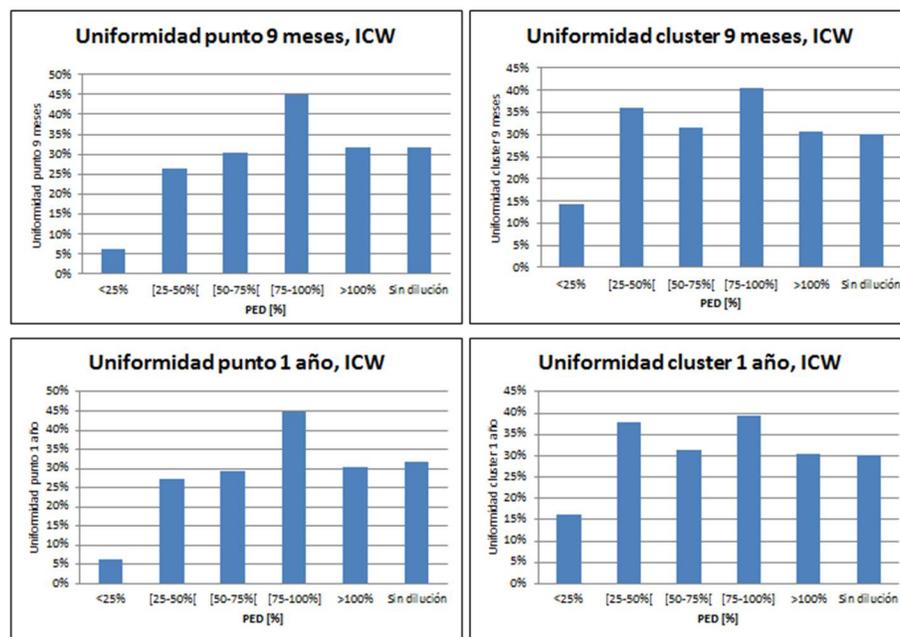


Figura 66: Uniformidad vs PED (largo plazo), ICW

En el sector IN, la uniformidad de los puntos sin dilución es similar al promedio de los puntos con dilución. En relación a los puntos con dilución, cuando más temprana es la entrada de la dilución menor es la uniformidad con la que se extrajo (esto se aplica de mejor forma en el análisis del cluster que en el del punto), para los casos del corto, mediano y largo plazo (figuras 67, 68 y 69).

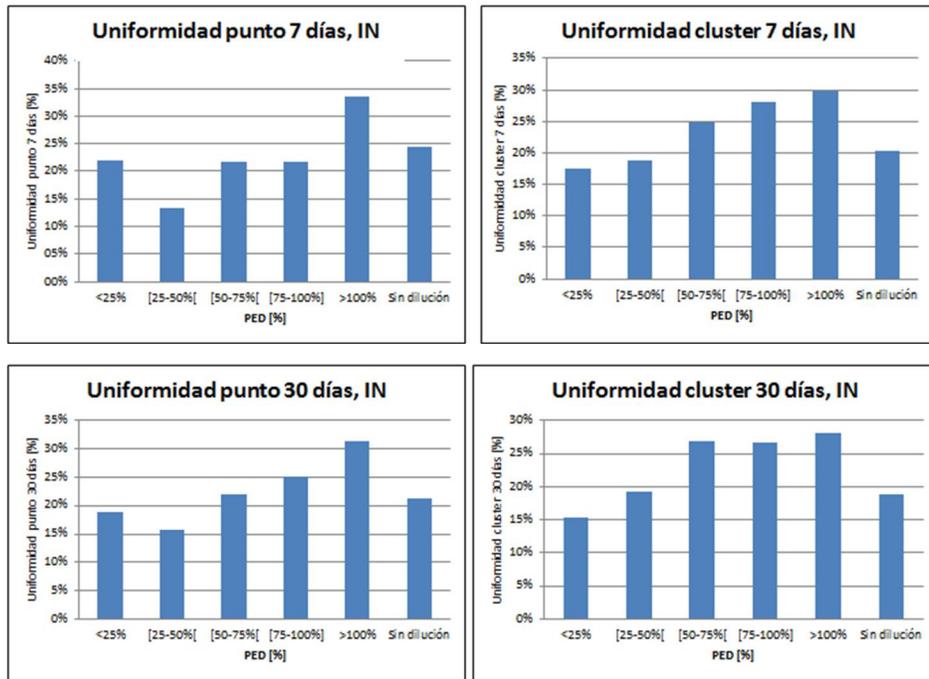


Figura 67: Uniformidad vs PED (corto plazo), IN

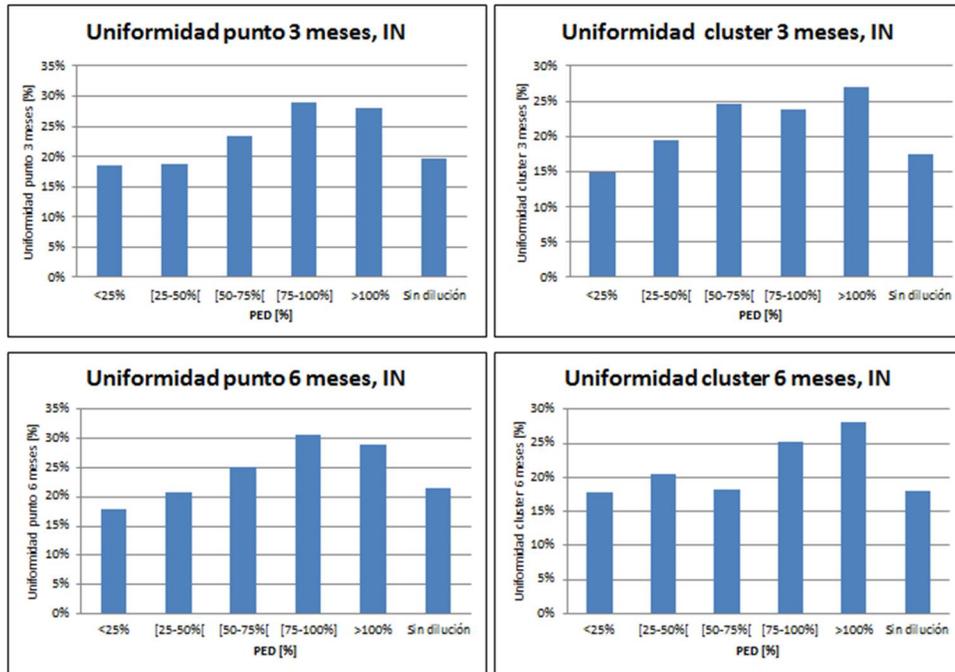


Figura 68: Uniformidad vs PED (mediano plazo), IN

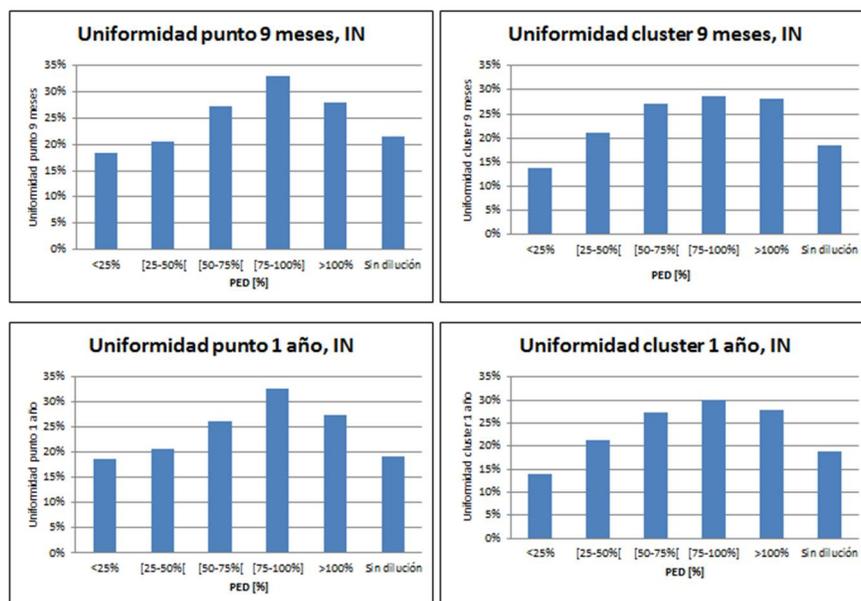


Figura 69: Uniformidad vs PED (largo plazo), IN

En el sector IW, la uniformidad es muy baja en general en todos los puntos (tabla 17), es por ende, que se hace un análisis de la uniformidad ocupando la matriz menos exigente de las anteriormente propuestas (figura 55). Se observa en las figuras 70, 71 y 72 que en los puntos sin dilución, la uniformidad es mayor que la de los puntos sin dilución, aun así la dilución es muy baja. No se logra apreciar una tendencia clara entre el PED y el % uniformidad ni el corto (figura 70), ni en el mediano (figura 71) ni tampoco en el largo plazo (figura 72).

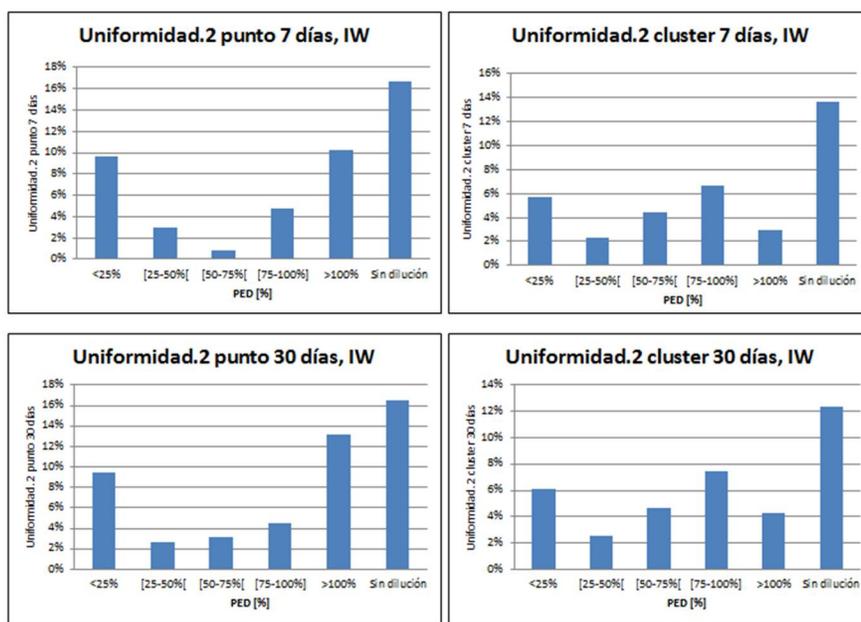


Figura 70: Uniformidad vs PED (corto plazo), IW

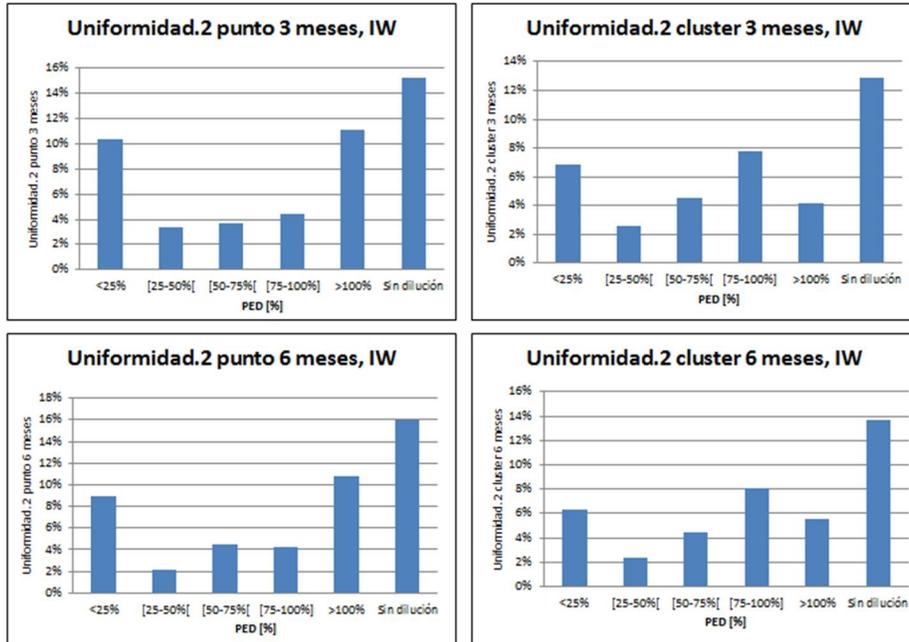


Figura 71: Uniformidad vs PED (mediano plazo), IW

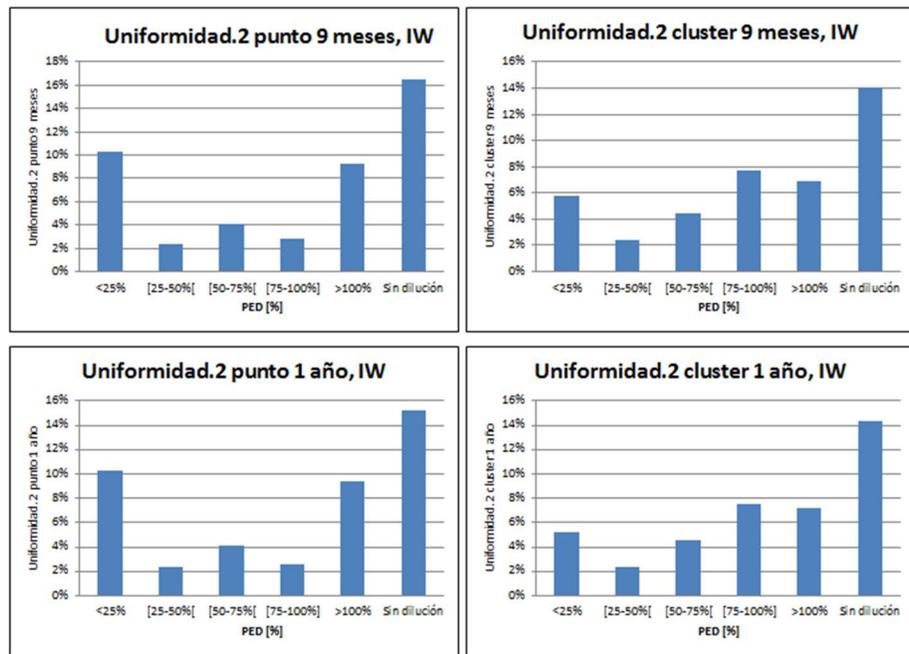


Figura 72: Uniformidad vs PED (largo plazo), IW

En general no se logra apreciar una linealidad entre el PED y el % de uniformidad de las toneladas extraídas. Si logra apreciar relaciones entre los promedios de uniformidad a diferentes PED, normalmente a mayor PED mayor es la uniformidad (sectores ICE, ICW e IN). En el sector ICE, la uniformidad de los puntos sin dilución es menor al de los puntos con dilución, lo cual no es lo que debería pasar teóricamente, en cambio en el sector IW, los puntos sin dilución tienen mayor uniformidad que el de los puntos con dilución; en el sector

ICW ocurre al igual que en el IW, pero solo en el corto plazo ;y en el sector IN la uniformidad de los puntos sin dilución son similares al de los puntos con dilución.

4.1.4. Porcentaje extracción columna in-situ

Para poder hacer un análisis del porcentaje de extracción de la columna in-situ, se debe comparar los puntos con dilución con los puntos sin dilución. En los puntos que presentan dilución se analiza el porcentaje de extracción de columna in-situ donde entra la dilución (PED) y para los puntos sin dilución se analiza el porcentaje de extracción de columna in-situ de la última extracción registrada.

En el sector ICE, el PED tiene una distribución bimodal, donde existen muchos puntos con valores (menos del 20%) y otros muchos con valores altos (más del 100%). En cuanto a los puntos sin dilución una gran mayoría tiene una extracción mayor al 100% de la columna in-situ, como se apreciar en la figura 73.

En la figura 74 se puede observar, que en el sector ICE, la entrada de dilución temprana se concentra en la zona central del sector, y que en la zona norte se encuentra la dilución que entra de forma más tardía. En la zona sur casi no existen puntos diluidos.

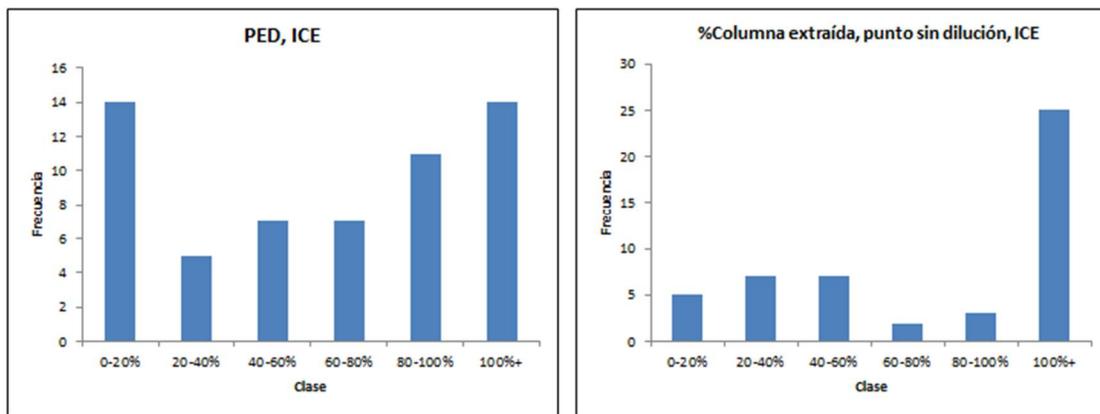


Figura 73: Comparación %Columna extraída, ICE

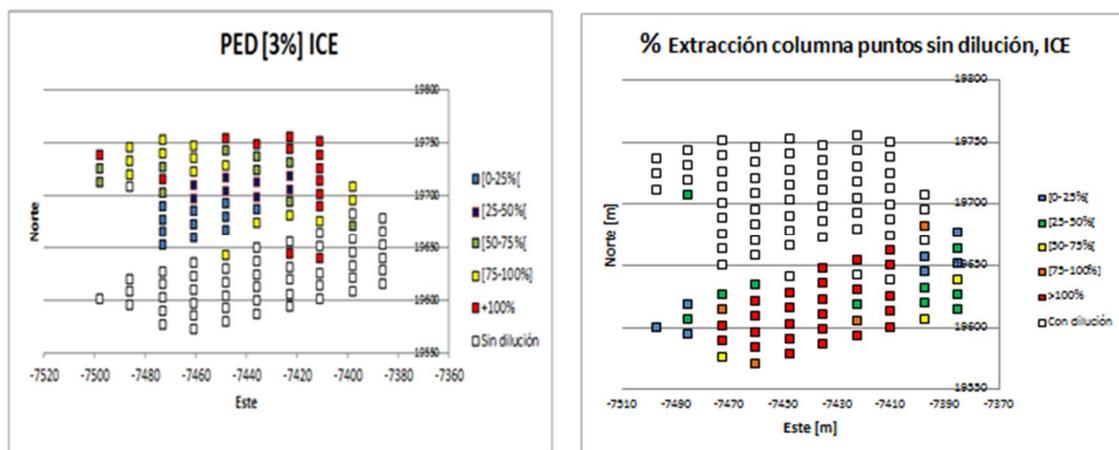


Figura 74: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, ICE

En el sector ICW, en la mayoría de los puntos con dilución, el PED se encuentra sobre el 100%. En cambio, en los puntos sin dilución una mayoría está bajo el 100% de la columna in-situ extraída e incluso un número considerable se encuentra bajo el 20%, como observa en la figura 75. Esto puede significar que a la mayoría de los puntos que le entró dilución es debido a que extrajeron más de la columna in-situ, y no hubo una entrada masiva de dilución temprana. La entrada temprana de la dilución se concentra en la zona sureste del sector, además en la zona noroeste el % de columna in-situ extraída es baja, esto se ve reflejado en la figura 76.

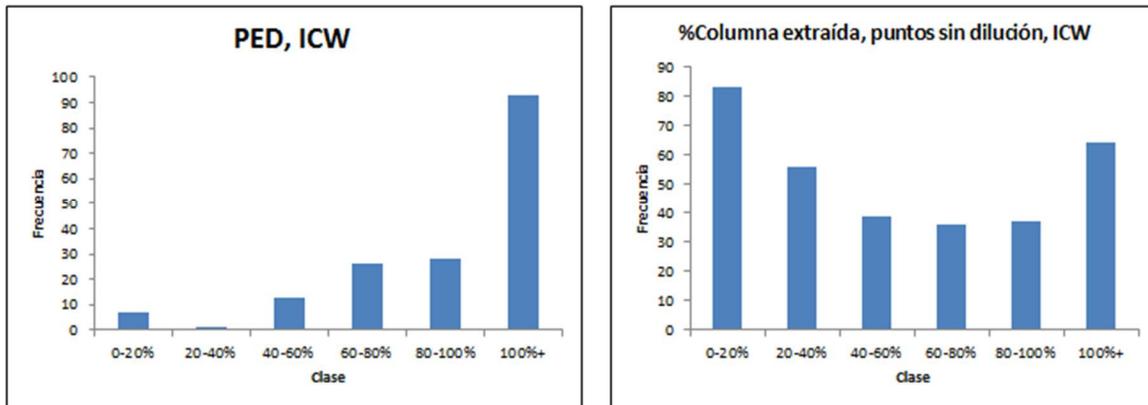


Figura 75: Comparación %Columna extraída, ICW

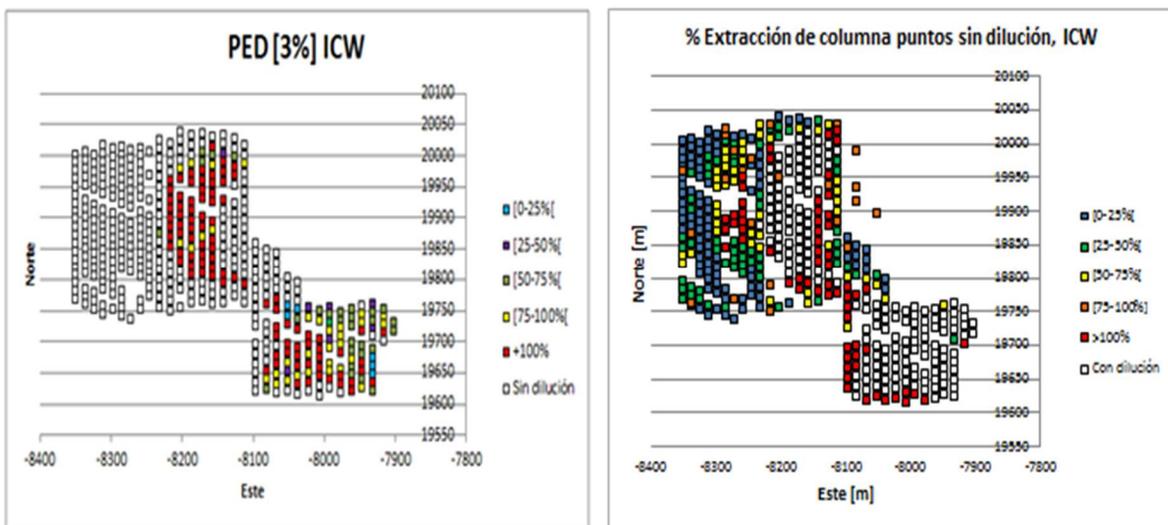


Figura 76: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, ICW

En el sector IN, la mayoría de los puntos con dilución tiene un PED menor al 60%, aunque existe una cantidad importante de puntos con un PED sobre el 100%. En relación a los puntos sin dilución la gran mayoría tiene una extracción de columna sobre el 100%, como se observa en la figura 77. Esto es un caso similar al sector ICE. Los puntos con entrada de dilución más temprana se encuentran en la zona suroeste, y a medida que se avanza hacia el

este y al norte se va retrasando la entrada de dilución, hasta que en la zona norte del sector los puntos de extracción están sin dilución, esto se aprecia en la figura 78.

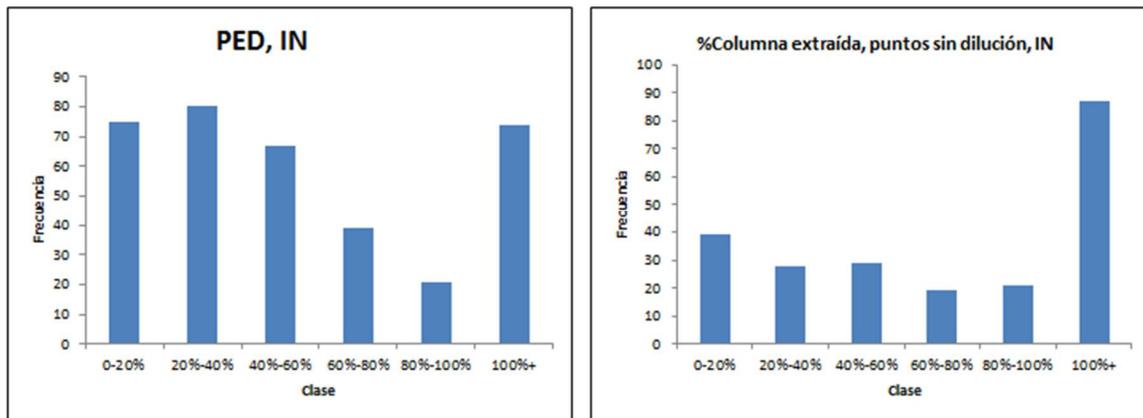


Figura 77: Comparación %columna extraída, IN

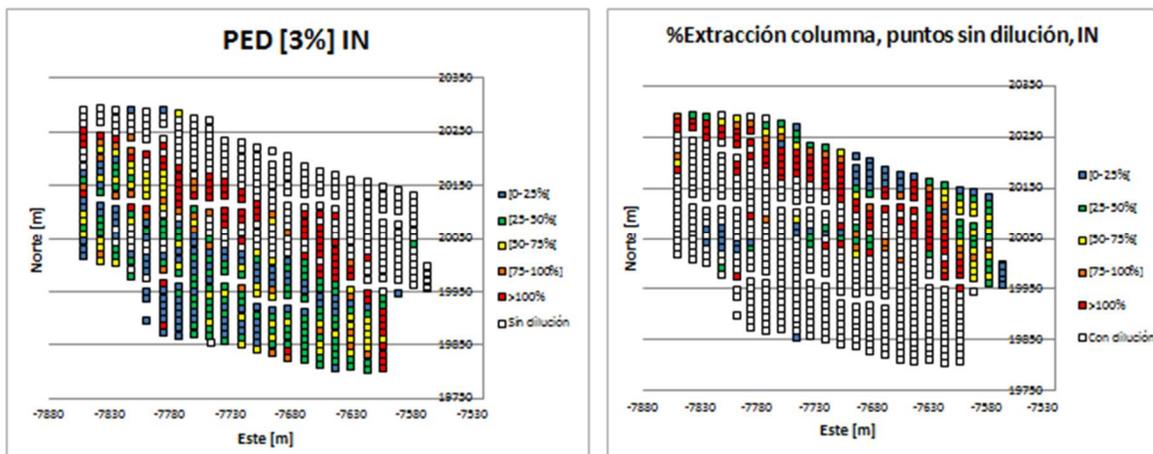


Figura 78: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, IN

En el sector IW, gran parte de los puntos tiene un PED menor a 100%, e incluso la mayoría tiene un PED menor al 60%. En cuanto a los puntos sin dilución, éstos presentan % de extracción de columnas in-situ bajos, en su mayoría menores al 20%, como se observa en la figura 79. La mayoría de los puntos se encuentran diluidos y se ubican en la zona este del sector. Los puntos con dilución más temprana se ubican en la zona en los bordes de la zona con dilución, esto se observa en la figura 80. Además, los puntos sin dilución ubicados en la zona oeste tienen muy bajo % extracción de columna (figura 80).

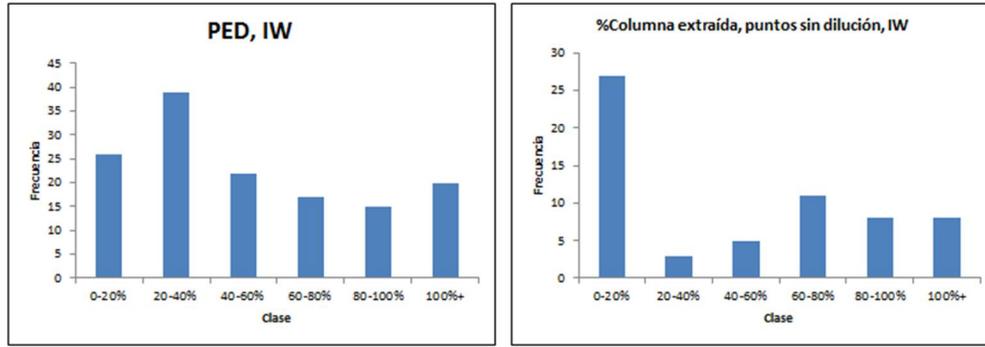


Figura 79: Comparación %columna extraída, IW

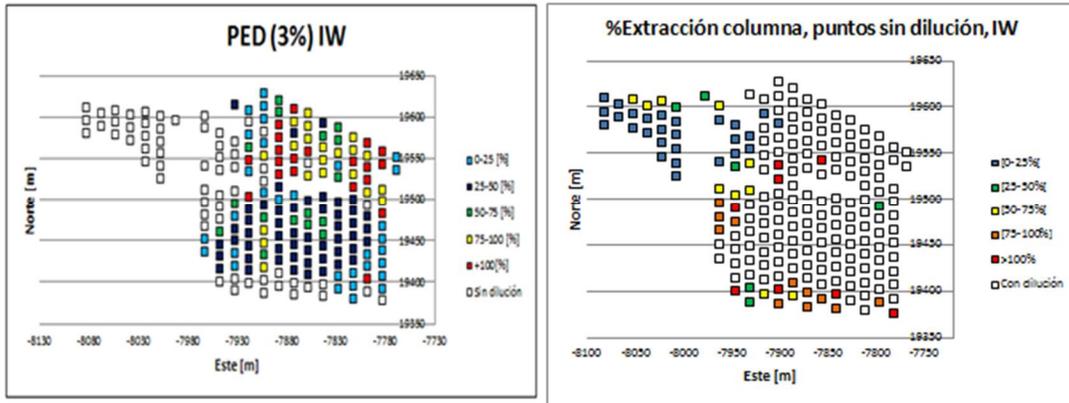


Figura 80: Vistas en planta, puntos con y sin dilución, IW

En este análisis del porcentaje de extracción de la columna in-situ, se puede concluir que en los sectores ICE, IN e IW, los puntos con dilución tuvieron una entrada temprana de ella. En cambio, en el sector ICW, la mayoría de los puntos con dilución tuvo entrada tardía de ella. También se observa que los PED se encuentran “zonificados”, es decir, hay zonas con PED bajos, zonas con PED medios y zonas con PED altas.

4.1.5. Estado de vecinos (vecinos con dilución)

El estado de vecinos se refiere a analizar cómo se encuentra la vecindad geométrica de un punto, básicamente contar cuántos puntos de la vecindad geométrica presentan dilución y cuántos no.

Para hacer un análisis preliminar, de cómo afecta a un punto que su vecindad se encuentre con dilución, se ve la cantidad de puntos con dilución en el tiempo.

En el sector ICE, se ve claramente como la dilución entra a los puntos de extracción durante el 2004, y con mayor fuerza entre los meses de Febrero a Septiembre, pasando de 3 a 40 puntos con dilución, cuando el total de puntos con dilución es 58, esto se observa en la figura 81. Además en la figura 82, mediante la evolución temporal del sector, se ve

claramente como la dilución entra porque ya existe al menos un punto diluido en la vecindad. Del total de puntos diluidos, un 81% tiene al menos un vecino con dilución, a esto se le llamará entrada lateral de dilución, de manera análoga a lo que plantea Paredes (2012) pero a nivel de punto de extracción; este término ya se está ocupando para la entrada de agua barro a los puntos de extracción (Garcés et al., 2016). Esto se reafirma más considerando solo los puntos con dilución con un $PED < 100\%$, los cuales son 45, donde el 84% tiene dilución lateral. En cambio, cuando a un punto le entra la dilución y no existe ningún punto en la vecindad diluido, se le llamará entrada vertical de dilución. En la figura 83, se aprecia la distribución que presenta los números de vecinos con dilución para los puntos con dilución con un $PED < 100$ y los que no, donde en los puntos que no presentan dilución la gran mayoría no tiene vecinos diluidos.



Figura 81: Números de puntos diluidos en el tiempo, ICE

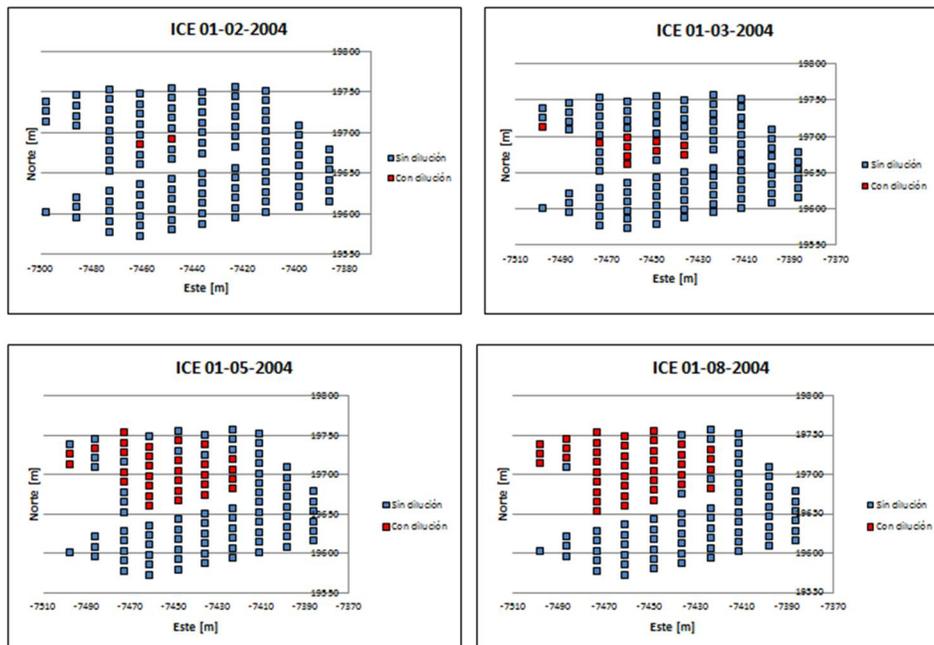


Figura 82: Evolución temporal de la dilución, ICE

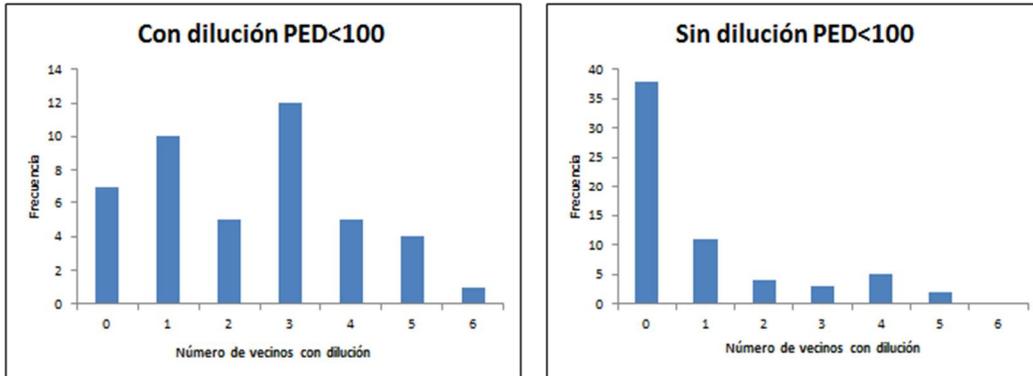


Figura 83: Histogramas números de vecinos con dilución, ICE

En el sector ICW, la dilución entra con fuerza a los puntos de extracción durante 2 períodos. Primero entra desde fines del año 2001 hasta principio del año 2005, pasando de menos de 10 puntos con dilución a más de 80 puntos (en este período se registran las mayores velocidades de extracción como se aprecia en la figura 39). Luego, desde el año 2005 hasta principios del año 2009, se mantiene casi constante entre los 80 y 90 puntos con dilución. Finalmente, entre los años 2009 hasta el final de la extracción, se ve otro aumento considerable en los puntos con dilución, pasando de 94 a 165, lo que representa un 34% de puntos diluidos del total del sector. Esto se puede apreciar en la figura 84.

En la figura 85, se aprecia cómo va aumentando la dilución entre los años 2002 y 2005, donde los puntos diluidos se encuentran en la zona sur-este del sector y los puntos diluidos van “contaminando” a sus vecinos.

En la figura 86, se aprecia como la dilución llega a los puntos del centro del ICW y se va expandiendo a los puntos noreste del sector, entre los años 2009-2011.



Figura 84: Número de puntos con dilución, ICW

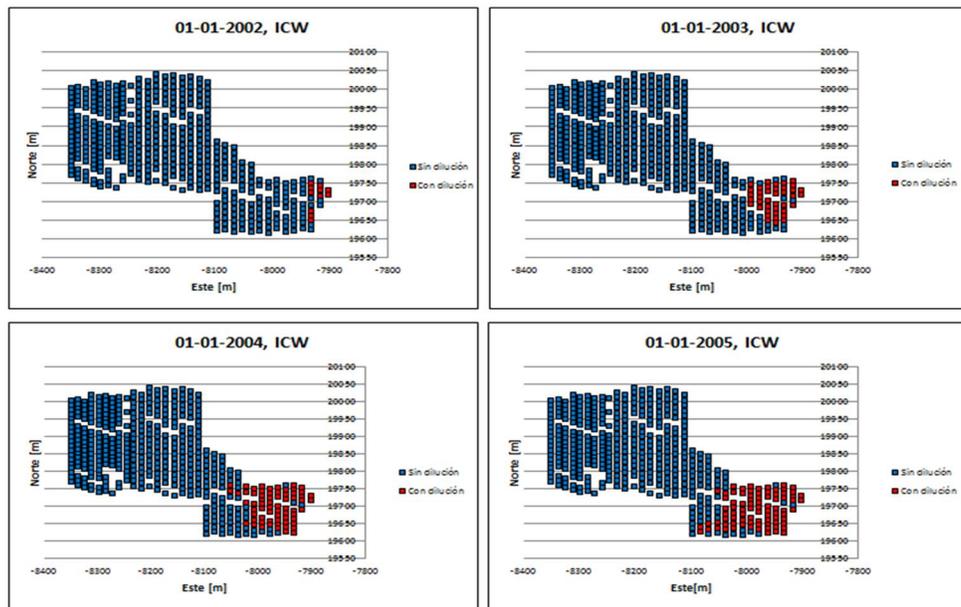


Figura 85: Evolución temporal de la dilución (2001-2005), ICW

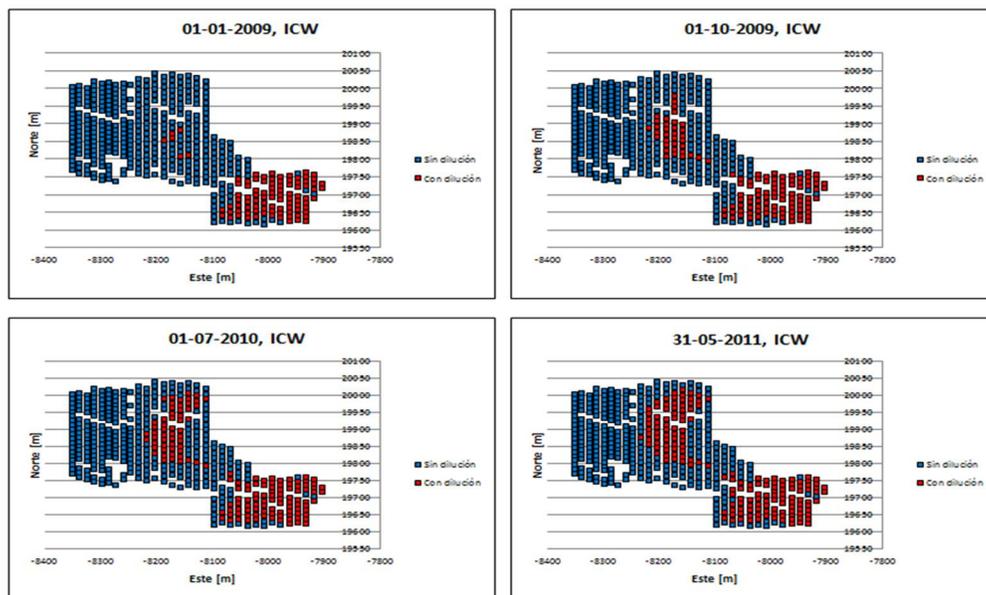


Figura 86: Evolución temporal (2009-2011), ICW

La mayoría de los puntos que le entra dilución, tienen al menos un vecino con dilución, en cambio, los puntos sin dilución en su gran mayoría no tienen ningún vecino con dilución, esto se puede ver en las figuras 85 y 86, pero se aprecia más claramente en los histogramas de la figura 87.

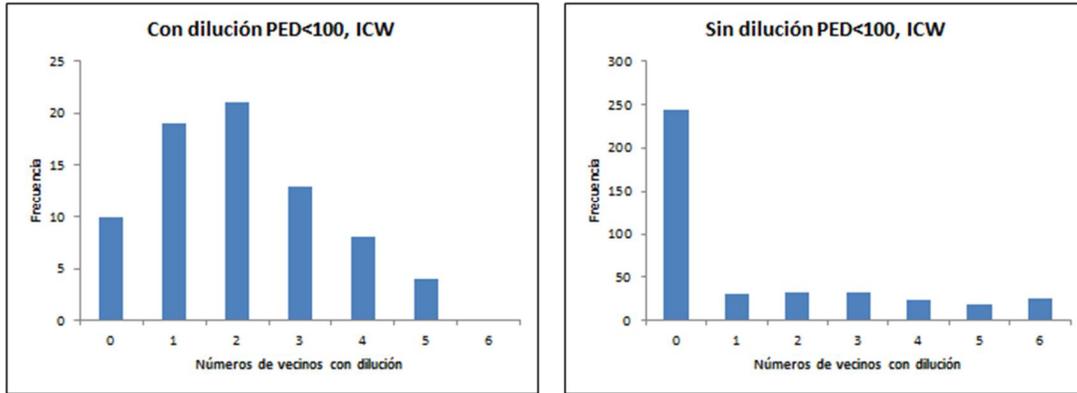


Figura 87: Histogramas números de vecinos con dilución, ICW

En el sector IN la dilución entra de forma continua a los puntos de extracción desde el segundo semestre del año 1995 (recordar que la extracción comienza el segundo semestre del año 1994) hasta fines del año 2003, donde se detiene en forma importante la entrada de dilución a los puntos de extracción, como se observa en la figura 88. Luego desde el año 2004 hasta el final de la extracción, en el año 2011, “solo” aumenta en 15 más los puntos con dilución.



Figura 88: Números de puntos con dilución, IN

La dilución comienza a entrar en la parte sureste del sector y comienza a desplazarse hacia al oeste, pero se mantiene contenida en el sur del sector, como se observa en la figura 89. En el año 2000 casi toda la parte sur del sector se encuentra con dilución y se comienza a diluir algunos puntos de la zona norte del sector y finalmente, en el año 2003 varios puntos de la zona norte se encuentran diluidos, como se muestra en la figura 90.

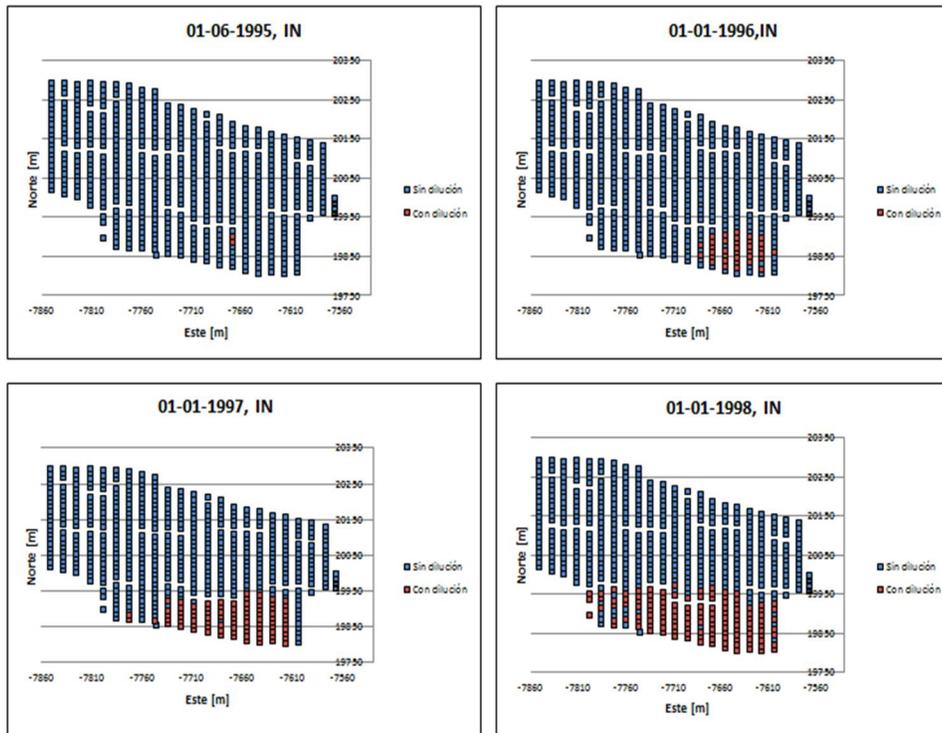


Figura 89: Evolución temporal de la dilución (1995-1998), IN

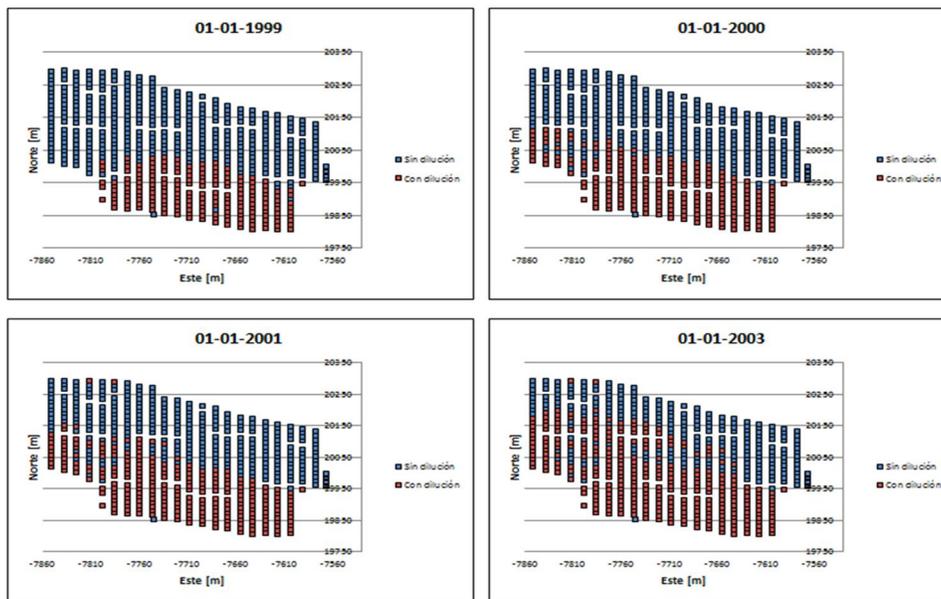


Figura 90: Evolución temporal de la dilución (1999-2003), IN

En este sector la mayoría de los puntos con dilución, tienen al menos un vecino que ya presenta dilución con anterioridad, caso contrario ocurre con los puntos sin dilución, donde la mayoría no tiene vecinos con dilución, como se observa en la figura 91.

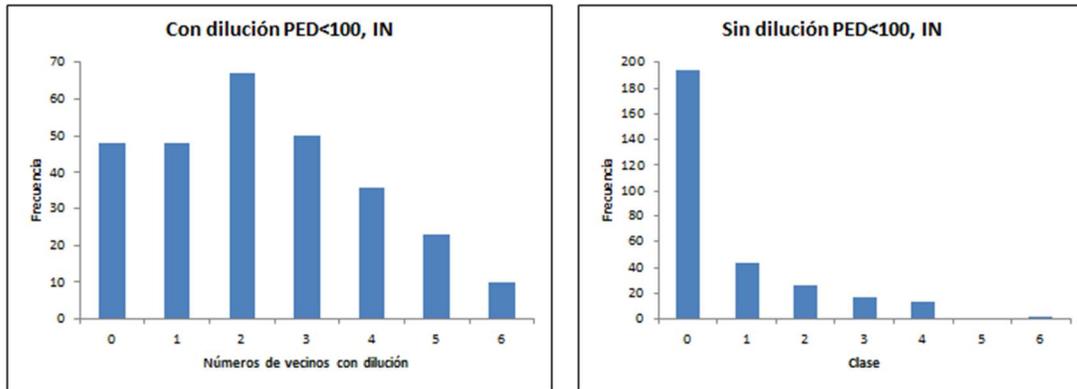


Figura 91: Histogramas número de vecinos con dilución, IW

En el sector IW, la dilución tarda varios años en llegar al sector, desde el comienzo de la extracción en el año 1995 hasta que el primero punto presenta dilución a mediados del año 2000. Luego, los puntos con dilución aumentan en forma considerable hasta llegar cerca de los 80 puntos diluidos a mediados del año 2003 (recordar que este sector tiene 202 puntos de extracción), donde se detiene bastante la entrada de la dilución a los puntos de extracción hasta comienzos del año 2006. Finalmente desde el año 2006 nuevamente se produce una entrada masiva de puntos con dilución hasta finales de su extracción en año 2011. Todo lo anterior se puede observar en la figura 92.



Figura 92: Números de puntos con dilución, IW

La dilución comienza en la zona centro del sector, y se va desplazando primero hacia el sureste y luego hacia los puntos ubicados en el suroeste del sector, quedando para finales del año 2003 con la mayoría de los puntos de la parte sur con dilución, esto se puede ver en la figura 93. Luego, como se mencionó anteriormente se detiene un poco la entrada de dilución a los puntos de extracción hasta finales 2005, donde comienza una entrada de dilución en los puntos ubicados en la parte norte central del sector, y se va desplazando hacia el este y hacia el sur, quedando así la mayoría de los puntos de extracción con presencia de dilución, como se aprecia en la figura 94.

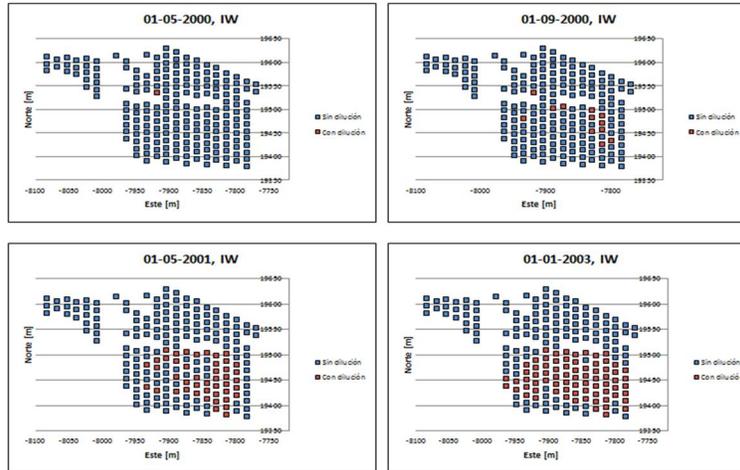


Figura 93: Evolución temporal de la dilución (2000-2003), IW

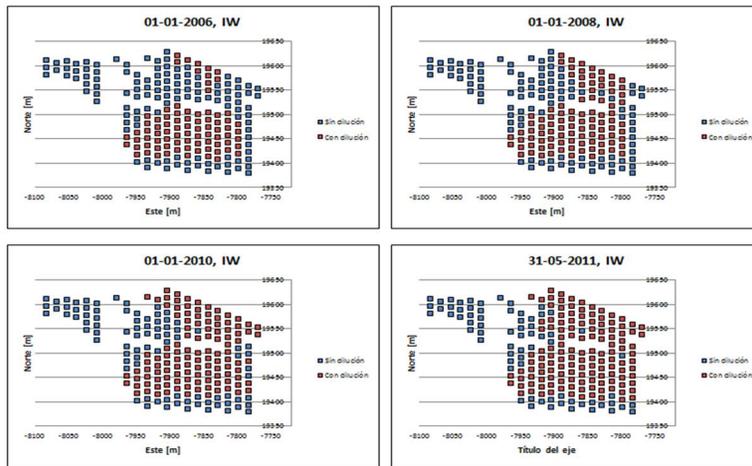


Figura 94: Evolución temporal de la dilución (2006-2011), ICW

Al igual que los otros sectores, la mayoría de los puntos con dilución tienen al menos un vecino que presenta dilución con anterioridad, caso contrario se da para los puntos sin dilución, como se aprecia en la figura 95.

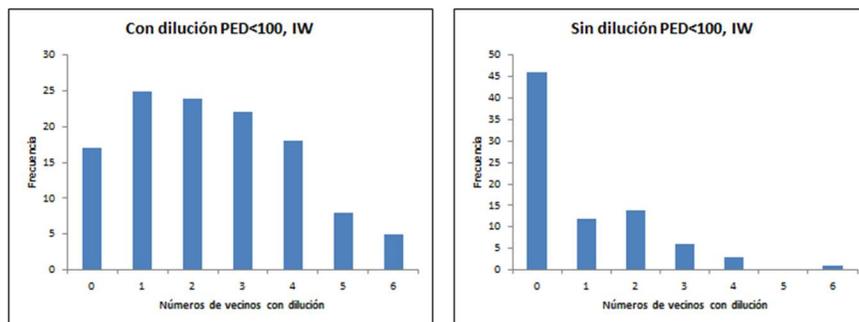


Figura 95: Histogramas números de vecinos con dilución, IW

En este análisis queda claro que en todos los sectores hay un comportamiento similar, en cuanto al estado de los vecinos (vecinos dilución) al momento de la entrada de la dilución, pues la mayoría de los puntos con dilución tienen al menos 1 vecino en ese estado (entrada lateral de la dilución), en cambio, a los puntos que nunca tuvieron dilución es porque en su vecindad no existe un punto diluido.

4.2. Análisis y conclusiones estudio exploratorio de datos

En la tabla 18, se hace un resumen del análisis de las variables, además se realiza una conclusión general de cada una de las variables.

Tabla 18: Análisis estudio exploratorio de datos

Sector	Variables				
	Altura columna in-situ [m]	Velocidad de extracción [ton/(m ² *día)]	Uniformidad [%]	Columna in-situ extraída [%]	Estado vecindad (vecinos con dilución)
ICE	A menor PED menor es la altura de columna in-situ promedio. Además los puntos sin dilución tienen una altura de columna mayor al de los puntos sin dilución	No hay una relación clara entre el PED y la velocidad de extracción en corto, mediano y largo plazo. Los puntos sin dilución tienen una menor velocidad que los puntos con dilución (corto, mediano y largo) No hay mayor diferencia entre el análisis del punto y del cluster.	Hay una mejor relación entre el PED y la uniformidad para el análisis del cluster en el mediano y largo plazo. Los puntos con PED>100% tienen las mayores uniformidades Los puntos sin dilución tienen menores uniformidades que los puntos con dilución.	En los puntos con dilución, la entrada de ella tiene distribución bimodal, donde hay muchos puntos con PED<20% y muchos con PED>100%. Los PED se encuentran zonificados, es decir, existen zonas de PED bajos, medios y altos. La mayoría de los puntos sin dilución tienen más del 100% de la columna extraída. El PED promedio es menor a la promedio de extracción de columna in-situ de los puntos sin dilución.	Existe la dilución lateral, es decir, puntos que entra la dilución y luego contaminan a sus vecinos. La gran mayoría de los puntos con dilución tienen al menos un vecino con dilución. Los puntos sin dilución en su gran mayoría no tienen vecinos con dilución.
ICW	No hay mayor relación entre el PED y la altura de columna in-situ promedio. Los puntos sin dilución tienen mayor altura de columna in-situ promedio que los puntos con dilución.	A menor PED hay una mayor velocidad, en especial para los PED<25% (corto, mediano y largo plazo). Los puntos sin dilución tienen una velocidad menor a los puntos con dilución, en el corto, mediano y largo plazo. No hay mayor	No hay una relación clara entre el PED y la uniformidad, si se logra apreciar que los PED<50%, tienen una menor uniformidad (en el corto y mediano plazo). Los puntos sin dilución tienen una uniformidad mayor al de los puntos con dilución en el corto plazo, pero, en el mediano y largo	La mayoría de los puntos con dilución tienen un PED mayor a 100%. Los PED se encuentran zonificados. La mayoría de los puntos sin dilución están bajo el 100% de la columna in-situ (también se encuentran zonificadas). El PED promedio es mayor a la promedio de extracción de	Existe la dilución lateral, es decir, puntos que entra la dilución y luego contaminan a sus vecinos. La gran mayoría de los puntos con dilución tienen al menos un vecino con dilución. Los puntos sin dilución en su gran mayoría no tienen vecinos con dilución.

		diferencia entre el análisis del punto y del cluster.	plazo las uniformidades son similares.	columna in –situ de los puntos sin dilución.	
IN	No hay mayor relación entre el PED y la altura de columna in-situ promedio. Los puntos sin dilución tienen mayor altura de columna in-situ promedio que los puntos con dilución.	Hay una evidente relación entre el PED y la velocidad de extracción, pues a menor PED mayor es la velocidad de extracción (corto, mediano y largo plazo). Los puntos sin dilución tienen una menor velocidad que los puntos con dilución (corto, mediano y largo). No hay mayor diferencia entre el análisis del punto y del cluster.	Se da la relación que a mayor PED hay mayor uniformidad, esto se logra en el corto y mediano plazo. La uniformidad de los puntos sin dilución es similar al de los puntos con dilución en el corto plazo. En mediano y largo plazo, la uniformidad de los puntos sin dilución es menor al de los puntos con dilución.	La mayoría de los puntos con dilución tienen un PED<60%. Los PED se encuentran zonificados. Los puntos sin dilución en su mayoría están sobre el 100% de la columna in-situ (también se encuentran zonificados). El PED promedio es menor a la promedio de extracción de columna in-situ de los puntos sin dilución.	Existe la dilución lateral, es decir, puntos que entra la dilución y luego contaminan a sus vecinos. La mayoría de los puntos con dilución tienen al menos un vecino con dilución. También hay un buen número de puntos sin dilución lateral (sin vecino con dilución). Los puntos sin dilución en su gran mayoría no tienen vecinos con dilución.
IW	No hay mayor relación entre el PED y la altura de columna in-situ promedio. Los puntos sin dilución tienen una altura de columna in-situ promedio levemente mayor al de los puntos con dilución.	A mayor PED hay una mayor velocidad de extracción, lo cual es diferente a lo que ocurre en los otros sectores (corto, mediano y largo plazo). Solo en el corto plazo se logra apreciar una menor velocidad en los puntos sin dilución en comparación a los puntos con dilución.	En general las uniformidades en este sector son muy bajas. Se hace el análisis con la tercera matriz de uniformidad (figura 55). Los puntos sin dilución tienen mayor uniformidad que los puntos con dilución (corto, mediano y largo plazo).	La mayoría de los puntos con dilución están con un PED<100% (incluso la mayoría están bajo 40%). Los PED se encuentran zonificados. La mayoría de los puntos sin dilución tienen menos del 20% de extracción de la columna in-situ, es decir, todavía pueden tener una entrada de la dilución. Los puntos con alto % columna in-situ extraída sin dilución son los de mayores alturas. El PED promedio es mayor a la promedio de extracción de columna in-situ de los puntos sin dilución.	Existe la dilución lateral, es decir, puntos que entra la dilución y luego contaminan a sus vecinos. La gran mayoría de los puntos con dilución tienen al menos un vecino con dilución. Los puntos sin dilución en su gran mayoría no tienen vecinos con dilución
Conclusión general de la variable	Claramente se debe incluir la variable en el estudio debido a que tiene incidencia en la entrada de dilución.	Claramente se debe incluir la variable en el estudio debido a que tiene incidencia en la entrada de dilución.	Aun cuando hay sectores como ICE e IN, donde no se cumple que los puntos sin dilución tengan mayor uniformidad que los puntos con dilución. Se debe incluir la	Solo en el sector ICW, a mayor % de extracción de columna in-situ tienen más dilución. En los otros sectores no ocurre esto. Pero aun así se debe seguir considerando	Existe una evidente relación entre el estado de los vecinos (vecinos con dilución) y la entrada de dilución, por ende se debe incluir esta variable en los modelos.

			variable para ver su impacto a nivel de evaluación diaria de los puntos y también para analizar como interactúa con otras variables.	en el estudio de los modelos.	
--	--	--	--	-------------------------------	--

Los porcentajes de extracción de columna extraída en los cuales entra la dilución (PED), en los sectores ICE, IN e IW son en su mayoría menores a 100%, en cambio en ICW ocurre lo contrario, esto sucede debido a los diferentes mecanismos que controlan la entrada de dilución, para ICE e IN son controladas por la dilución lateral, para IW la dilución se debe a un estallido de roca y para ICW es controlado por la dilución vertical (Paredes, 2012). Las explicaciones que puede tener este fenómeno de distintos mecanismos de entrada de dilución, son por ejemplo, la ubicación inicial de la fuente de dilución (si se ubica sobre o al lado de la columna in-situ); también que en ICW las alturas de columnas in-situ son bastantes parejas comparadas con IN y en especial con ICE, donde hay diferencias de alturas notables (figura 27 y 31). En IW las alturas son parejas pero tiene otro grave problema es que la uniformidad con la se extrajo es bajísima (anexo A), también en el sector IN las uniformidades son bajas (anexo A). Además se observa, que las velocidades en los sectores ICE e IN son muy altas al comienzo de la extracción y luego van disminuyendo durante toda la extracción (figuras 38 y 40), en cambio, en el sector ICW las velocidades se mantienen más constantes (figura 39).

Queda claro, que cada sector tiene condiciones de entorno y operacionales que los diferencian entre ellos por eso se propone construir un modelo para cada sector por separado.

Para evitar la distorsión que generan los datos con más de 100% de la columna in-situ extraída, y como además el objetivo es determinar la entrada temprana de dilución ($PED < 100\%$), no se considerarán los datos con % columna in-situ mayores a 100%. Esto también se realiza pues muchas veces existen similitudes en el comportamiento de los puntos sin dilución con puntos con un $PED > 100\%$, como en las alturas, donde en general las alturas son mayores en los puntos sin dilución y los con un $PED > 100\%$; en velocidad ocurre algo similar (en los sectores ICW e IN) donde las menores velocidades están en los puntos sin dilución y en los con un $PED > 100\%$

Capítulo 5

5.1. Análisis univariabes

Antes de la construcción de los modelos de regresión logística multivariabes, es necesario establecer, cuáles variables pueden ser incluidas en estos modelos. Para ello se debe realizar el test univariabes para cada variable candidata a estar en modelo de regresión logística. Como criterio para pasar el test univariable es que el valor del estadístico p sea menor 0.25 y en lo posible menor 0.20, porque con esto se verifica una significancia estadística de la variable.

Las variables analizadas se resumen en la tabla 19:

Tabla 19: Resumen variables analizadas

Tipo de variable	Partición de variables			N° combinaciones
Altura in-situ[m]	-			1
Columna extraída [%]	-			1
Uniformidad [%]: Porcentaje toneladas extraídas de manera uniforme	Matriz utilizada (Figura 55)	Por lugar: <ul style="list-style-type: none"> • Punto • Cluster 	Por período de tiempo: <ul style="list-style-type: none"> • 7 días • 30 días • 3 meses • 6 meses • 9 meses • 1 año 	36
Velocidad [ton/(m ² *día)]	Por lugar: <ul style="list-style-type: none"> • Punto • Cluster • Máxima del cluster 		Por período de tiempo: <ul style="list-style-type: none"> • 7 días • 30 días • 3 meses • 6 meses • 9 meses • 1 año 	18
Estado vecinos	Número de vecinos con dilución	% de vecinos con dilución		2

Como se mencionó anteriormente para la construcción del modelo se utiliza la herramienta de regresión logística aplicada a casos raros, es decir, se selecciona todos los datos con la variable dependiente, el primer ingreso de dilución acumulada al 3%, con un porcentaje de columna menor al 100% (la elección se justifica que se quiere predecir la entrada temprana de dilución), presente que representa el 25% de la base de datos para la construcción del modelo, y el otro 75% se completa con selección aleatoria de todos datos que no tienen la variable dependiente presente, estos datos son todas las extracciones con menos del 100%

de la columna extraída no se realiza ninguna selección aleatoria estratificada, pues no se desea sesgar por una variable específica, que se podría descartar por esta razón.

5.1.1. Test univariable ICE

Los puntos con dilución con un PED<100% son 44, se toman los datos de la primera entrada de dilución de esos puntos más 132 de datos sin dilución (y con un % columna extraída menor al 100%). A continuación se presenta en la tabla 20, las variables que logran pasar el test univariable en el sector ICE.

Tabla 20: Test Univariable, ICE

Variable	Sig	β	Variable	Sig	β
Columna	0.24	0.64	Uniformidad.2 punto 30 días	0.16	1.21
Altura in situ	0.00	-0.01	Uniformidad.2 cluster 30 días	0.01	3.78
% Vecinos con dilución	0.00	5.07	Uniformidad.2 punto 3 meses	0.13	1.26
Uniformidad cluster 7 días	0.00	2.02	Uniformidad.2 cluster 3 meses	0.01	3.56
Uniformidad punto 30 días	0.12	0.82	Uniformidad.2 punto 6 meses	0.06	1.75
Uniformidad cluster 30 días	0.00	2.51	Uniformidad.2 cluster 6 meses	0.02	4.73
Uniformidad punto 3 meses	0.06	1.04	Uniformidad.2 punto 9 meses	0.12	1.44
Uniformidad cluster 3 meses	0.00	2.72	Uniformidad.2 cluster 9 meses	0.00	4.58
Uniformidad punto 6 meses	0.02	1.38	Uniformidad.2 punto 1 año	0.08	1.67
Uniformidad cluster 6 meses	0.00	3.68	Uniformidad.2 cluster 1 año	0.00	5.45
Uniformidad punto 9 meses	0.04	1.24	Velocidad punto 7 días	0.00	2.07
Uniformidad cluster 9 meses	0.00	3.84	Velocidad cluster 7 días	0.01	2.67
Uniformidad punto 1 año	0.03	1.41	Velocidad max cluster 7 días	0.08	1.06
Uniformidad cluster 1 año	0.00	4.18	Velocidad punto 30 días	0.01	2.39
Uniformidad.1 punto 7 días	0.18	0.80	Velocidad cluster 30 días	0.00	4.11
Uniformidad.1 cluster 7 días	0.00	2.97	Velocidad max cluster 30 días	0.00	2.47
Uniformidad.1 punto 30 días	0.10	1.08	Velocidad punto 3 meses	0.02	2.14
Uniformidad.1 cluster 30 días	0.00	3.11	Velocidad cluster 3 meses	0.03	2.80
Uniformidad.1 punto 3 meses	0.05	1.35	Velocidad max cluster 3 meses	0.13	1.38
Uniformidad.1 cluster 3 meses	0.00	3.31	Velocidad punto 6 meses	0.02	2.26
Uniformidad.1 punto 6 meses	0.02	1.82	Velocidad cluster 6 meses	0.07	2.46
Uniformidad.1 cluster 6 meses	0.00	4.51	Velocidad max cluster 6 meses	0.10	1.64
Uniformidad.1 punto 9 meses	0.04	1.53	Velocidad punto 9 meses	0.03	2.21
Uniformidad.1 cluster 9 meses	0.00	4.63	Velocidad cluster 9 meses	0.09	2.40
Uniformidad.1 punto 1 año	0.02	1.82	Velocidad max cluster 9 meses	0.09	1.38
Uniformidad.1 cluster 1 año	0.00	5.31	Velocidad punto 1 año	0.03	2.13
Uniformidad.2 cluster 7 días	0.01	4.49	Velocidad cluster 1 año	0.10	2.34
			Velocidad max cluster 1 año	0.11	1.67

Como se ve en la tabla 20, muchas variables logran pasar el test univariable, pero se debe tener cuidado con el signo del β en las uniformidades, pues este es positivo cuando debería ser negativo, para la construcción de los modelos, por ende se analizará luego si se ingresan o no a los modelos.

5.1.2. Test Univariable ICW

Los puntos con dilución con un PED<100% son 77, se toman los datos de la primera entrada de dilución de esos puntos más 231 de datos sin dilución (y con un % columna extraída menor al 100%). A continuación se presenta en la tabla 21, las variables que logran pasar el test univariable en el sector ICW.

Tabla 21: Test Univariable, ICW

Variable	Sig.	β	Variable	Sig.	β
%Vecinos con dilución	0.00	5.29	Velocidad punto 30 días	0.00	2.99
%Columna extraída	0.00	1.89	Velocidad cluster 30 días	0.00	4.77
Uniformidad punto 7 días	0.22	0.45	Vmax cluster 30 días	0.00	2.27
Uniformidad cluster 30 días	0.13	1.22	Velocidad punto 3 meses	0.00	3.44
Uniformidad cluster 3 meses	0.05	1.80	Velocidad cluster 3 meses	0.00	6.00
Uniformidad cluster 6 meses	0.18	2.37	Vmax cluster 3 meses	0.00	3.38
Uniformidad punto 9 meses	0.16	0.83	Velocidad punto 6 meses	0.00	4.26
Uniformidad cluster 9 meses	0.00	3.41	Velocidad cluster 6 meses	0.00	6.53
Uniformidad punto 1 año	0.10	1.03	Vmax punto 6 meses	0.00	3.81
Uniformidad cluster 1 año	0.00	3.79	Velocidad punto 9 meses	0.00	4.52
Altura in-situ	0.00	-0.28	Velocidad cluster 9 meses	0.00	6.82
Velocidad punto 7 días	0.00	1.71	Vmax cluster 9 meses	0.00	4.20
Velocidad cluster 7 días	0.00	3.26	Velocidad punto 1 año	0.00	4.37
Vmax cluster 7 días	0.00	1.32	Velocidad cluster 1 año	0.00	6.79
			Vmax cluster 1 año	0.00	4.28

Como se observa en la tabla 21, solo las “uniformidades” que utilizan la matriz más exigente y que toman como referencia un cluster logran pasar el test univariable, pero tiene el problema similar al sector ICE, pues los signos del β debiesen ser negativos y no positivos.

5.1.3. Test Univariable IN

Los puntos con dilución con un PED<100% son 289, se toman los datos de la primera entrada de dilución de esos puntos más 867 de datos sin dilución (y con un % columna extraída menor al 100%). A continuación se presenta en la tabla 22, las variables que logran pasar el test univariable en el sector IN.

Tabla 22: Test Univariable, IN

Variable	Sig.	β	Variable	Sig.	β
% Vecinos con dilución	0.00	5.17	Uniformidad.2 cluster 3 meses	0.00	1.71
Altura in-situ	0.00	-0.03	Uniformidad.2 punto 6 meses	0.00	1.35
%Columna	0.09	0.54	Uniformidad.2 cluster 6 meses	0.00	1.89
Uniformidad cluster 30 días	0.05	0.55	Uniformidad.2 punto 9 meses	0.00	1.58
Uniformidad cluster 3 meses	0.01	0.80	Uniformidad.2 cluster 9 meses	0.00	2.11
Uniformidad cluster 6 meses	0.04	0.85	Uniformidad.2 punto 1 año	0.00	1.66
Uniformidad punto 1 año	0.00	0.88	Uniformidad.2 cluster 1 año	0.00	2.34
Uniformidad cluster 1 año	0.01	1.10	Velocidad punto 7 días	0.00	2.35
Uniformidad.1 punto 7 días	0.13	0.27	Velocidad cluster 7 días	0.00	3.26
Uniformidad.1 cluster 7 días	0.06	0.47	Vmax cluster 7 días	0.00	1.71
Uniformidad.1 punto 30 días	0.14	0.28	Velocidad punto 30 días	0.00	2.74
Uniformidad.1 cluster 30 días	0.00	0.79	Velocidad cluster 30 días	0.00	3.52
Uniformidad.1 punto 3 meses	0.00	0.65	Vmax cluster 30 días	0.00	1.89
Uniformidad.1 cluster 3 meses	0.00	0.97	Velocidad punto 3 meses	0.00	3.08
Uniformidad.1 punto 6 meses	0.00	0.90	Velocidad cluster 3 meses	0.00	4.01
Uniformidad.1 cluster 6 meses	0.00	1.14	Vmax cluster 3 meses	0.00	2.25
Uniformidad.1 punto 9 meses	0.00	1.14	Velocidad punto 6 meses	0.00	3.20
Uniformidad.1 cluster 9 meses	0.00	1.41	Velocidad cluster 6 meses	0.00	3.97
Uniformidad.1 punto 1 año	0.00	1.21	Vmax cluster 6 meses	0.00	2.29
Uniformidad.1 cluster 1 año	0.00	1.64	Velocidad punto 9 meses	0.00	3.22
Uniformidad.2 punto 7 días	0.00	0.51	Velocidad cluster 9 meses	0.00	4.08
Uniformidad.2 cluster 7 días	0.00	1.07	Vmax cluster 9 meses	0.00	2.46
Uniformidad.2 punto 30 días	0.00	0.73	Velocidad punto 1 año	0.00	3.26
Uniformidad.2 cluster 30 días	0.00	1.46	Velocidad cluster 1 año	0.00	4.12
Uniformidad.2 punto 3 meses	0.00	1.14	Vmax cluster 1 año	0.00	2.60

Como se ve en la tabla 22, muchas variables logran pasar el test univariable, pero se debe tener cuidado con el signo del β en las uniformidades, pues, al igual que los sectores antes mencionados (ICE e ICW), este es positivo cuando debería ser negativo, para la construcción de los modelos, por ende se analizará luego si se ingresan o no a los modelos.

5.1.4. Test Univariable IW

Los puntos con dilución con un $PED < 100\%$ son 119, se toman los datos de la primera entrada de dilución de esos puntos más 357 de datos sin dilución (y con un % columna extraída menor al 100%). A continuación se presenta en la tabla 23, las variables que logran pasar el test univariable en el sector IW.

Tabla 23: Test Univariable, IW

Variable	Sig.	β	Variable	Sig.	β
Vecinos con dilución	0.00	0.98	Uniformidad.1 punto 6 meses	0.03	-1.51
%Columna	0.09	0.68	Uniformidad.1 cluster 6 meses	0.00	-5.93
Altura in-situ	0.00	-0.01	Uniformidad.1 punto 9 meses	0.03	-1.56
Uniformidad cluster 7 días	0.02	-6.53	Uniformidad.1 cluster 9 meses	0.00	-6.36
Uniformidad punto 30 días	0.24	-1.09	Uniformidad.1 punto 1 año	0.03	-1.61
Uniformidad cluster 30 días	0.02	-6.33	Uniformidad.1 cluster 1 año	0.00	-6.64
Uniformidad punto 3 meses	0.21	-1.27	Uniformidad.2 punto 7 días	0.02	-1.15
Uniformidad cluster 3 meses	0.02	-6.79	Uniformidad.2 cluster 7 días	0.00	-4.74
Uniformidad punto 6 meses	0.15	-1.59	Uniformidad.2 punto 30 días	0.02	-1.17
Uniformidad cluster 6 meses	0.01	-7.65	Uniformidad.2 cluster 30 días	0.02	-6.33
Uniformidad punto 9 meses	0.13	-1.67	Uniformidad.2 punto 3 meses	0.02	-1.20
Uniformidad cluster 9 meses	0.01	-9.09	Uniformidad.2 cluster 3 meses	0.00	-4.25
Uniformidad punto 1 año	0.13	-1.66	Uniformidad.2 punto 6 meses	0.02	-1.24
Uniformidad cluster 1 año	0.01	-9.80	Uniformidad.2 cluster 6 meses	0.00	-4.62
Uniformidad.1 punto 7 días	0.05	-1.22	Uniformidad.2 punto 9 meses	0.01	-1.31
Uniformidad.1 cluster 7 días	0.00	-5.65	Uniformidad.2 cluster 9 meses	0.00	-4.91
Uniformidad.1 punto 30 días	0.04	-1.26	Uniformidad.2 punto 1 año	0.01	-1.32
Uniformidad.1 cluster 30 días	0.00	-4.88	Uniformidad.2 cluster 1 año	0.00	-5.07
Uniformidad.1 punto 3 meses	0.03	-1.43	Velocidad punto 7 días	0.01	1.46
Uniformidad.1 cluster 3 meses	0.00	-5.47	Velocidad cluster 7 días	0.24	0.74
			Velocidad punto 30 días	0.21	0.77

Como se aprecia en la tabla 23 muchas de las velocidades calculadas no pudieron pasar el test univariable, por su poca significancia. A diferencia de los otros sectores, en este la uniformidad si tiene un β negativo, que es lo que se presuponía.

5.2. Modelos Multivariantes

La construcción de modelos de regresión logística multivariantes implica la utilización del ajuste para eventos raros, por ende la elección de los modelos se basa en la base de datos manipulada para ese ajuste, y luego se debe analizar cómo se correlacionan estos modelos con toda la base de datos. La elección de los mejores modelos de regresión logística se fundamenta en los estadísticos que entrega la modificación para casos raros, sin embargo, esto se debe analizar luego para ver si se deben modificar por otro modelo que ajuste mejor a todos los datos.

Los modelos tienen como variable independiente, la primera entrada de dilución antes de que se haya extraído el 100% de la columna in-situ.

Las variables incluidas en los modelos multivariantes deben tener un estadístico probabilístico p. o significancia menor a 0.05, a efectos de este trabajo se acepta hasta 0.1 de significancia.

5.2.1. Modelos ICE

A continuación se presentan los modelos multivariantes para el sector ICE, en las tablas 24 y 25. En estos no se pudo incluir la variable % columna in-situ extraída.

Tabla 24: Modelo 1 ICE

Variable	β	Sig.	Comentario (odds ratio)
Vecinos con dilución [%]	4.73	0.00	Un aumento del 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 2.04 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in situ [m]	-0.008	0.01	Un aumento de 10[m] de altura de columna in-situ, implica que hay 0.92 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad punto 30 días [%]	-0.74	0.03	Un aumento de 10% en la uniformidad del punto en 30 días, implica que hay 0.92 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Velocidad punto 30 días [ton/(m ² *día)]	0.94	0.08	Un aumento de 0.5 [ton/(m ² *día)] en la velocidad del punto en 30 días, implica que hay 1.60 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	-0.92	-	-

Tabla 25: Modelo 2 ICE

Variable	β	Sig.	Comentarios (odds ratio)
Vecinos con dilución [%]	4.45	0.00	Un aumento del 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 1.95 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in situ [m]	-0.010	0.00	Un aumento de 10 [m] de altura de columna in-situ, implica que hay 0.87 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad punto 30 días [%]	-0.86	0.02	Un aumento de 10% en la uniformidad del punto en 30 días, implica que hay 0.91 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	0.31	-	

5.2.2. Modelos ICW

A continuación se presentan los modelos multivariantes para el sector ICW en las tablas 26 y 27. En estos modelos se tiene la dificultad que se pudo incluir en un mismo modelo la variable velocidad con las variables uniformidad y columna in-situ extraída.

Tabla 26: Modelo 1 ICW

Variable	β	Sig.	Comentarios (odds ratio)
% Vecinos con dilución	6.18	0.00	Un aumento del 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 2.53 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in-situ [m]	-0.030	0.00	Un aumento de 10 [m] de altura de columna in-situ, implica que hay 0.74 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Velocidad máxima cluster 30 días [ton/(m ² *día)]	2.10	0.00	Un aumento de 0.5 [ton/(m ² *día)] en la velocidad máxima del cluster en 30 días, implica que hay 2.86 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	0.38	-	

Tabla 27: Modelo 2 ICW

Variable	β	Sig.	Comentarios (odds ratio)
% Vecinos con dilución	7.75	0.00	Un aumento del 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 3.20 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in-situ [m]	-0.029	0.01	Un aumento de 10 [m] de altura de columna in-situ, implica que hay 0.75 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Columna extraída [%]	1.39	0.08	Un aumento de 10% de columna extraída, implica que hay 1.14 veces más probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad cluster 30 días [%]	-0.65	0.04	Un aumento de 10% en la uniformidad del cluster en 30 días, implica que hay 0.93 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	1.23	-	

5.2.3. Modelos IN

A continuación se muestran los modelos multivariantes para el sector IN en las tablas 28 y 29. En estos modelos no se incluye la variable % de columna extraída porque tiene un β negativo, es decir, a un mayor % de extracción de la columna hay una menor probabilidad de entrada de dilución, lo cual no se condice ni con teoría ni con la intuición.

Tabla 28: Modelo 1 IN

Variable	β	Sig.	Comentarios (odds ratio)
% Vecinos con dilución	4.43	0.00	Un aumento del 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 1.94 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in-situ [m]	-0.020	0.00	Un aumento de 10 [m] en la altura de columna in-situ, implica que hay 0.82 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad cluster 30 días [%]	-1.94	0.01	Un aumento en 10 [%] de uniformidad del cluster en 30 días, implica que hay 0.82 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Velocidad promedio cluster 30 días [ton/(m ² *día)]	2.52	0.06	Un aumento de 0.5 [ton/(m ² *día)] de la velocidad promedio del cluster en 30 días, implica que hay 3.53 veces más de probabilidad de ingreso de

			dilución.
Constante	-0.62	-	-

Tabla 29: Modelo 2 IN

Variable	β	Sig.	Comentarios (Odds Ratio)
% Vecinos con dilución	4.61	0.00	Un aumento de 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 2.00 veces más probabilidad de ingreso de dilución.
Altura de columna in-situ [m]	-0.027	0.00	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica que hay 0.76 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad cluster 30 días [%]	-2.81	0.04	Un aumento de 10% en la uniformidad del cluster en 30 días, implica que hay 0.76 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	3.21	-	-

5.2.4. Modelos IW

A continuación se muestran los modelos multivariantes para el sector IW en las tablas 30 y 31. En estos modelos no se pudo incluir la variable % columna extraída.

Tabla 30: Modelo 1 IW

Variable	β	Sig.	Comentarios (Odds ratio)
% Vecinos con dilución	4.32	0.00	Un aumento de 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 1.91 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura columna in-situ [m]	-0.013	0.00	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica que hay 0.88 veces menos probabilidad de ingreso de dilución.
Velocidad del punto 7 días [ton/(m ² *día)]	2.43	0.00	Un aumento de 0.5 [ton/(m ² *día)] en la velocidad del punto en 7 días, implica que hay 3.37 veces más probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	-0.12	-	

Tabla 31: Modelo 2 IW

Variable	β	Sig.	Comentarios (Odds ratio)
% Vecinos con dilución	5.38	0.00	Un aumento de 15% en porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 2.24 veces más probabilidad de ingreso de dilución.
Altura columna in-situ [m]	-0.016	0.00	Un aumento de 10[m] en la altura de columna in-situ, implica que hay 0.81 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad.2 cluster 7 días [%]	-6.51	0.02	Un aumento de 10% en la uniformidad del cluster en 7 días, implica que hay 0.52 veces menos de probabilidad de ingreso de dilución.

Velocidad promedio cluster 7 días [ton/(m ² *día)]	1.15	0.06	Un aumento de 0.5 [ton/(m ² *día)] en la velocidad promedio del cluster en 7 días, implica que hay 1.77 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	1.22	-	-

5.3. Calibración Modelos

Para tener un buen análisis de los modelos de ingreso de dilución, estos se deben calibrar en función de encontrar la probabilidad de corte que maximice la precisión y confiabilidad; y minimice el error del tonelaje y/o del PED. Y con esta calibración se puede hacer un mejor análisis del funcionamiento de los modelos.

5.3.1. Calibración Modelos ICE

Se probaron varios modelos, pero cuando se incluía algún tipo de variable velocidad, se reportaba entrada de dilución muy temprana como se muestra en la figura 96. Además la variable %columna in-situ extraída no resultaba significativa en los modelos.

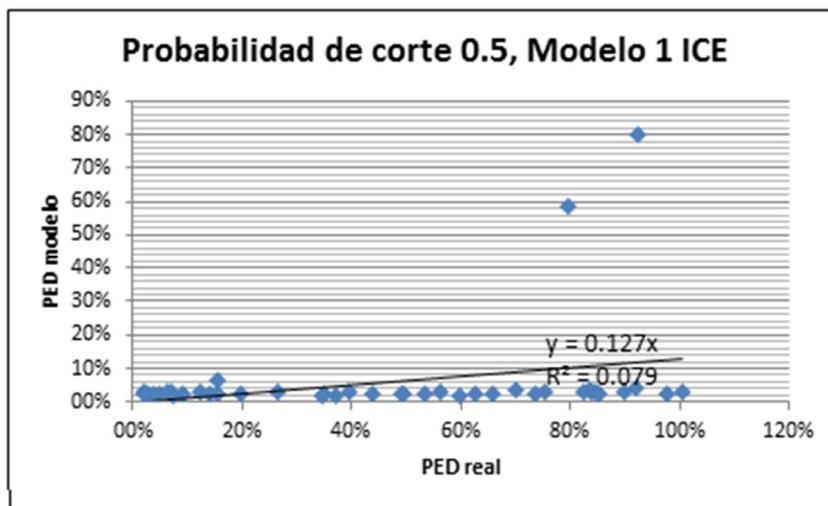


Figura 96: PED real vs PED modelo, Modelo 1 ICE, Probabilidad de corte 0.5

El modelo 2 ICE tiene una confiabilidad alta del 90.8% (tabla 32) y un error en el PED total para los verdaderos positivos del 32% ($y=0.68$) como se observa en la figura 97. El PED promedio del modelo es de 31.7% y el PED promedio real es del 48.9%, este PED promedio es diferente al calculado por (Paredes, 2012) pues se han eliminado los datos con PED mayores a 100%. Los errores del PED no superan el 40% de diferencia y se concentran entre 0 a 30% (figura 98), lo que implica que el modelo tiende a predecir de forma más temprana a la real la entrada de dilución. En la figura 99 se aprecia la matriz de contingencia del modelo, donde se ve claramente que los falsos positivos se concentran exactamente al lado de un punto con dilución (verdadero positivo). Las mayores diferencias entre el PED real y el modelado se encuentran en el noreste de los puntos verdaderos positivos (figura 100).

Tabla 32: Estadísticos Modelo 2 ICE

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.5	38	60	3	6	86.4	95.2	91.6	90.8	24.4

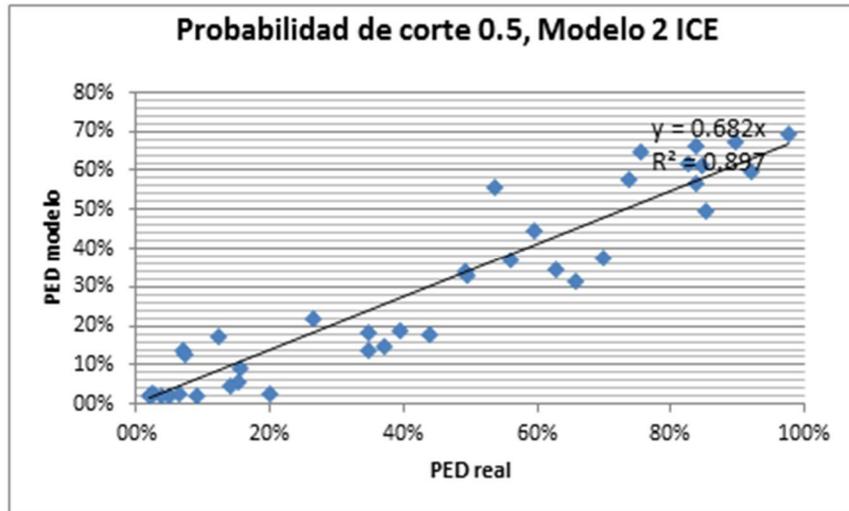


Figura 97: PED real vs PED modelado, Modelo 2 ICE, Probabilidad de corte 0.5

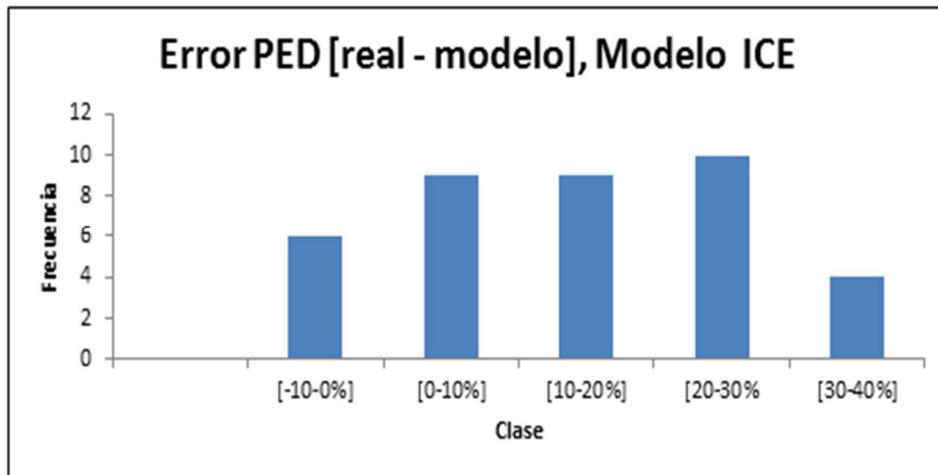


Figura 98: Histograma error PED [%], Modelo 2 ICE

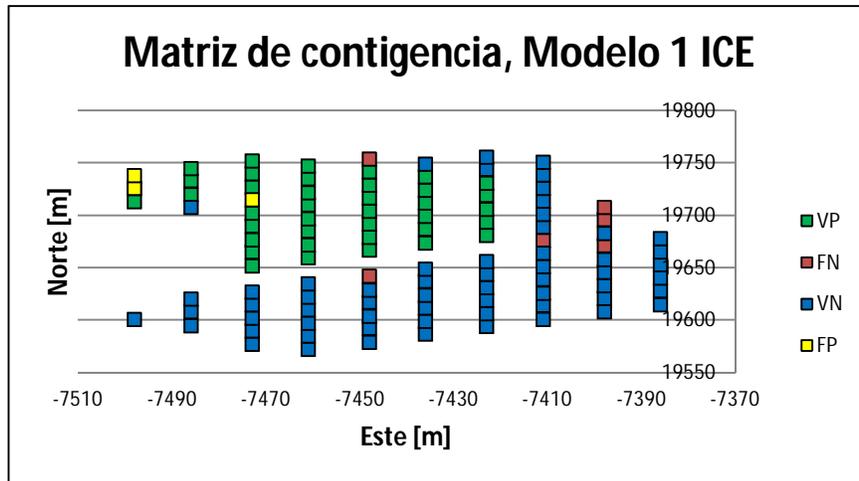


Figura 99: Matriz de contingencia, Modelo 2 ICE

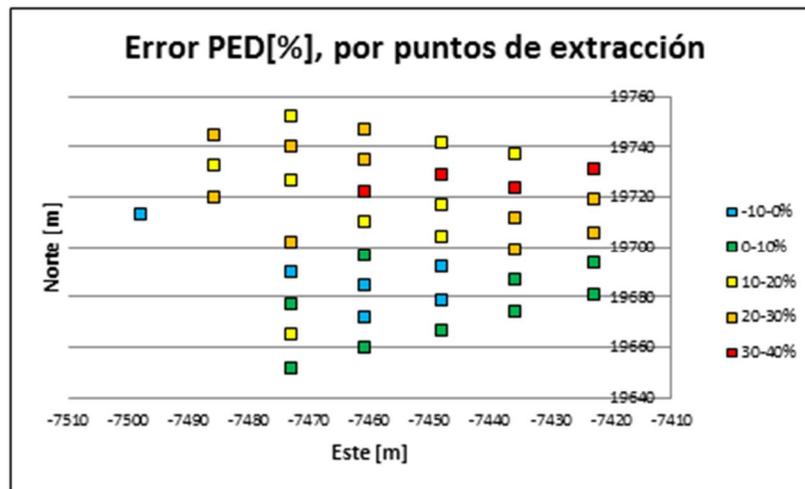


Figura 100: Error PED [%] Modelo 2 ICE, por puntos de extracción (VP)

5.3.2. Calibración modelos ICW

De forma similar que el sector ICE, al construir un modelo con la variable velocidad, se reporta la entrada de dilución de forma temprana, esto se puede apreciar en la figura 101.

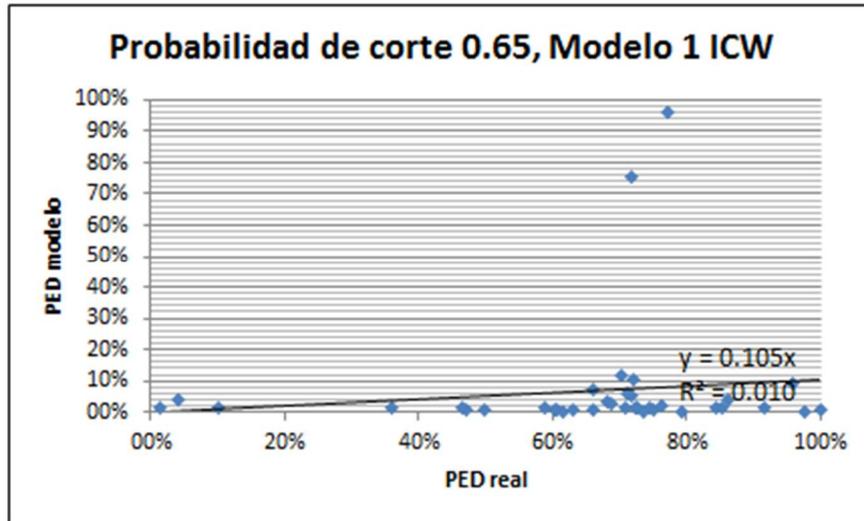


Figura 101: PED real vs PED modelado, Modelo 1 ICW, Probabilidad de corte 0.65

El modelo 2 ICW tiene una precisión alta 88.8%, también se aprecia, en la tabla 33, que la sensibilidad es baja comparada con especificidad pues existe un exceso de falsos negativos (puntos con dilución real y sin dilución en el modelo), por ende el modelo tiende subestimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. Hay un error del PED total para los verdaderos positivos es del 3% ($y=0.97$), como se aprecia en la figura 102, para una probabilidad de corte del 85%. El PED promedio del modelo es de 72.4% y el PED promedio real es de 67.9% (eliminando los datos de $PED > 100\%$). Los errores del PED están en su mayoría entre -10% a 10% y pocos puntos se escapan de más $|30\%|$ de error de PED (figura 103), lo que quiere decir que el modelo predice de buena forma el PED. En relación a la matriz de contingencia los falsos positivos se generan al suroeste de los verdaderos positivos, además el modelo no es capaz de predecir la dilución de los puntos ubicados en norte, como se aprecia en la figura 104. Las mayores diferencias entre el PED real y el modelado se encuentran en la parte central de los verdaderos positivos (figura 105).

Tabla 33: Estadísticos Modelo 2 ICW

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.85	46	382	25	29	61.3	93.9	88.8	77.6	25.5

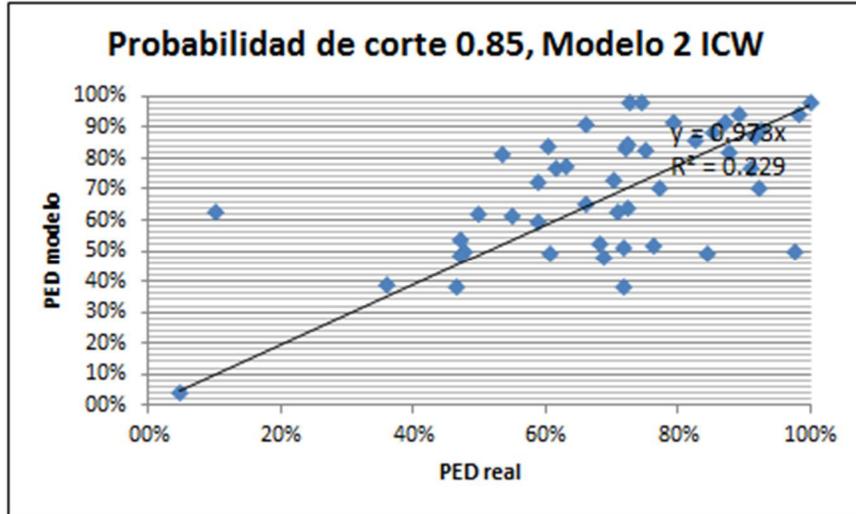


Figura 102: PED real vs PED modelado, Modelo 2 ICW, Probabilidad de corte 0.85

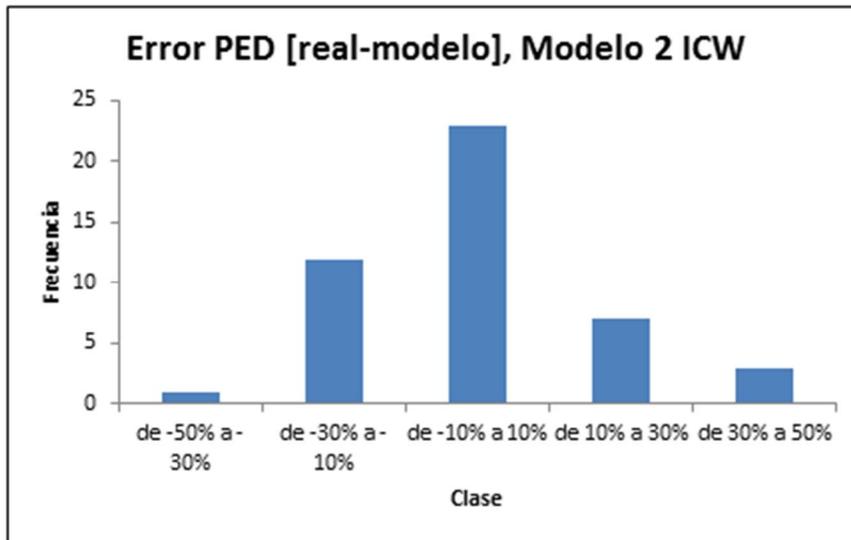


Figura 103: Histograma error PED [%], Modelo 2 ICW

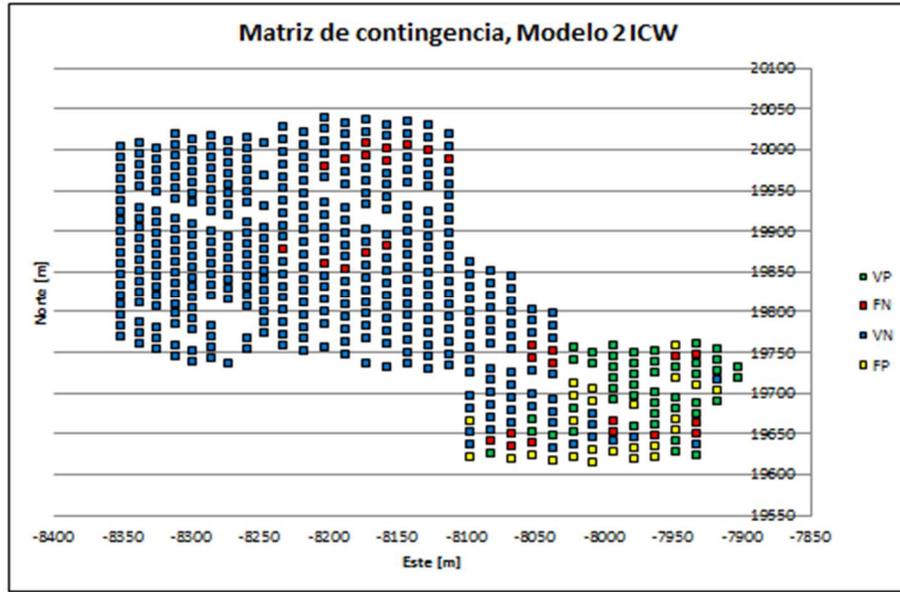


Figura 104: Matriz de contingencia, Modelo 2 ICW

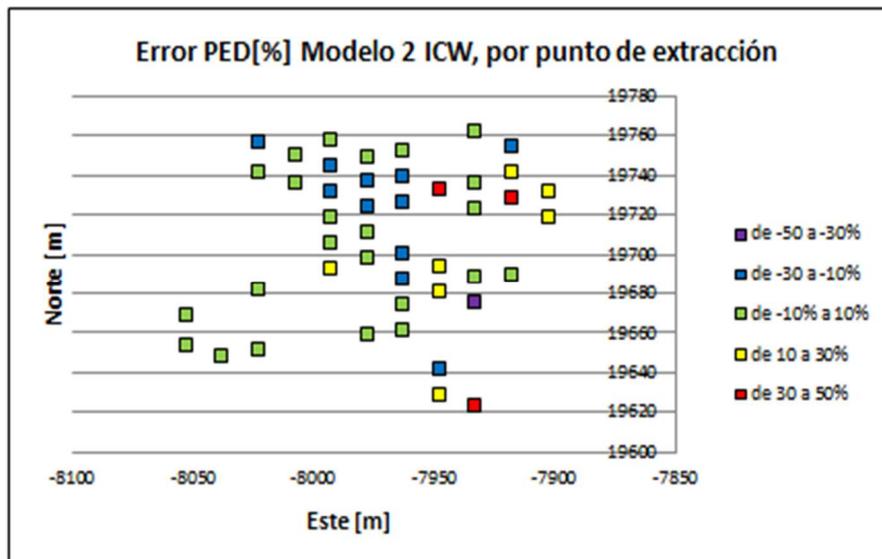


Figura 105: Error PED, Modelo 2 ICW, por punto de extracción (VP)

5.3.3. Calibración modelos IN

El modelo 1 IN tiene una precisión 77.7% (tabla 34) y un error del PED total para los verdaderos positivos del 37% ($y=0.63$), como se aprecia en la figura 106 para una probabilidad de corte del 80%. Este modelo tiene una precisión media y un alto error en el PED, debido que al incluir la variable velocidad se presentan entradas de dilución muy tempranas

Tabla 34: Estadísticos Modelo 1 IN

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]
0.80	226	224	73	56	80.1	75.4	77.7	77.8

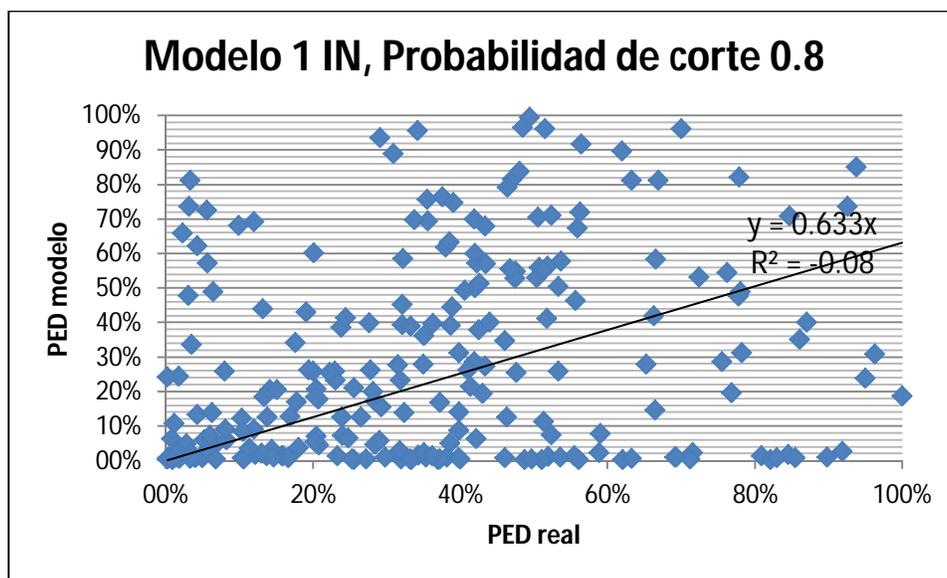


Figura 106: PED real vs PED modelado, Modelo 1 IN, Probabilidad de corte 0.80

El modelo 2 IN tiene una precisión 82.4%, de forma similar al sector IN se ve una clara diferencia entre la sensibilidad y la especificidad (tabla 35) pues existen muchos falsos negativos, puntos que tienen dilución en la realidad que el modelo los declara sin dilución, esto quiere decir que el modelo tiende a subestimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. El error del PED total para los verdaderos positivos del 32% ($y=0.68$), como se aprecia en la figura 107 para una probabilidad de corte del 65%. Este modelo tiene una mejor precisión y un menor error del PED, por ende se escoge este modelo para hacer un análisis más exhaustivo. El PED promedio del modelo es de 31.5% y el PED real promedio es de 39.2%. Los errores del PED se concentran entre $[-10\%; 10\%]$, es decir, el modelo estima bien el PED, aunque hay errores sobre $|50\%|$ y se deben considerar el por qué ocurren (figura 108). En relación a la matriz de contingencia, se ve que el modelo no es capaz de predecir la dilución de los puntos ubicados en la zona norte (falsos negativos) como se aprecia en la figura 109. En la figura 110 se puede observar que, en la zona norte de los verdaderos positivos es donde existe las mayores diferencias negativas del PED (real – modelado), es decir, el modelo subestima el PED, en cambio en la zona sur, existen las mayores diferencias positivas del PED, o sea, el modelo en esa zona sobrestima el PED.

Tabla 35: Estadísticos Modelo 2 IN

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.65	189	288	9	93	67.0	96.9	82.4	82.0	30.5

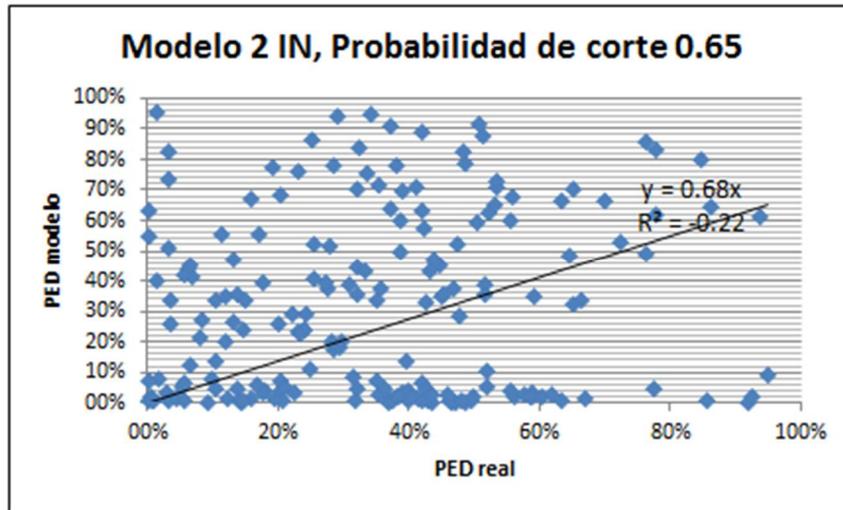


Figura 107: PED real vs PED modelado, Modelo 2 IN, Probabilidad de corte 0.65

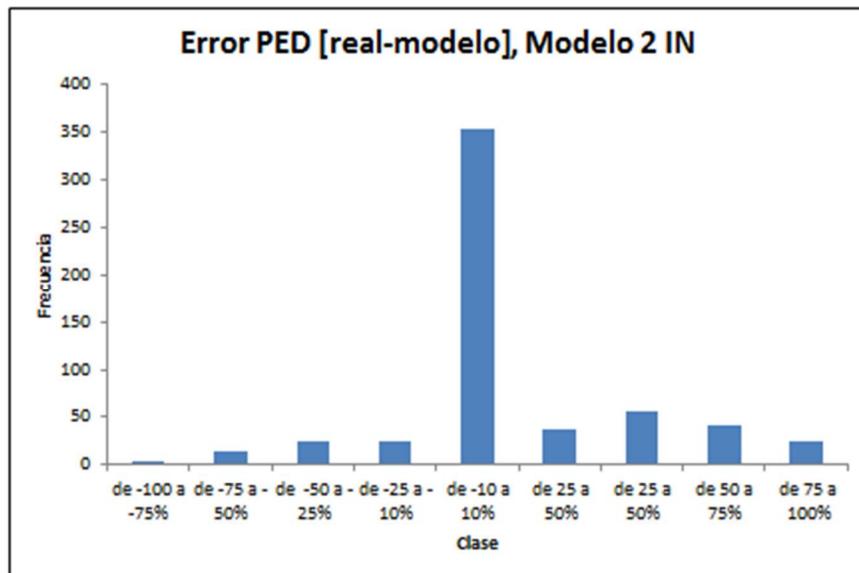


Figura 108: Histograma error PED [%], Modelo 2 IN

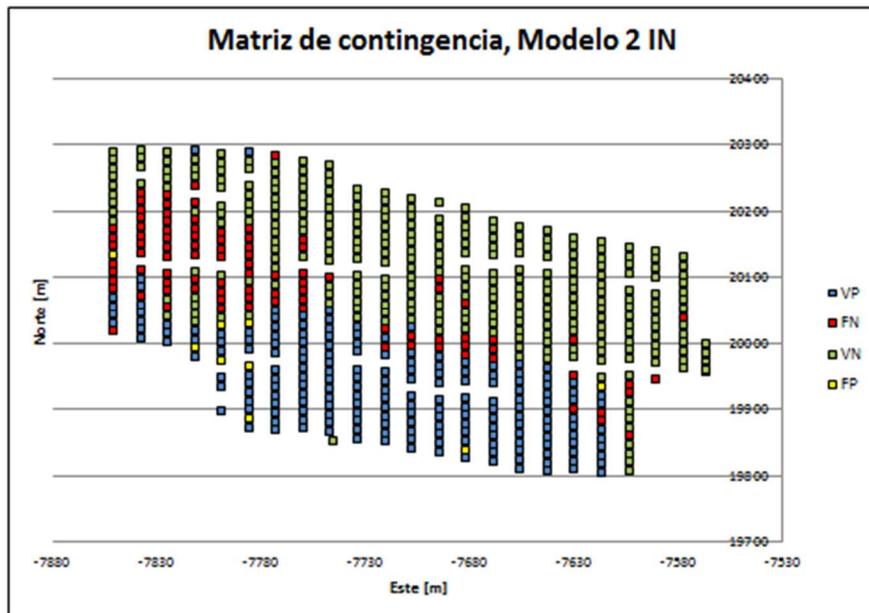


Figura 109: Matriz de contingencia, Modelo 2 IN

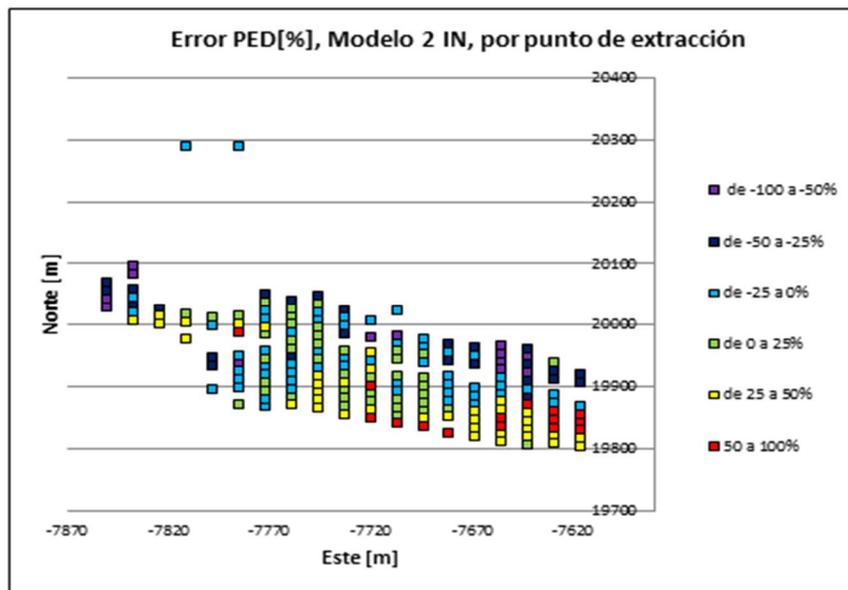


Figura 110: Error PED, Modelo 2 IN, por punto de extracción (VP)

5.3.4. Calibración Modelos IW

El modelo 1 IW tiene una confiabilidad del 67.2% (tabla 36) y un error del PED total para los verdaderos positivos es de 56% (figura 111). Por ende queda descartado como modelo válido para el sector.

Tabla 36: Estadísticos Modelo 1 IW

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]
0.85	73	62	20	46	61.3	75.6	67.2	68.5

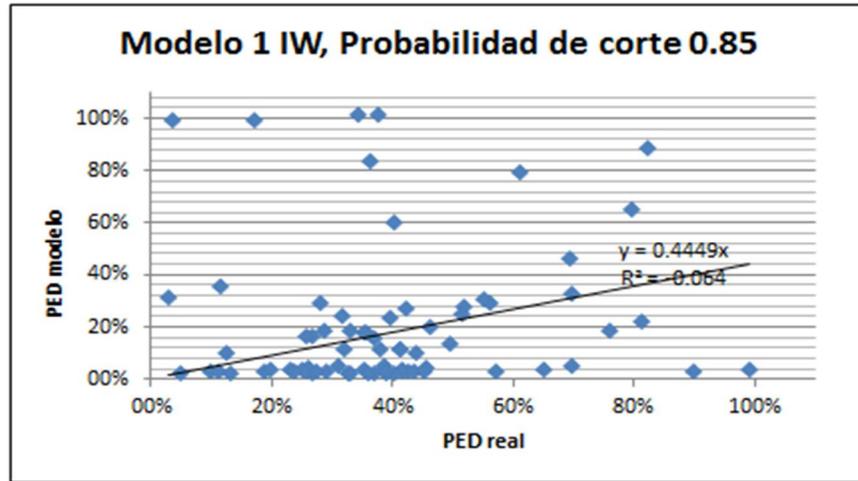


Figura 111: PED real vs PED modelado, Modelo 1 IW, Probabilidad de corte 0.85

El modelo 2 IW tiene una confiabilidad del 76.1%, la sensibilidad y la especificidad son más similares que los sectores ICW e IN (tabla 37). El error del PED total para los verdaderos positivos de 22% (figura 112) para una probabilidad de corte del 65%. Este modelo tiene una mejor precisión y un menor error del PED, por ende se escoge este modelo para hacer un análisis más exhaustivo. El PED promedio del modelo es de 39.3% y el PED real promedio es de 42.6%. Los errores del PED se concentran entre [10; 50%], por ende este modelo tiende a sobrestimar la dilución, en términos de predecir su entrada antes del dato real (figura 113). En relación a la matriz de contingencia, el modelo no es capaz de predecir la entrada de dilución al norte y al sur de los verdaderos positivos, además se aprecia que los falsos positivos se concentran al oeste de los verdaderos positivos, esto se ve en la figura 114. En la figura 115 se observa que, las mayores diferencias del PED en los verdaderos positivos se encuentran en los costados este y oeste de la zona sur.

Tabla 37: Estadísticos Modelo 2 IW

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.65	87	66	16	32	73.1	80.5	76.1	76.8	38.5

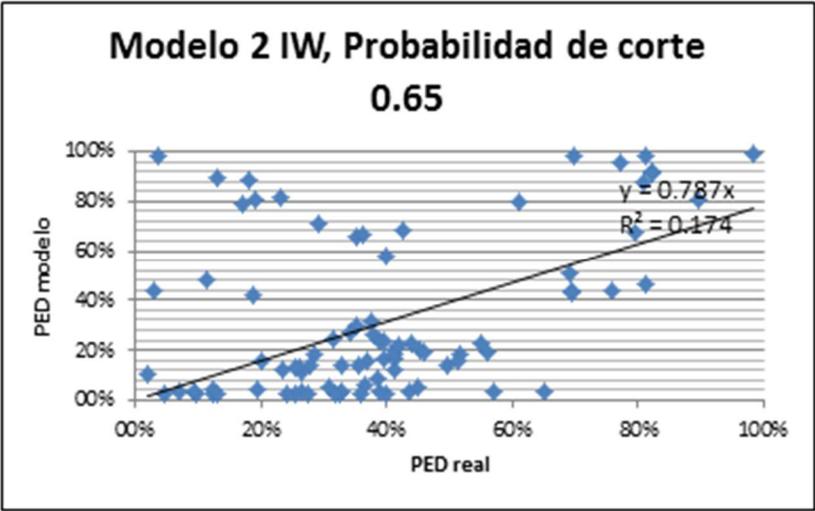


Figura 112: PED real vs PED modelado, Modelo 2 IW, Probabilidad de corte 0.65

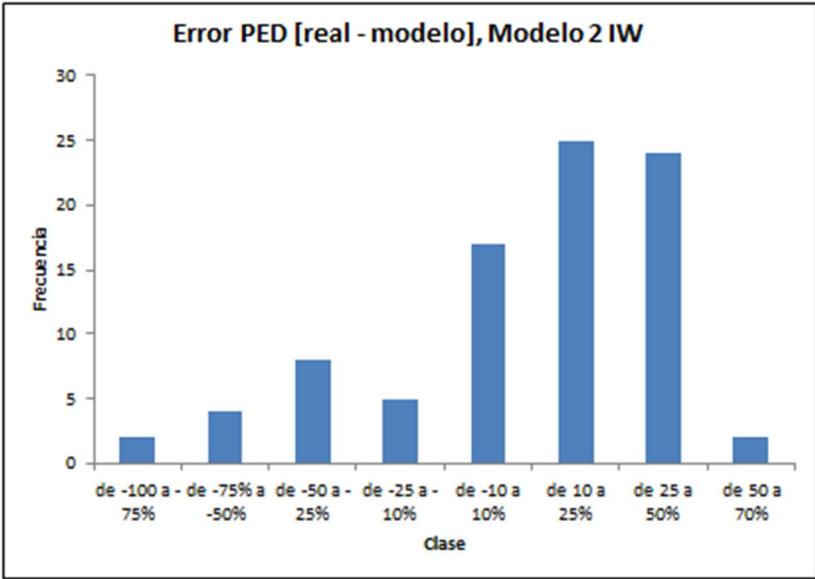


Figura 113: Histograma error PED [%], Modelo 2 IW

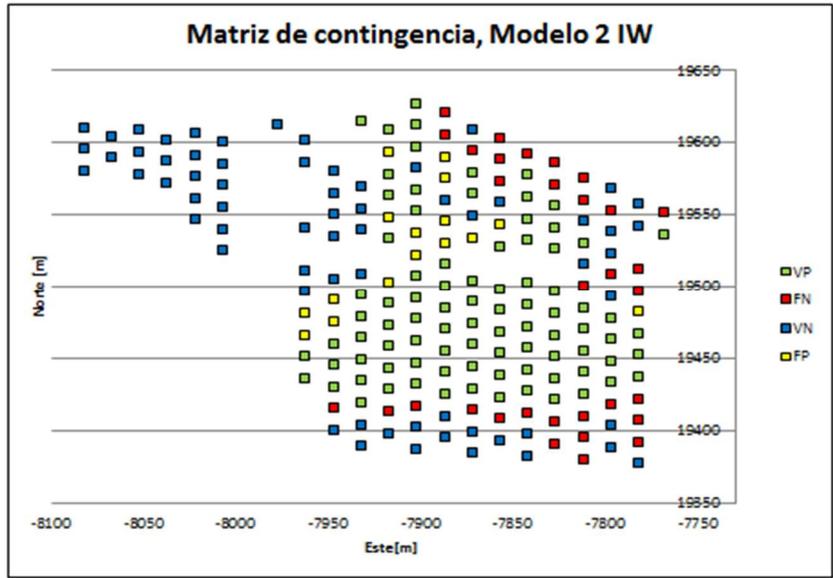


Figura 114: Matriz de contingencia, Modelo 2 IW

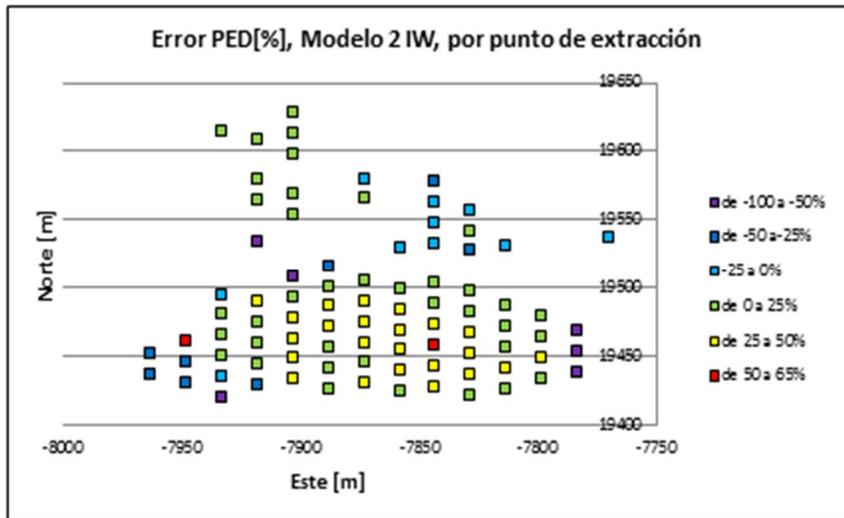


Figura 115: Error PED, Modelo 2 IW, por punto de extracción (VP)

5.4. Análisis modelos Multivariables

Los modelos se han construido con distintas variables, pues se ha intentado ajustar lo mejor posible los modelos a la realidad. Pero se puede concluir que dependiendo de la forma de ingreso de la dilución son las variables que importan, porque los modelos de ICE e IN son similares y los 2 tienen entrada de dilución lateral (Paredes, 2012) como mecanismo de dilución, en cambio difieren del sector ICW y del sector IW. El único sector que aceptó la variable % columna extraída fue ICW y se puede deber a que su mecanismo de entrada de dilución es vertical (Paredes, 2012).

Se han utilizado variables operacionales con rangos temporales de corto plazo (menor o igual a 30 días), pues dentro de los objetivos esta predecir la entrada de dilución en ese período de tiempo.

En relación a la calibración de los modelos, se debe tener en cuenta que se quiere encontrar la probabilidad de corte óptima para que, por un lado maximice la precisión y confiabilidad y por otro parte minimice el error del PED. Esto puede ser algo no trivial de realizar.

De los modelos obtenidos, se observa que el uso de regresión logística permite la utilización de las Odds Ratio, con las cuales es posible variar unidades de las variables independientes y así lograr determinar con qué parámetros sería posible reducir el riesgo de ingreso de dilución a una escala operacional, consiguiendo así una eventual aplicación industrial para llevar a cabo la evaluación de planes a corto plazo. Sin embargo, dada la cantidad de variables no es tan simple realizar una guía práctica para retrasar la entrada de la dilución.

No se ha podido incluir la variable velocidad en la mayoría de los modelos, pues no dan buenos resultados, aun cuando en base al estudio exploratorio de datos y al análisis univariable debería ser incluida en los modelos. La explicación es que, en muchos puntos cuando comienza la extracción (los primeros días) las velocidades son muy elevadas, por ende, los modelos predicen inmediatamente la entrada de dilución. Entonces falta estudiar como poder incluir esta variable sin dañar los resultados de los modelos.

Los modelos de regresión logística multivariable resultan capaces de predecir la entrada temprana de dilución a los puntos de extracción, pues tienen una alta precisión, sobre 80%, a excepción de IW. Los modelos tienen una tendencia a subestimar los puntos diluidos, pues la sensibilidad es menor a la especificidad, lo que quiere decir que existen falsos negativos, o sea, puntos con dilución que el modelo no los predice así. Los errores del PED no son muy altos, a excepción de IW donde el RMSE es del 38.5%. En la tabla 38 se presenta un resumen de los resultados de los modelos.

Tabla 38: Resumen estadísticos Modelos Multivariables

Sector	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	RMSE PED [%]
ICE	86.4	95.2	91.6	24.4
ICW	61.3	93.9	88.8	25.5
IN	67.0	96.9	82.4	30.5
IW	73.1	80.5	76.1	38.5

En la tabla 39, se realiza un análisis comparativo de la importancia de las variables de cada sector.

Tabla 39: Análisis comparativo variables de los modelos

Variable	β de la variable				Comentario
	ICE	ICW	IN	IW	
% Vecinos con dilución	4.45	7.75	4.61	5.38	En todos los sectores, el % de vecinos con dilución es una variable muy importante, pues los β son altos, pero resulta más significativo en el sector ICW.
Altura columna in-situ [m]	-0.010	-0.029	-0.013	-0.016	La altura de columna in-situ es una variable que resulta ser de valor similar en los sectores ICE, IN e IW. En el ICW tiene una importancia mayor.
Uniformidad [%]	-0.86	-0.65	-2.81	-6.51	La uniformidad varía su importancia dependiendo del sector donde se analiza. Se ve claramente que en sector IW es donde la uniformidad es más importante, es decir, que a menores cambios de la uniformidad resultan cambios significativos en la probabilidad de entrada de dilución. Por otra parte sectores como ICE e ICW, la uniformidad no tiene tanto preponderancia en la probabilidad de entrada de dilución, es decir, que cambios en la uniformidad no varía en demasía la probabilidad de ingreso de dilución.
Velocidad de extracción [ton/(m ² *día)]	-	-	-	1.15	La velocidad de extracción solo resulta ser una variable explicativa del fenómeno en el sector IW, por ende, no es posible realizar un comparación.
% Columna in-situ extraída	-	1.39	-	-	El % de extracción de columna in-situ solo resulta ser una variable explicativa del fenómeno en el sector ICW, por ende, no es posible realizar una comparación.

No es conveniente dar recomendaciones operacionales generales pues como se observa en la tabla 39, por una lado la velocidad solo resulta ser una variable explicativa en el sector IW; y por otro parte, la uniformidad tiene importancias relativas (β) diferentes en cada uno de los sectores, por ende, no se puede dar una “receta” general para toda la mina. Lo que se puede dar es zonificar condiciones de riesgo dependiendo de la uniformidad, dejando fijos las otras variables. En el sector ICE (figura 116), se aprecia que, bajos muchas condiciones (muchos vecinos con dilución, bajas alturas), el riesgo es alto independiente de la uniformidad con la se extrae, entonces no se podría dar una recomendación operacional, pero si en otras condiciones si se podría dar sugerencias operacionales, como por ejemplo tener una extracción con una uniformidad sobre el 50%.

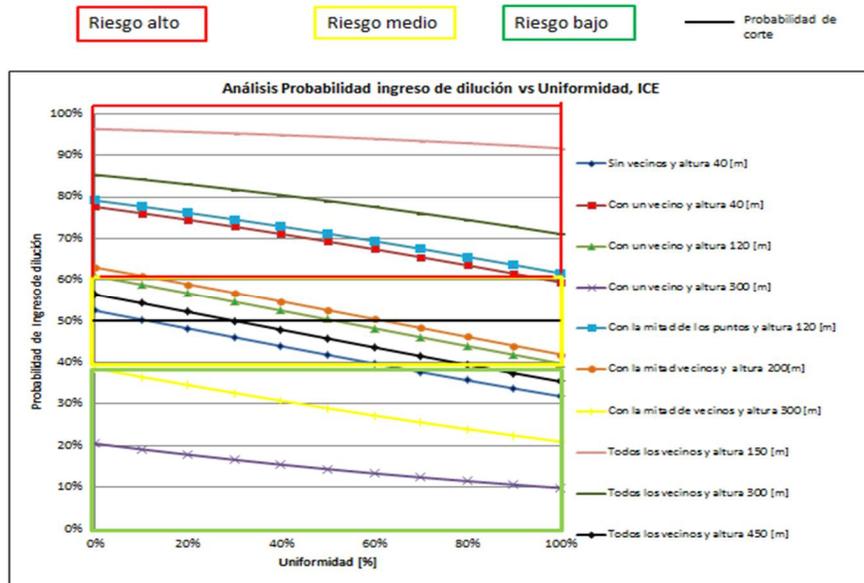


Figura 116: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, ICE

En el sector ICW (figura 117), existen condiciones (de vecinos con dilución, altura y % de extracción de columna in-situ), que exigen uniformidades muy altas para no tener alto riesgo de entrada de dilución (cercano al 70%-80%), pero también hay otras que requieren uniformidades mucho más bajas (20%-30%) para estar en la zona de bajo riesgo. Por ende, se podría dar una recomendación general de estar siempre por sobre el 70-80% de uniformidad, pero, se perdería flexibilidad en zonas que lo anterior no es tan necesario.

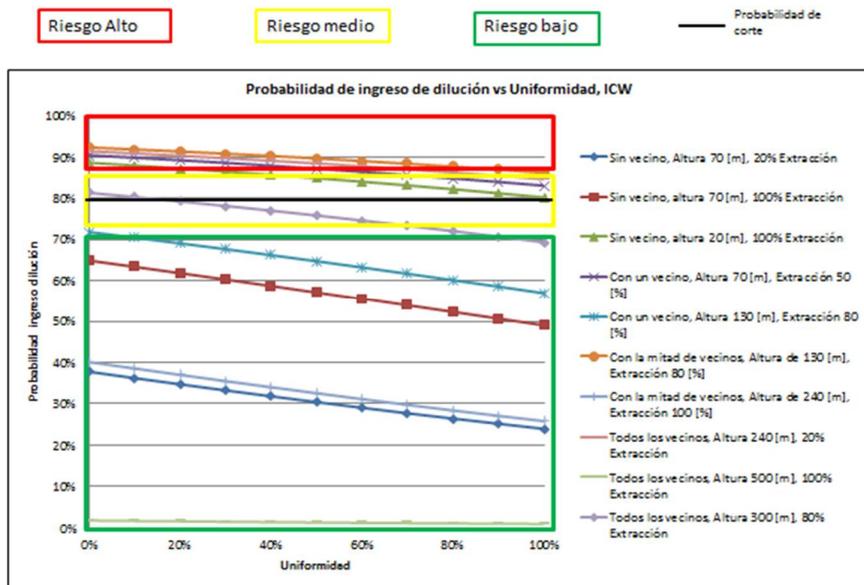


Figura 117: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, ICW

En el sector IN (figura 118), la uniformidad tiene una mayor importancia, pues cambios en la uniformidad generan variaciones importantes en el riesgo de ingreso de dilución, en general uniformidades sobre el 40-50% implican riesgo bajo, salvo condiciones excepcionales.

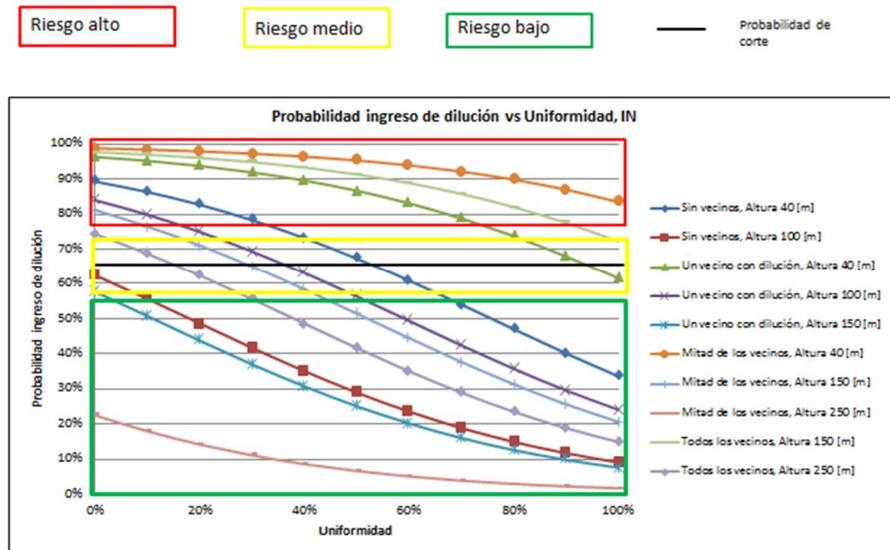


Figura 118: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, IN

En el sector IW (figura 119), la uniformidad es una variable muy relevante, pues se requiere sólo uniformidades sobre el 20-25%, para tener bajo riesgo de ingreso de dilución, pues como se ha visto en el estudio exploratorio de datos, es este sector las uniformidades son extraordinariamente bajas y los puntos sin dilución son los que tienen algo de uniformidad en su extracción.

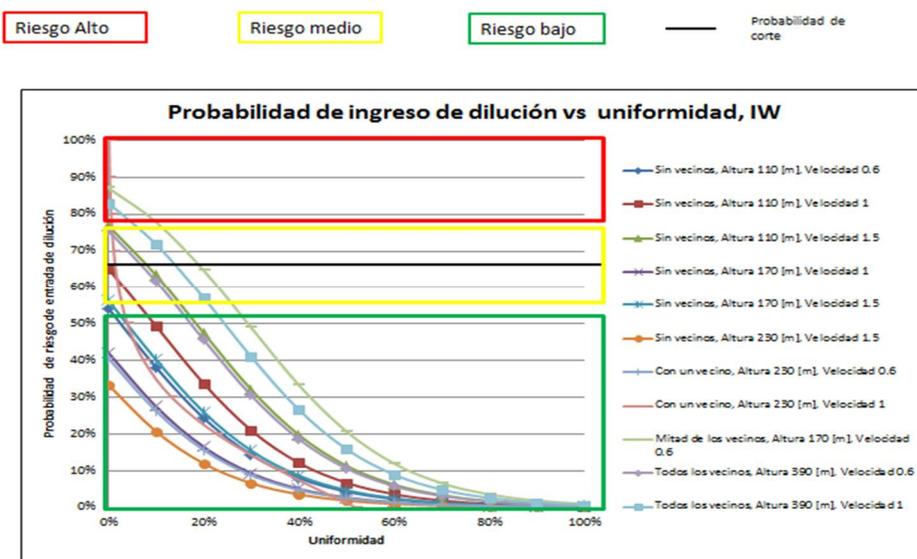


Figura 119: Análisis de riesgo en función de la uniformidad, IW

5.5. Validación modelo Andina (Cifuentes, 2017)

En función de comparar los modelos anteriormente propuestos (Capítulo 5.2.) con el modelo que plantea Cifuentes (2017) para el sector LHD de Andina, se simula el modelo de Andina en los 4 sectores de El Salvador y se analizan los resultados. Este ejercicio es una forma de validar el modelo propuesto por Cifuentes (2017).

El modelo multivariables construido para Andina cuenta con 4 variables, que se muestran en la tabla 40. Los resultados de la calibración del modelo elaborado por Cifuentes (2017) muestran una precisión del 86% y error promedio en el tonelaje del 11% para el Cluster LHD de Andina.

Tabla 40: Modelo Multivariable Andina (Cifuentes, 2017)

Variable	β	Sig.	Comentario (Odds ratio)
% Vecinos con dilución	4.99	0.00	Un aumento de 15% en el porcentaje de vecinos con dilución, implica que hay 2.11 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
% Columna extraída	2.99	0.00	Un aumento de 10% de columna extraída, implica que hay 1.35 veces más de probabilidad de ingreso de dilución.
Altura primario [m]	-0.011	0.00	Un aumento de 10 [m] de altura de primario, implica que hay 0.90 menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Uniformidad cluster 30 días [%]	-1.29	0.06	Un aumento de 10% en la uniformidad del cluster en 30 días, implica que hay 0.88 menos de probabilidad de ingreso de dilución.
Constante	1.40	-	-

5.5.1. Validación Modelo Andina en ICE

En el sector Inca Central Este (ICE), el modelo de Cifuentes (2017) tiene una precisión de 85.7% para una probabilidad de corte del 65% (tabla 41), además existe una especificidad claramente mayor a la sensibilidad, pues existen muchos falsos negativos (puntos con dilución real y sin dilución en el modelo), lo que indica que el modelo tiende subestimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. El PED promedio real es 48.9% y el PED promedio modelado es de 68.8%. Hay un error total del PED para los verdaderos positivos del 21% ($y=1.21$), como se aprecia en la figura 120. El modelo subestima el PED, pues la mayoría de los errores del PED [real-modelado] se encuentran entre -50% a -10%, es decir, el modelo muestra una entrada de dilución más tardía que la real (figura 121). En relación a la matriz de contingencia se observa en la figura 122 que los falsos positivos se encuentran en la vecindad de un verdadero positivo. Las mayores diferencias entre PED real y modelado, se dan en la zona sur de los verdaderos positivos (figura 123).

Tabla 41: Estadísticos Modelo Andina en ICE

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.65	40	50	2	13	75.5	96.2	85.7	87.3	38.5

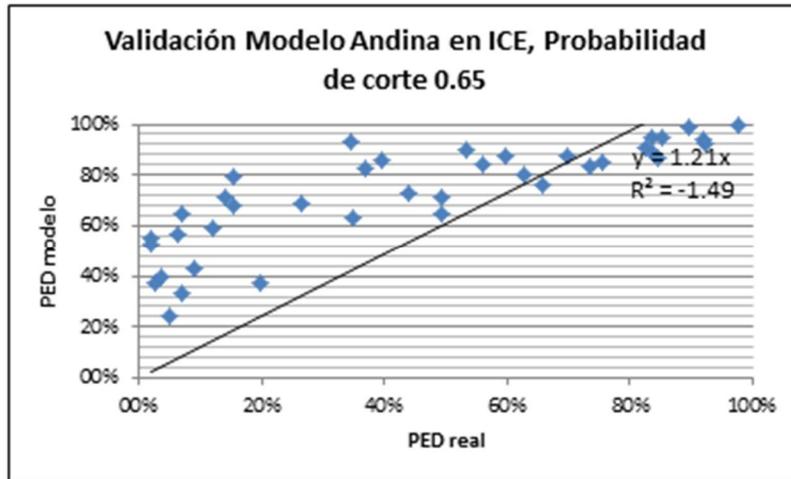


Figura 120: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en ICE, Probabilidad de corte 0.65

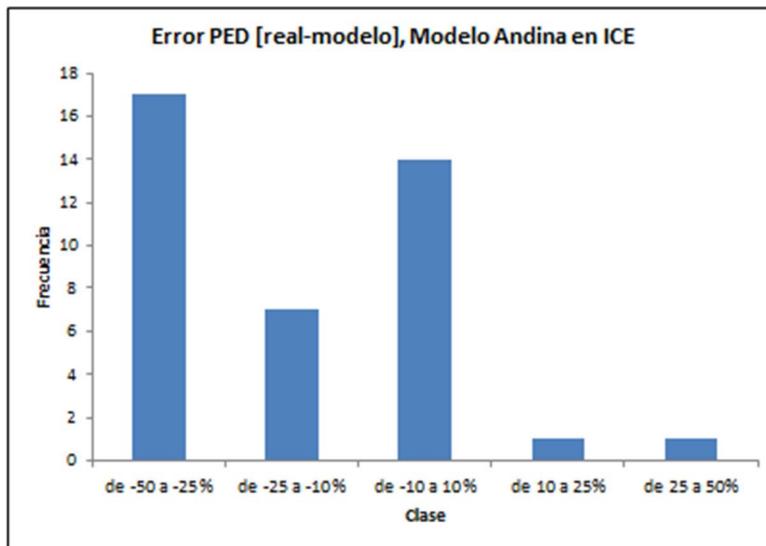


Figura 121: Histograma error PED [%], Modelo Andina en ICE

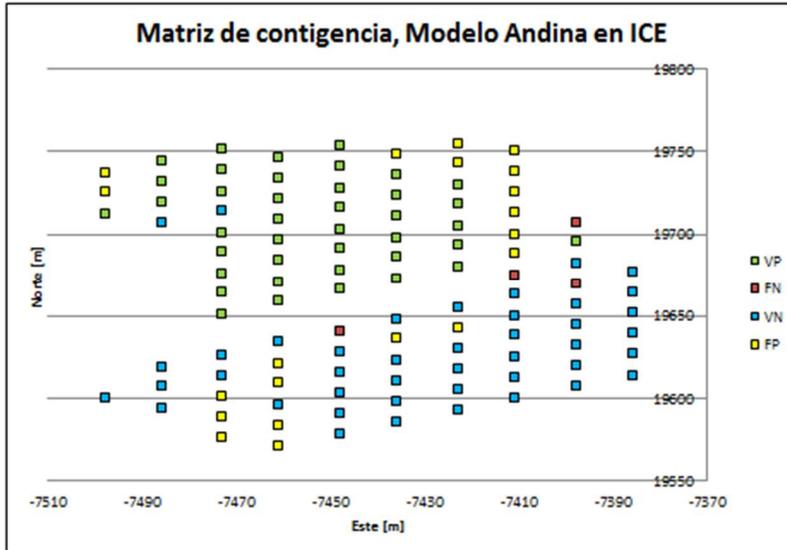


Figura 122: Matriz de contingencia, Modelo Andina en ICE

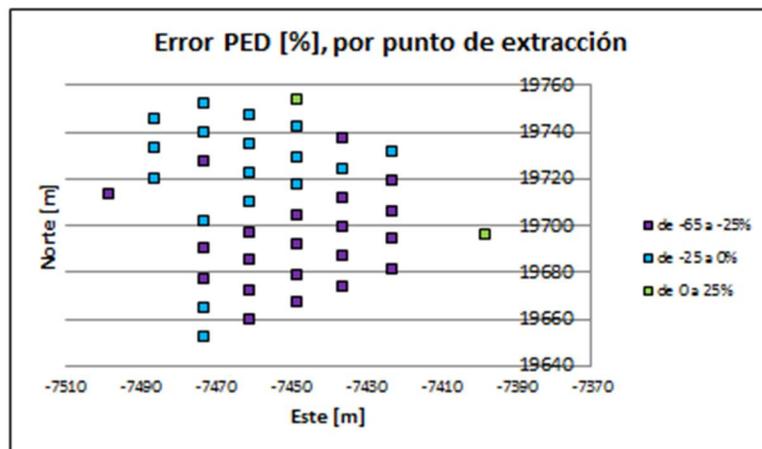


Figura 123: Error PED, Modelo Andina en ICE, por punto de extracción (VP)

5.5.2. Validación Modelo Andina en ICW

En el sector Inca Central Oeste (ICW), el modelo de Cifuentes (2017) tiene una precisión de 79.3% para una probabilidad de corte del 65% (tabla 42), no hay una gran diferencia entre la sensibilidad y la especificidad, por ende no tiene un sesgo al estimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. El PED promedio real es 67.9% y el PED promedio modelado es de 79.2%. Hay un error total del PED para los verdaderos positivos del 5% ($y=1.05$), como se aprecia en la figura 124. En el histograma de la figura 125, muestra que la mayoría de los errores del modelo no superan el $|25\%|$ de error, es decir, el modelo predice de buena forma el PED. En relación a la matriz de contingencia se observa en la figura 126 que los falsos positivos son muchos y se encuentran concentrados al oeste de los verdaderos positivos.

Tabla 42: Estadísticos Modelo Andina en ICW

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.80	53	328	78	22	70.7	80.8	79.3	75.8	37.8

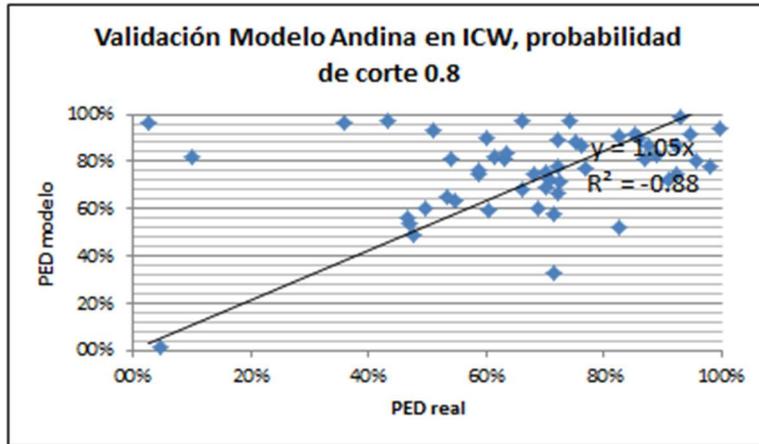


Figura 124: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en ICW, Probabilidad de corte 0.8

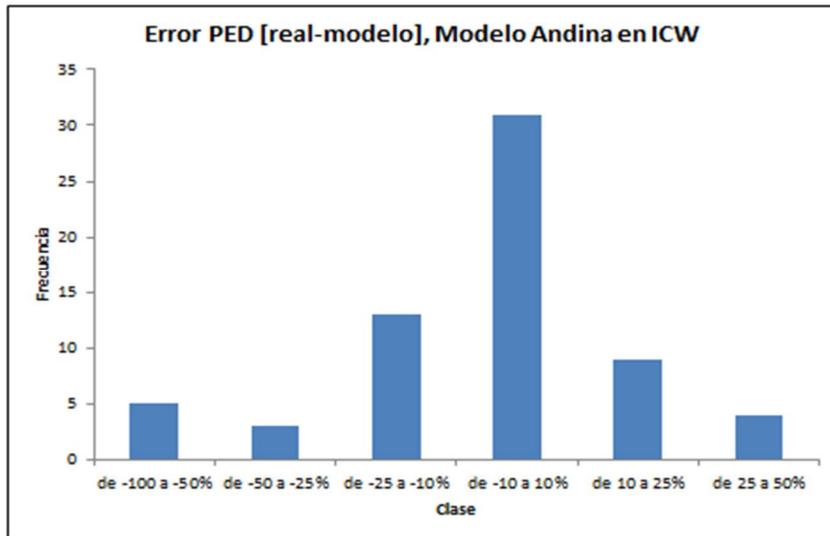


Figura 125: Histograma error PED [%], Modelo Andina en ICW

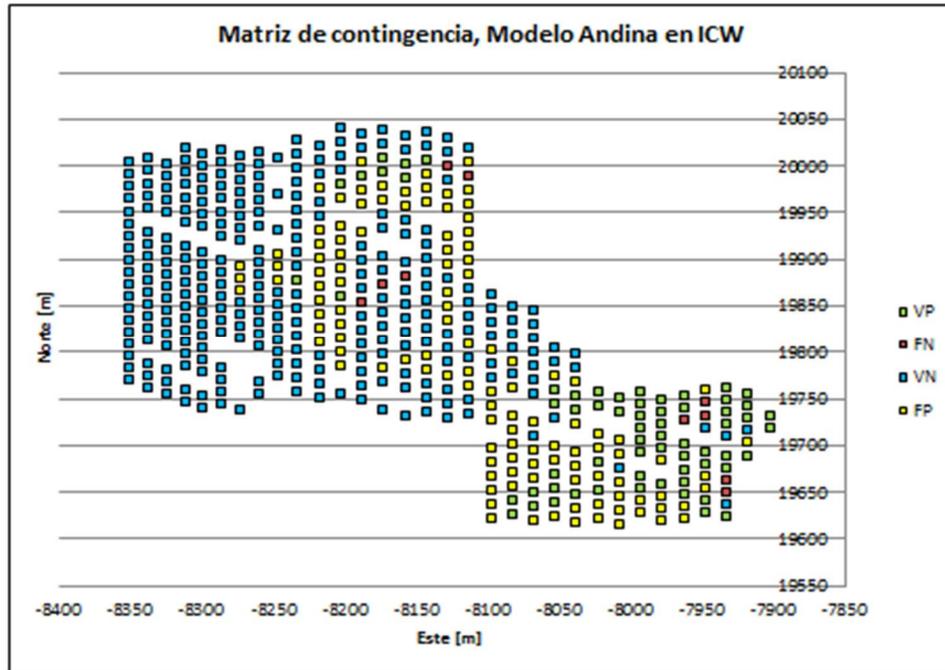


Figura 126: Matriz de contingencia, Modelo Andina en ICW

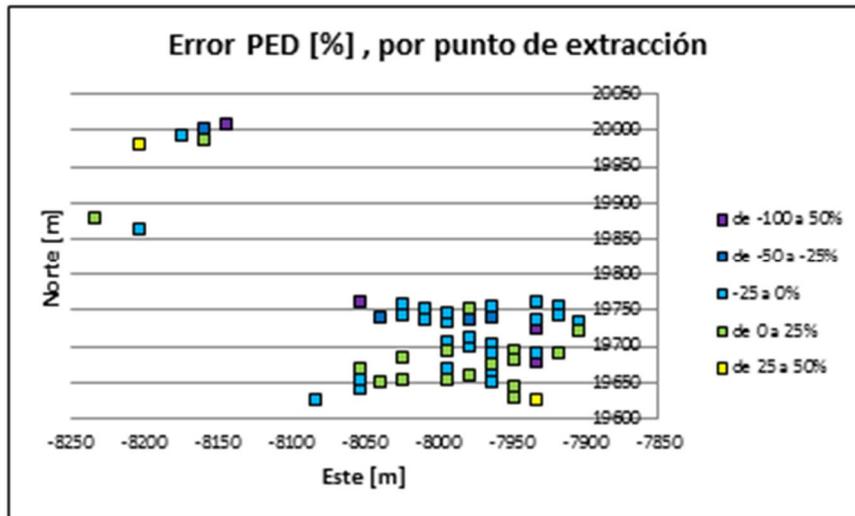


Figura 127: Error PED, Modelo Andina en ICW, por punto de extracción (VP)

5.5.3. Validación Modelo Andina en IN

En el sector Inca Norte (IN), el modelo de Cifuentes (2017) tiene una precisión de 79.3% para una probabilidad de corte del 50% (tabla 43), hay una sensibilidad mucho mayor a la especificidad, pues hay una gran cantidad falsos positivos (puntos sin dilución en la realidad que el modelo les predice dilución), lo que indica que el modelo sobrestima la entrada de dilución a los puntos de extracción. El PED promedio real es 39.2% y el PED promedio modelado es de 55.2%. Hay un error total del PED para los verdaderos positivos

del 4% ($y=1.04$), como se aprecia en la figura 128. En el histograma de la figura 129, muestra que la mayoría de los errores del modelo no superan el $|25\%|$ de error, pero existe una concentración entre $[-50$ a $-10\%]$ de error, lo que quiere decir que el modelo estima de buena forma el PED, pero con una pequeña tendencia a declarar una entrada de dilución más tardía a la real. En relación a la matriz de contingencia se observa en la figura 130 que los falsos positivos se encuentran al norte de los puntos verdaderos positivos. En la figura 131, se aprecia que la mayoría de los errores del PED [real- modelado] positivos se encuentran en la zona norte de los verdaderos positivos.

Tabla 43: Estadísticos Modelo Andina en IN

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.50	265	126	171	17	94.0	42.4	67.5	68.2	39.8

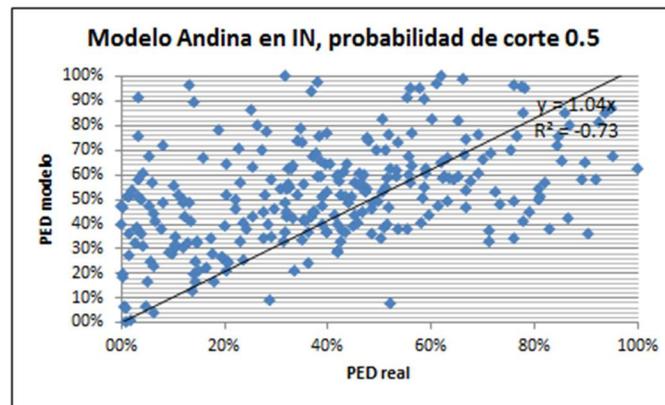


Figura 128: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en IN, Probabilidad de corte 0.5

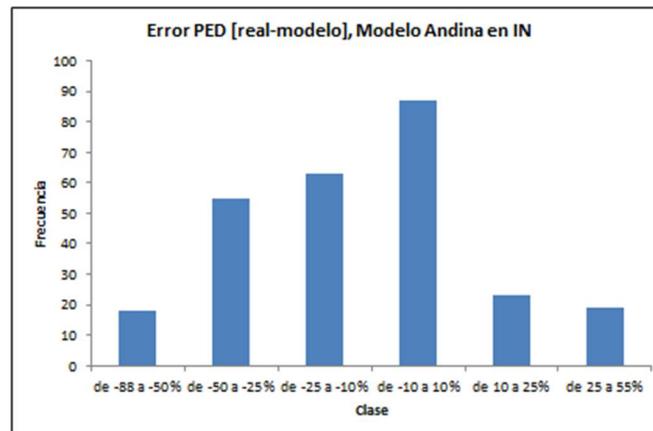


Figura 129: Histograma error PED [%], Modelo Andina en IN

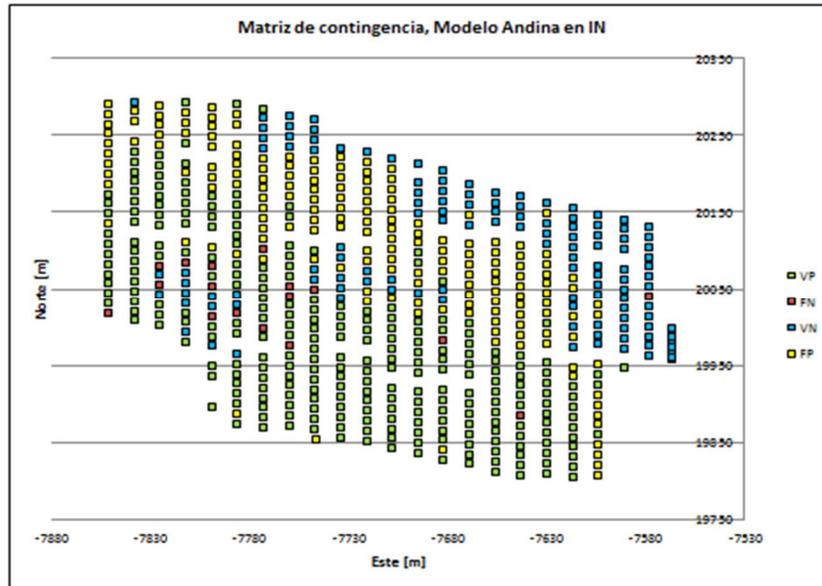


Figura 130: Matriz de contingencia, Modelo Andina en IN

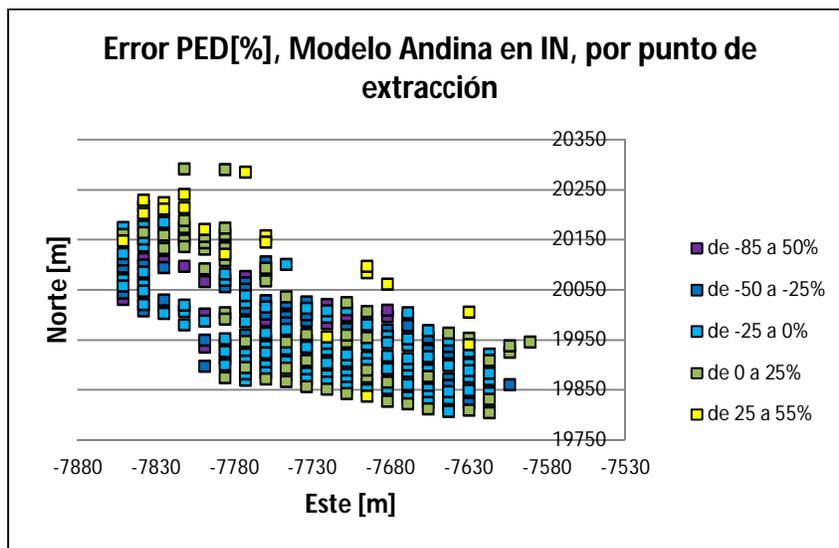


Figura 131: Error PED, Modelo Andina en IN, por punto de extracción (VP)

5.5.4. Validación Modelo Andina en IW

En el sector Inca Norte (IW), el modelo de Cifuentes (2017) tiene una precisión de 75.1% para una probabilidad de corte del 25% (tabla 44), la sensibilidad es mucho mayor a la especificidad, pues existen muchos falsos positivos, lo que revela que el modelo sobrestima la entrada de dilución a los puntos de extracción. El PED promedio real es 42.6 % y el PED promedio modelado es de 50.0%. Hay un error total del PED para los verdaderos positivos del 5% ($y=0.95$), como se aprecia en la figura 132. En el histograma de la figura 133, muestra que la mayoría de los errores en el PED del modelo, se concentran fuertemente en

la parte negativa, es decir, se subestima el PED, se predice una entrada de dilución más tardía a la real. En relación a la matriz de contingencia se observa en la figura 134 que los falsos positivos se encuentran en la misma zona donde están los verdaderos positivos, o sea, el modelo indica que por estar en la vecindad de la dilución también se deberían encontrar diluidos. En la figura 135, se aprecia que los puntos sobrestimados (PED real –PED modelado, positivo) se encuentran en la zona norte de los verdaderos positivos y los puntos subestimados se encuentran en la zona sur.

Tabla 44: Estadísticos Modelo Andina en IW

Probabilidad de corte	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
0.25	117	34	48	2	98.2	41.5	75.1	70.0	32.1

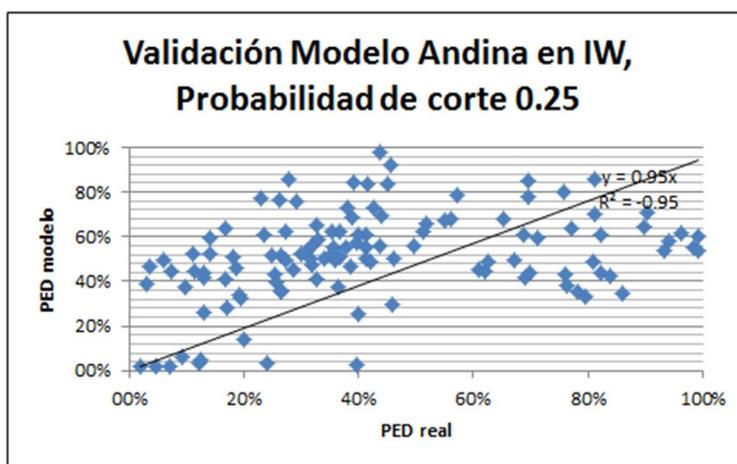


Figura 132: PED real vs PED modelado, Modelo Andina en IW, Probabilidad de corte 0.25

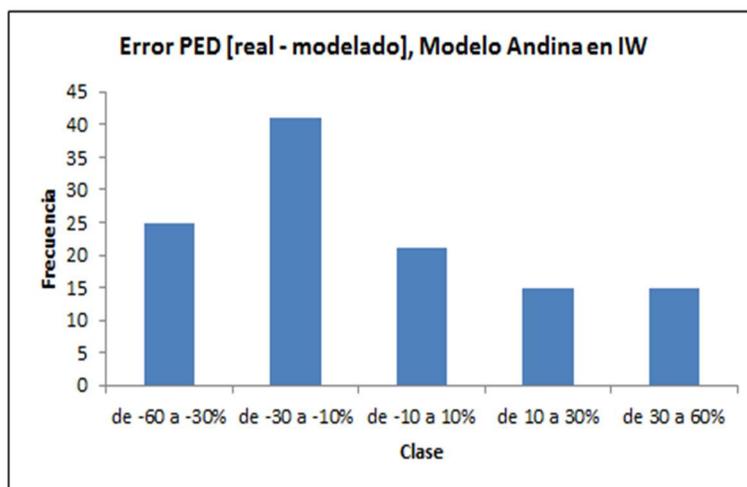


Figura 133: Histograma error PED [%], Modelo Andina en IW

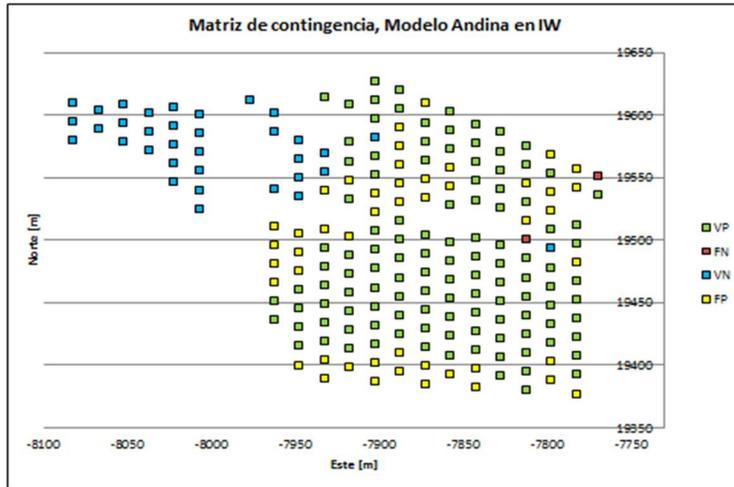


Figura 134: Matriz de contingencia, Modelo Andina en IW

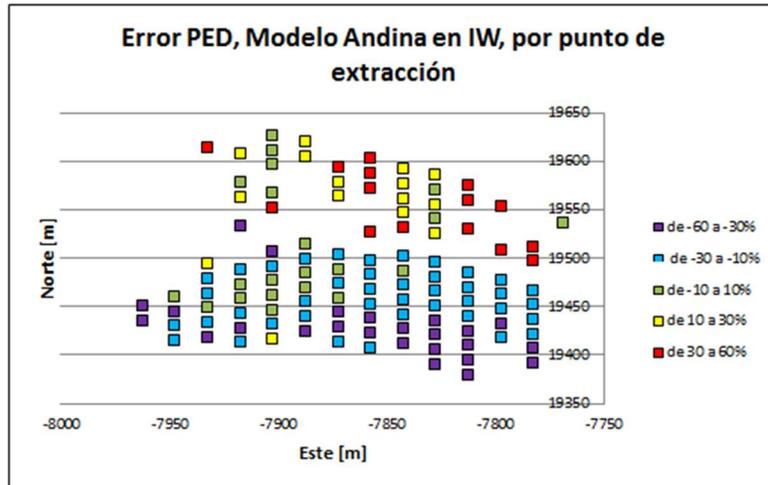


Figura 135: Error PED, Modelo Andina en IN, por punto de extracción (VP)

5.5. Capacidad de FlowSim de predecir la entrada temprana de la dilución

En esta sección se analiza la capacidad de predecir la entrada temprana de la dilución, es decir, un punto con un PED menor al 100%, de la herramienta de simulación FlowSim 2.0. Mediante el estudio realizado por Valencia (2014) se toman los datos de las simulaciones de las minas ICE, ICW e IN, y se filtran por los puntos que el simulador predice un PED menor a 100%.

5.5.1. FlowSim en ICE

FlowSim en ICE tiene una precisión del 65.4% (tabla 45), la cual es muy baja. La especificidad es un poco mayor que la sensibilidad, pues hay muchos falsos positivos, es decir, el simulador tiene una tendencia a sobrestimar los puntos con dilución. Existe un error total del PED para los verdaderos positivos del 36% ($y=1.36$) como se aprecia en la

figura 136. El PED promedio real es de 47.7% y el PED promedio simulado es de 67.1%. En el histograma de la figura 137, se aprecia que la mayoría de los puntos (verdaderos positivos) son subestimados, es decir, se predice una entrada de dilución más tardía que la realidad. El simulador no es capaz de predecir (FN) muchos puntos con dilución ubicados en el norte del sector, y en cambio, hay muchos que predice falsamente (FP) en la zona sur, como se observa en la figura 138.

Tabla 45: Estadísticos FlowSim en ICE

FlowSim	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED[%]
ICE	30	40	16	21	58.8	71.4	65.4	65.1	39.1

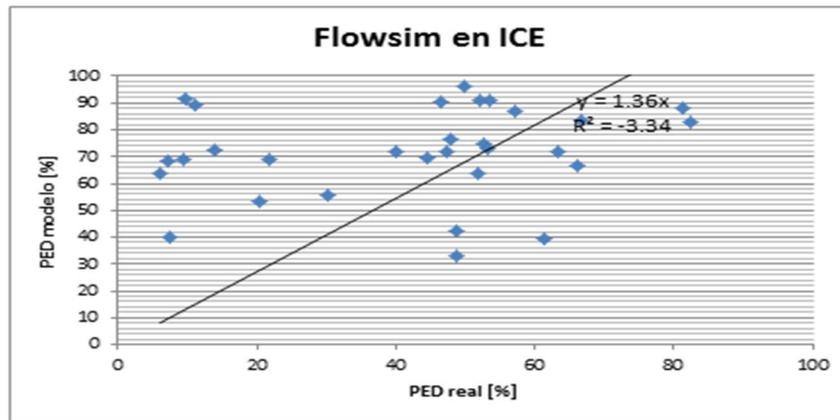


Figura 136: PED real vs PED modelado, FlowSim en ICE

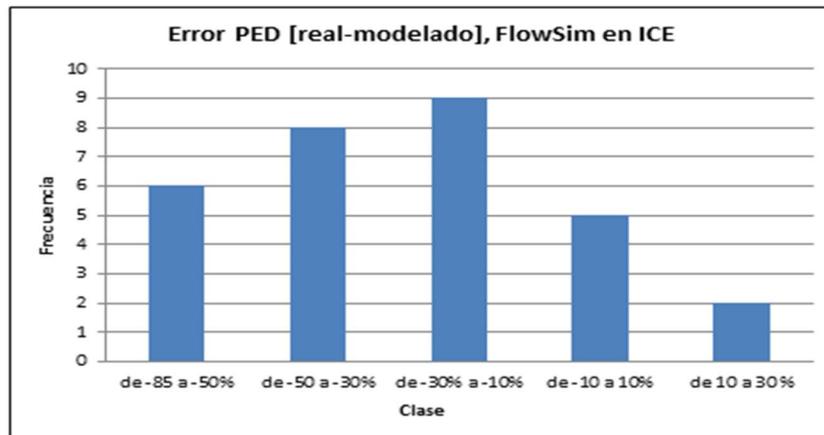


Figura 137: Histograma error PED [%], FlowSim en ICE

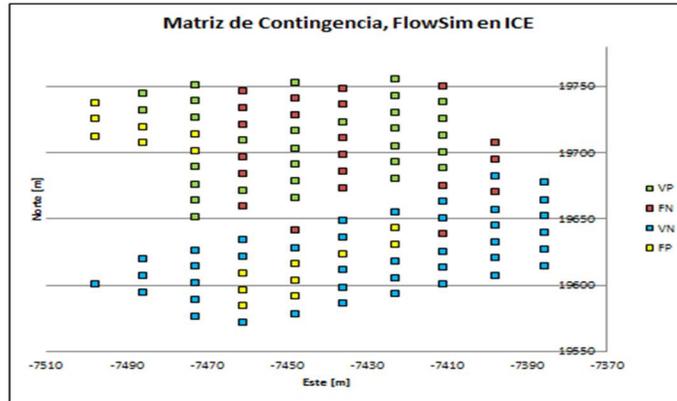


Figura 138: Matriz de contingencia, FlowSim en ICE

5.5.2. FlowSim en ICW

FlowSim 2.0 en ICW tiene una precisión del 75.9% (tabla 46), la especificidad es mayor la sensibilidad, pues existen muchos falsos positivos, es decir, el simulador tiene una tendencia a sobrestimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. Se tiene un error total del PED para los verdaderos positivos del 5% ($y=1.05$) como se aprecia en la figura 139. El PED promedio real es de 67.9% y el PED promedio simulado es de 81.5%. En el histograma de la figura 140, se evalúa que la mayoría de los puntos (verdaderos positivos) tienen un error $\pm 10\%$ entre el PED real y el PED simulado, es decir, que se simula de buena forma PED. El simulador tiene un error notable en simular falsos positivos en la zona central del sector (figura 141).

Tabla 46: Estadísticos FlowSim en ICW

FlowSim	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED [%]
ICW	45	310	87	26	63.4	78.1	75.9	70.7	42.3

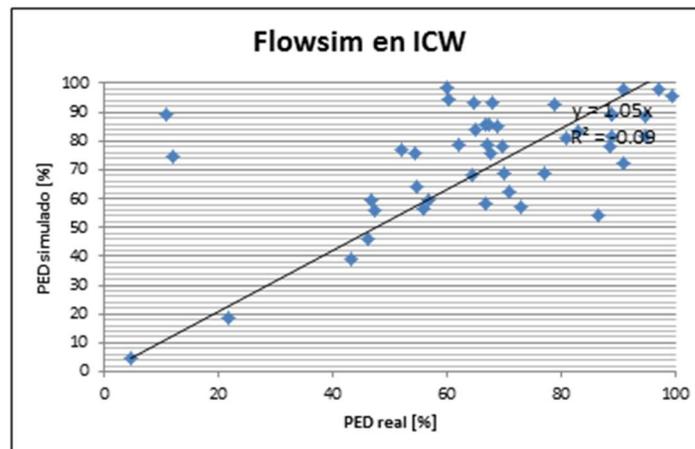


Figura 139: PED real vs PED modelado, FlowSim en ICW

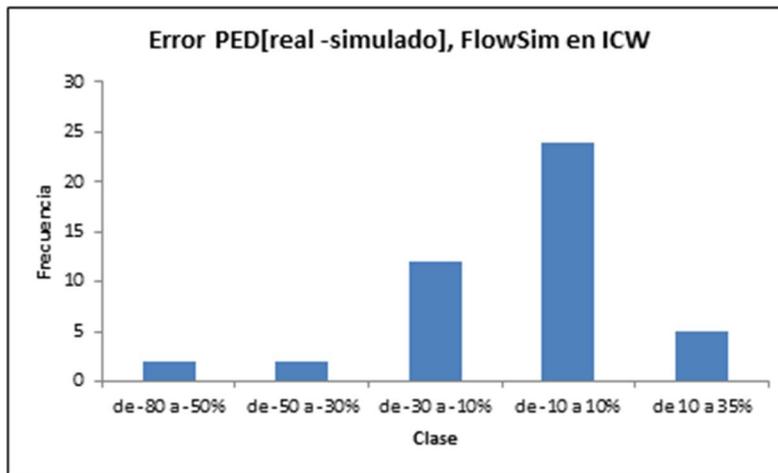


Figura 140: Histograma error PED [%], FlowSim en ICW

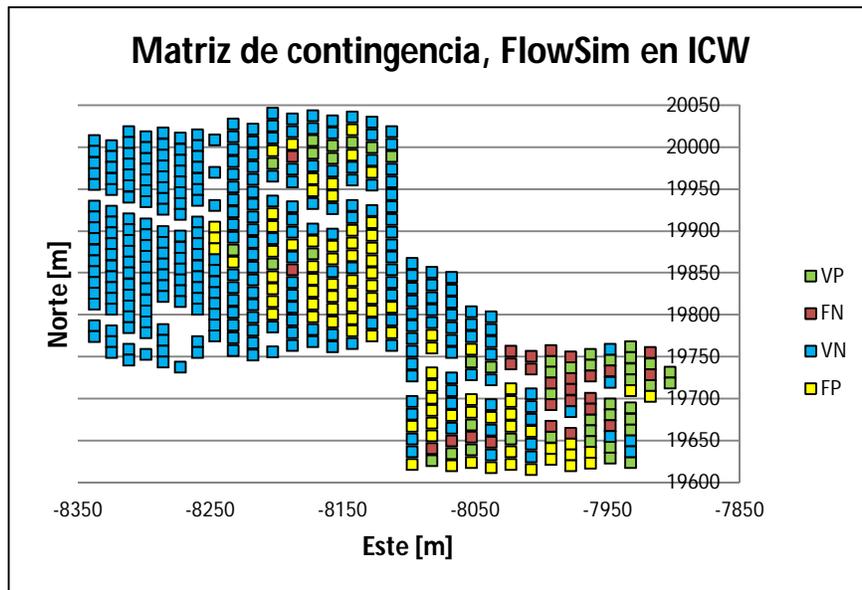


Figura 141: Matriz de contingencia, FlowSim en ICW

5.5.3. FlowSim en IN

FlowSim en IN tiene una precisión de sólo un 48.3% (tabla 47), la sensibilidad del simulador en este sector es bajísima, pues hay más falsos positivos que verdaderos positivos, es decir, FlowSim 2.0 tiene una clara tendencia a sobrestimar la entrada de dilución a los puntos de extracción. Se tiene un error total del PED para los verdaderos positivos del 28% ($y=1.28$) como se aprecia en la figura 142. El PED promedio real es de 39.2% y el PED promedio simulado es de 70.1%. En el histograma de la figura 143, se observa que en general se simula en forma tardía el PED, pues el PED real- PED simulado

es normalmente negativo. El simulador tiene un error notable en simular los puntos con y sin dilución (figura 144).

Tabla 47: Estadísticos FlowSim en IN

FlowSim	VP	VN	FP	FN	Sensibilidad [%]	Especificidad [%]	Precisión [%]	Confiabilidad [%]	RMSE PED[%]
IN	90	189	121	178	33.6	61.0	48.3	47.3	44.2

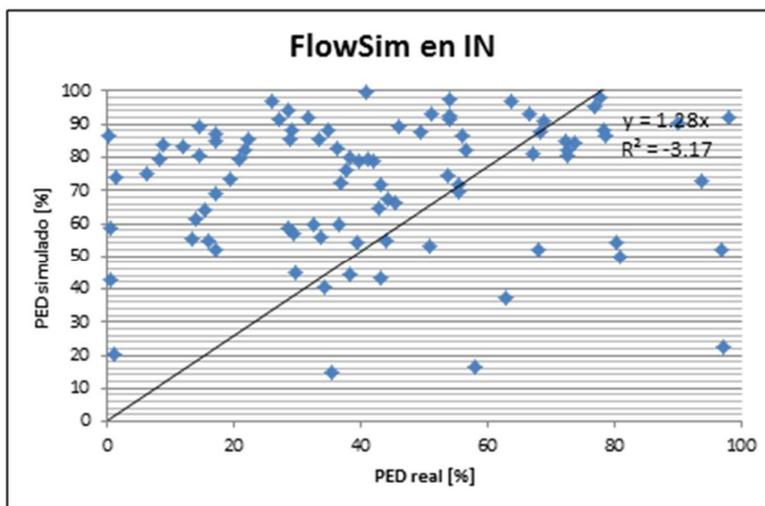


Figura 142: PED real vs PED modelado, FlowSim en IN

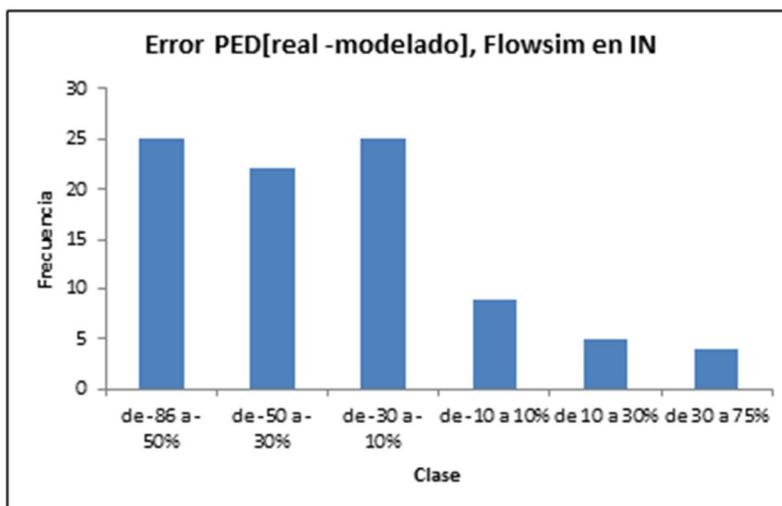


Figura 143: Histograma error PED [%], FlowSim en IN

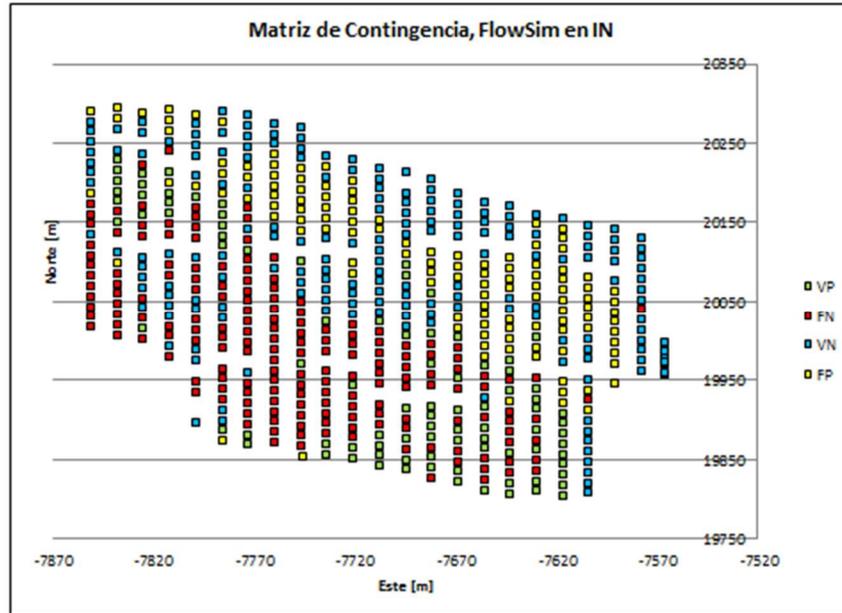


Figura 144: Matriz de contingencia, FlowSim en IN

5.6. Comparación entre Modelos de regresión logística con herramienta de simulación FlowSim

En esta sección se comparan la efectividad que tiene los modelos multivariantes de regresión logística con el simulador FlowSim 2.0. Se escoge contrastar los modelos con FlowSim 2.0, pues tiene una mejor respuesta en simular la dilución que REBOP (Valencia, 2014). Se realiza la comparación en base a tres parámetros: precisión, Δ PED promedio (PED promedio real-PED promedio simulado) y RMSE PED.

En ICE, la mejor respuesta la tiene el Modelo 2 ICE, pues tiene una mejor precisión y menor RMSE del PED (tabla 48), aunque el modelo de Andina no se queda muy lejos, pues tiene una alta precisión. Claramente FlowSim no es capaz de simular de forma correcta la dilución en este sector.

Tabla 48: Comparación ICE

Modelo	Precisión [%]	Δ PED promedio [%]	RMSE PED [%]
Modelo 2 ICE	91.6	17.2	24.4
Andina en ICE	85.7	-21.1	38.5
FlowSim en ICE	65.4	-19.4	39.1

En ICW, el modelo 2 ICW tiene una mejor respuesta en predecir la entrada temprana de dilución con una mejor precisión y un menor RMSE del PED (tabla 49). El modelo de Andina y FlowSim también son capaces de predecir de buena forma la entrada temprana de dilución.

Tabla 49: Comparación ICW

Modelo	Precisión [%]	Δ PED promedio [%]	RMSE PED [%]
Modelo 2 ICW	88.8	-4.5	25.5
Andina en ICW	79.3	-11.3	37.8
FlowSim en ICW	75.8	-16.6	42.5

En IN, la mejor respuesta la entrega el modelo 2 IN pues tiene una mejor precisión y un menor RMSE del PED (tabla 50). Claramente ni el Modelo de Andina ni menos FlowSim, son capaces de predecir de buena forma la entrada de dilución temprana en este sector.

Tabla 50: Comparación IN

Modelo	Precisión [%]	Δ PED promedio [%]	RMSE PED [%]
Modelo 2 IN	82.4	7.7	30.5
Andina en IN	67.5	-16.0	39.8
FlowSim en IN	48.3	-30.9	44.2

En IW solo se puede comparar entre los modelos de regresión logística. En sentido los 2 modelos son similares, prediciendo de forma regular la entrada de dilución temprana en el sector (tabla 51).

Tabla 51: Comparación IW

Modelo	Precisión [%]	Δ PED promedio [%]	RMSE PED [%]
Modelo 2 IW	76.1	3.3	38.5
Andina en IW	75.0	-7.4	32.1

5.6. 1. Conclusiones comparación FlowSim con modelos de regresión logística

Comparando los modelos de regresión logística con FlowSim, queda en claro que los modelos de regresión (en especial los construidos para cada sector), predicen de mejor forma la entrada temprana de dilución a los puntos de extracción. Los modelos creados para sector analizado predicen de mejor forma la entrada de dilución que el modelo para Andina propuesto Cifuentes (2017), pues cada sector tiene condiciones de entorno y operacionales diferentes, por ende logra explicar mejor cuales son las condiciones para la entrada de dilución.

Capítulo 6

6.1. Conclusiones generales

La dilución corresponde a una problemática fundamental en el negocio minero, que trae implicancias negativas en un proyecto, y por ende entender cómo se comporta, en función de reducir la incertidumbre y poder tomar medidas que eviten o retrasen su entrada puede resultar en un beneficio económico considerable.

Es por ello que se justifica la realización de este estudio para proponer una metodología, que prediga de mejor forma la entrada de dilución, en comparación a las herramientas actualmente utilizadas, la entrada temprana de dilución.

Se escoge como variable dependiente a estudiar la entrada de dilución (acumulada al 3%) con un PED menor al 100%, pues por un lado quita las entradas de dilución no significativas al ser acumuladas al 3% y, por otro lado predice lo que en verdad afecta a los proyectos, que es la entrada temprana de dilución a los puntos de extracción.

A partir del estudio exploratorio de datos se concluye, que claramente existe relación entre las variables independientes (alturas de columnas in-situ, velocidades de extracción, uniformidad del tiraje, %columnas extraídas y estados de los vecinos) con la entrada de la dilución.

Siguiendo la metodología de construcción de modelos de regresión logística para casos raros, se pudo observar la dificultad que existe para incluir la variable velocidad de extracción en los modelos. Esto se debe, a que la construcción de la base de datos para casos raros, no considera de buena forma las altas velocidades que se tienen en el comienzo de la extracción, y por ende los modelos predicen de forma extremadamente temprana la entrada de dilución, cuando se incluye la variable velocidad, a excepción del sector IW.

Se pudo observar que existe una relación, entre las variables que se incluyen en los modelos de regresión logística y el mecanismo de entrada de dilución propuesto por Paredes (2012), es decir, para el mecanismo de entrada vertical se incluyen las variables: estado de vecinos, porcentaje de columna in-situ columna extraída, altura de columna in-situ y uniformidad del tiraje; para el mecanismo de entrada de dilución lateral se incluyen las variables: estado de vecinos, alturas de columna in-situ y uniformidad del tiraje; y para el mecanismo de entrada de dilución por estallido de roca se incluyen las variables: estado de vecinos, alturas de columna in-situ, velocidad de extracción y uniformidad del tiraje.

Al hacer una comparación entre los modelos creados para cada sector de la Mina El Salvador, con el modelo de Cifuentes (2017) calibrado para el Cluster LHD de Andina y el simulador FlowSim 2.0, se concluye que los modelos creados para cada sector de la mina son mejores que el modelo de Cifuentes (2017) y éste a su vez tiene es superior a la herramienta de simulación FlowSim 2.0. Donde mayor diferencias existen son en los sectores ICE e IN, pues allí el mecanismo de entrada de dilución es lateral, y tanto el modelo de Cifuentes (2017), que fue calibrado para un sector con entrada de dilución vertical (Cluster LHD de Andina) como FlowSim 2.0 no son capaces de predecir ese tipo de entrada de dilución.

Con la construcción de estos modelos es posible dar recomendaciones operacionales a fin de retrasar la entrada de dilución.

6.2. Recomendaciones y trabajos futuros

La metodología utilizada en este trabajo resulta ser una herramienta eficaz para predecir la entrada de dilución, es por eso que se recomienda seguir recurriendo a esta metodología para trabajos futuros.

Dentro de los trabajos futuros es necesario seguir haciendo pruebas a estos modelos, por ejemplo, con la aplicación de éstos en otras minas y analizar su desempeño, como forma de validarlos.

Es necesario, para aplicar esta metodología, que la base de datos sea robusta, en cuanto a la calidad de los datos tomados como a la cantidad de información que se encuentra en ellos, es por esto que se recomienda que otros datos mina que puedan influir en la entrada de dilución sean tomados como: aplicación de preacondicionamiento (tipo y cantidad) y fragmentación del mineral y del diluyente; todo esto a nivel de punto de extracción.

Para poder incluir la velocidad, en los modelos, se requiere hacer otros análisis como, por ejemplo, solo tener la variable para un porcentaje de columna in situ mayor al 30% (u otro como 10 o 20%), pues normalmente los primeros días de extracción se tienen velocidad muy altas y luego bajan drásticamente.

Puede resultar beneficioso crear un modelo único dependiente del mecanismo de entrada de dilución, es decir, un modelo para entrada de dilución vertical y un modelo para entrada de dilución lateral, y que se ocupen dependiendo de dónde se ubique la dilución inicial, o sea, si la dilución se ubica sobre la columna in-situ, utilizar el modelo para dilución vertical, en cambio, si la dilución se ubica al costado de la columna in-situ, utilizar el modelo para dilución lateral. Con el fin de poder analizar planes de proyectos futuros que tengan riesgo de ingreso de la dilución. Para ello se deben analizar varias minas con la finalidad de poder ajustar las variables y sus coeficientes (β) que entren al modelo multivariable.

También, si se requiere analizar la entrada de dilución en una mina que se encuentre en operación y con el problema de la dilución ya presente, es mejor ocupar la metodología propuesta y construir un modelo propio para ese operación, pues reflejará de mejor manera las condiciones que tiene esa mina para la entrada de dilución.

Queda por hacer una guía completa, que permita utilizar las variables operacionales de los modelos creados, para evaluar planes y entregar recomendaciones operacionales que disminuyan el riesgo de entrada de dilución. Quizás, esto se pueda hacer a través de una herramienta computacional que permita de forma rápida y sencilla evaluar distintas estrategias de extracción.

Bibliografía

- Armijo, F., Irribarra, S., & Castro, R. (2014). Experimental study of fines migration for caving mines. Santiago, Chile: Caving 2014.
- Carlson, G., Tyler, D., DeWolfe, C., & Lorig, L. (2004). Understanding gravity flow for mix and dilution modeling at Henderson Mine. En MassMin 2004 (págs. 231-237). Santiago de Chile.
- Castillo, L. (2009). Análisis de la sensibilidad del índice de uniformidad, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
- Castro, R., & Whiten, W. (2007). A new cellular automaton to model gravity flow in block. Gecamin Ltda.
- Cifuentes, M. (2017). Construcción de modelos multivariantes de riesgo al ingreso de dilución en minería de Caving. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile.
- Codelco. (2009). Estudio de factibilidad, Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, Principales Decisiones. Vicepresidencia Corporativa de Proyectos.
- Cundall, P., Mukundakrishnan, B., & Lorig, L. (2000). REBOP (Rapid Emulator based on PFC3D) Formulation and User's guide. Brisbane: JKRC & ITASCA Consulting Group.
- De la Fuente, S. (2011). Regresión Logística. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- De Nicola, R., & Fishwick, M. (2000). An underground air blast – CODELCO-Chile – División Salvador. MassMin2000.
- Diering, T. (2000). PC-BC: A block cave design and draw control system. MassMin 2000, 469-484.
- Fuentes, M. (2015). Calibración y desarrollo de FLOWSIM mediante la utilización de trazadores inteligentes. Santiago de Chile: Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas Universidad de Chile.
- Garcés, D., Castro, R., Valencia, M. E., & Armijo, F. (2016). Assessment of early mud entry risk for long term cave mining applications. En UMining 2016 (págs. 439-451). Santiago de Chile.

- Hashim, M., & Sharrock, G. (2012). Dimensionless percolation rate of particles in block caving mines. En MassMin 2012.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression (Vol. Vol. 398).
- Ibragimov, I. (2011). Encyclopedia of Mathematics. Recuperado el 04 de 07 de 2016, de https://www.encyclopediaofmath.org//index.php?title=Maximum-likelihood_method&oldid=13827
- Iribarra, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de Caving, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
- Jolley, D. (1968). Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mine. CIM.
- King, G., & Zeng, L. (2001). Logistic regression in rare events data. Political analysis.
- Kvapil, R. (1965). Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bins I. Int. J. Mining Sci. Vol. 2.
- Kvapil, R. (1992). Sublevel Caving. SME Mining Engineering Handbook (2nd Edition ed.).
- Labbé, E. (2014). Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Catastro de oportunidades I+D en innovación tecnológica para minería de Block/Panel Caving. Santiago: Universidad de Chile.
- Laubscher, D. (1994). Cave Mining – the state of the art. Journal of South African.
- Laubscher, D. (2000). Block caving manual. Prepared for the International Caving Study. JKMRRC and Itasca Consulting Group.
- Laubscher, D. (2006). Cave Mining Handbook. South Africa: De Beers Group.
- Moss, A. (2011). An introduction to block and panel caving. In BMO Capital Markers, Global Metals and Mining Conference.
- Navia, I., Castro, R., & Valencia, M. E. (2014). Statistical analyses of mud entry at Diablo Regimiento Sector. El Teniente Mine. Caving 2014.
- Paredes, P. (2012). Mecanismos de entrada de dilución en minas de Block/Panel Caving. Santiago: Tesis de magister en Minería, Universidad de Chile.
- Paredes, P., & Castro, R. (2014). Empirical observations of dilution in panel caving. Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy.

- Paredes, P., & Pineda, M. (2014). An analysis of the lateral dilution entry mechanisms in Panel Caving. Santiago, Chile: Caving 2014.
- Pielke, R. A. (2002). Mesoscale meteorological modeling. Academic press.
- Pineda, M. (2012). Study of the gravity flow mechanism at Goldex by means of a physical model, Tesis para optar al grado de magister en minería. Universidad de Chile.
- Santibáñez, J. (2008). Efecto del tiraje en la definición de la zona movimiento, en un Block-Panel Caving. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (Part 1). En MassMin2004 (págs. 167-172). Santiago, Chile.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (Part 2). Chile: Massmin 2004.
- Susaeta, A., Rubio, E., Henríquez, J., & País, G. (2008). Dilution behaviour at Codelco panel cave mines. MassMin 2008.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. (2013). Using multivariate statistics (6th ed. ed.). Boston.
- Valencia, M. E. (2014). Desarrollo e implementación de Flowsim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving. Santiago de Chile: Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile.
- Valencia, M. E. (2016). Modelamiento Empírico de ingreso de barro en minas de caving. Seminario de Tesis, Universidad de Chile.
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case study in the Flemish Ardennes. Bélgica: Geomorphology.
- Vergara, P. (2016). Estudio experimental de flujo gravitacional en minería de Panel Caving, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.
- Wattimena, R. (2014). Predicting the stability of hard rock pillars using multinomial logistic regression. International Journal of Rock Mechanism & Mining Sciences, 33-39.

Anexos

Anexo A

Secuencias de extracción sectores Mina El Salvador

Secuencia de extracción ICE

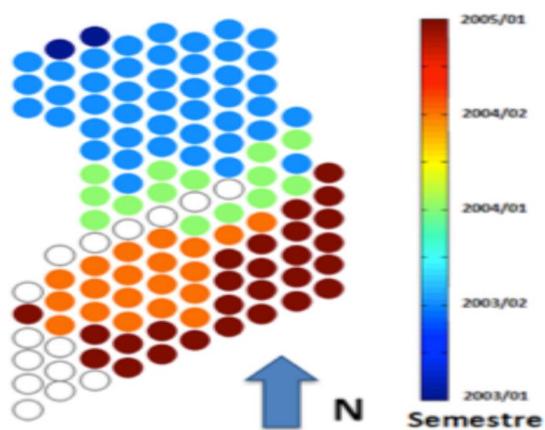


Figura 145: Secuencia de extracción ICE (Paredes, 2012)

Secuencia de extracción ICW

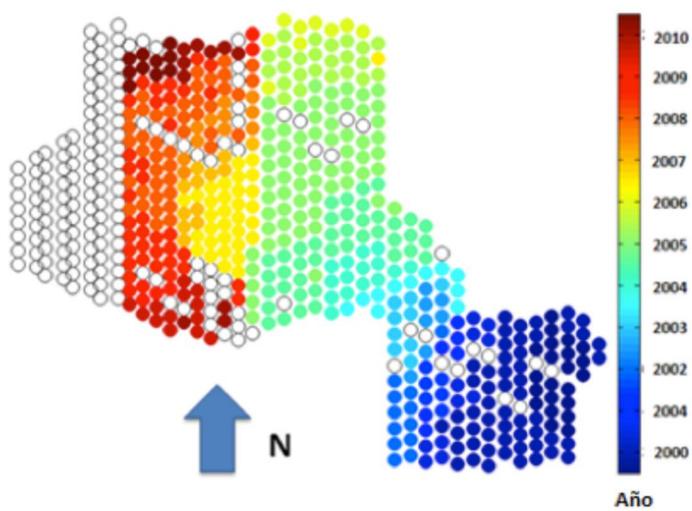


Figura 146: Secuencia de extracción ICW (Paredes, 2012)

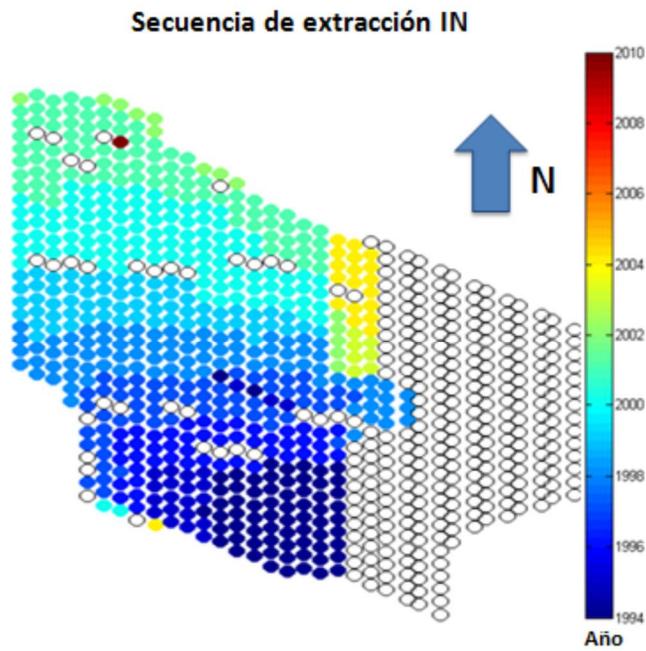


Figura 147: Secuencia de extracción IN (Paredes, 2012)

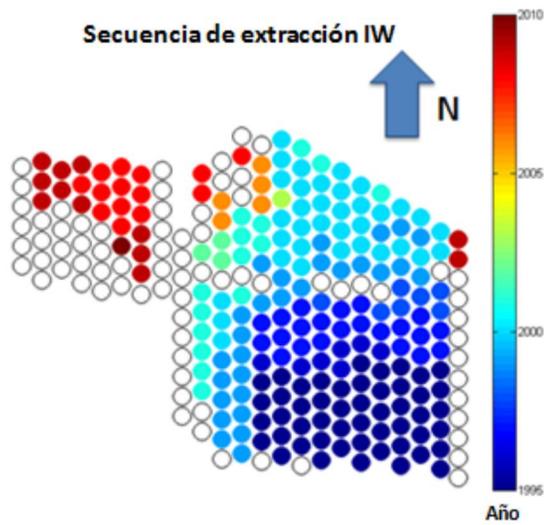


Figura 148: Secuencia de extracción IW (Paredes, 2012)

Uniformidad en planta



Figura 149: Uniformidad del punto, ICE

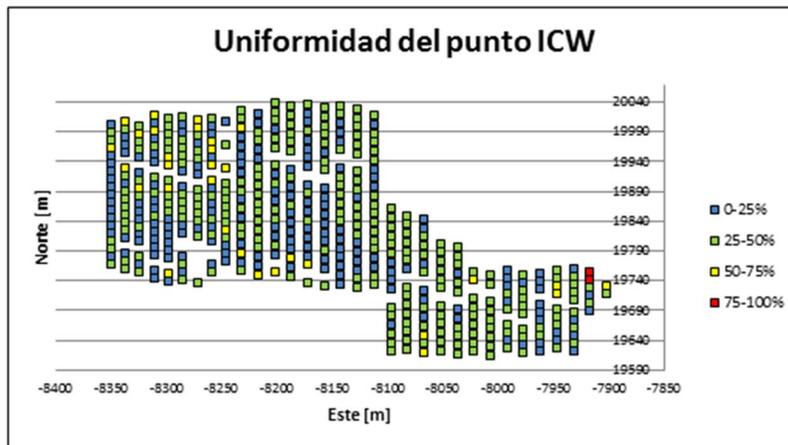


Figura 150: Uniformidad del punto, ICW

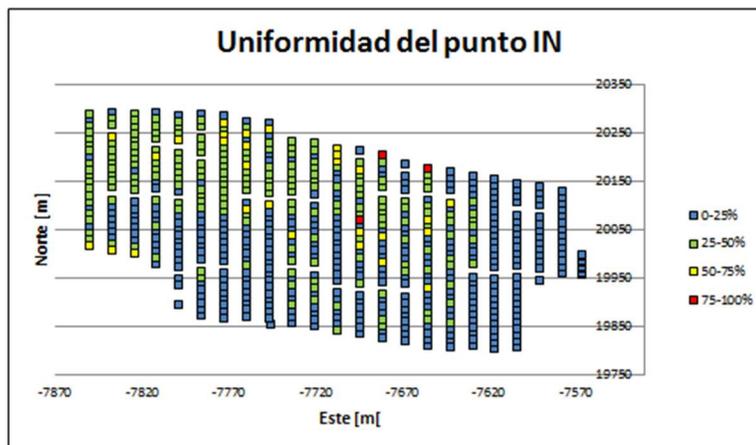


Figura 151: Uniformidad del punto, IN

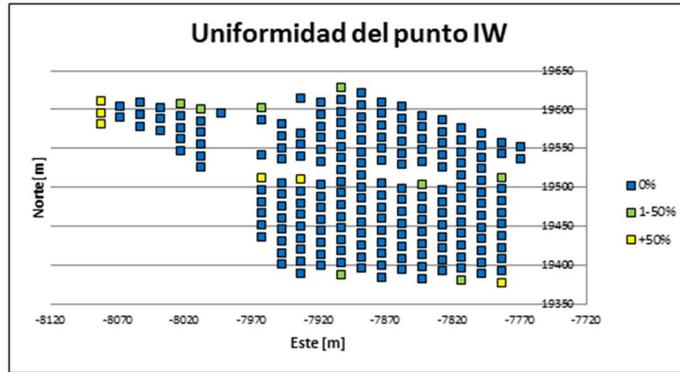


Figura 152: Uniformidad del punto, IW

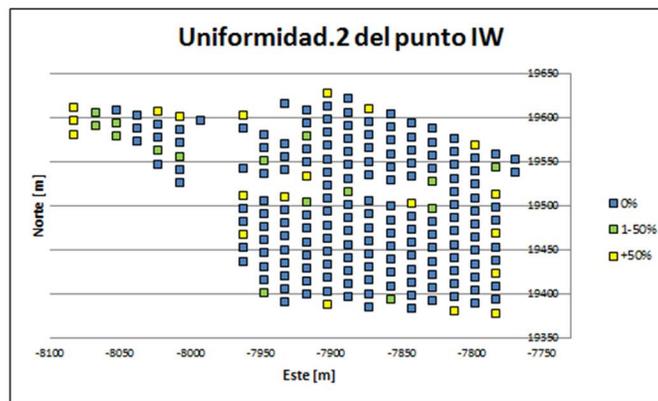


Figura 153: Uniformidad.2 del punto, IW

Distribución uniformidad por puntos

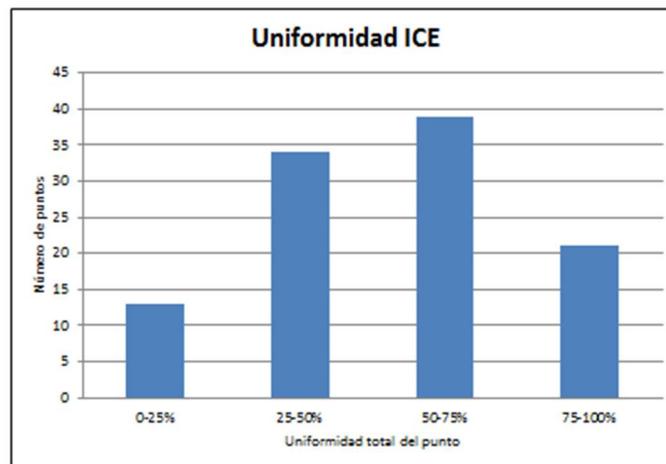


Figura 154: Distribución uniformidad de puntos, ICE

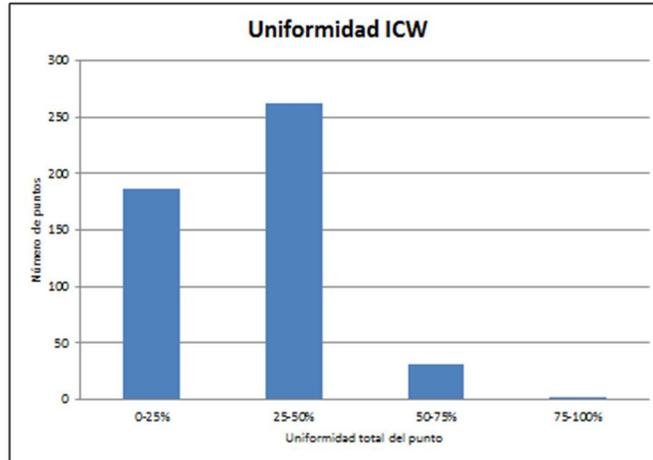


Figura 155: Distribución uniformidad de puntos, ICW

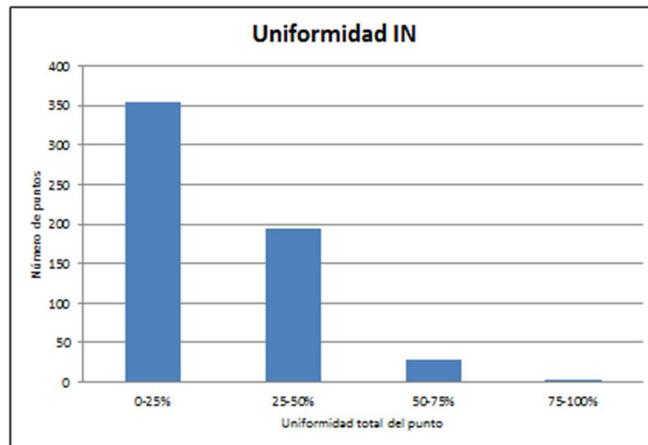


Figura 156: Distribución uniformidad de puntos, IN

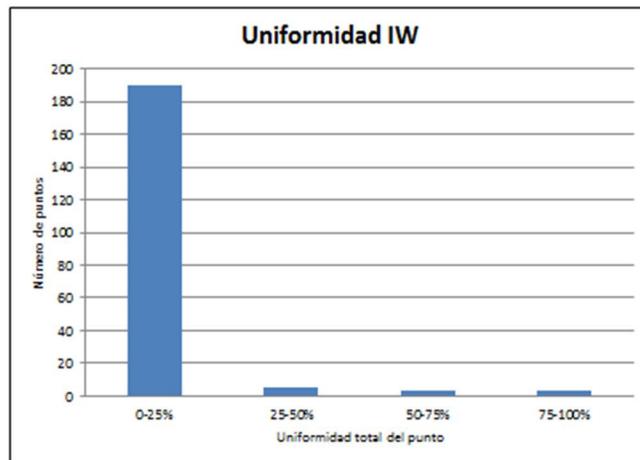


Figura 157: Distribución uniformidad de puntos, IW

Anexo B

Curvas ROC

A continuación se exponen las curvas ROC, de la base de datos para eventos raros, de cada modelo.

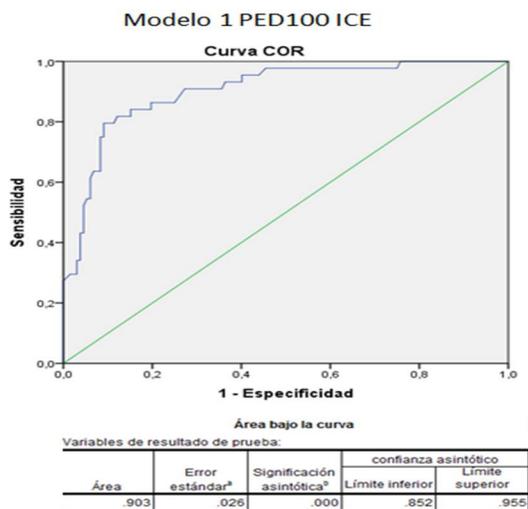


Figura 158: Curva ROC Modelo 1 ICE

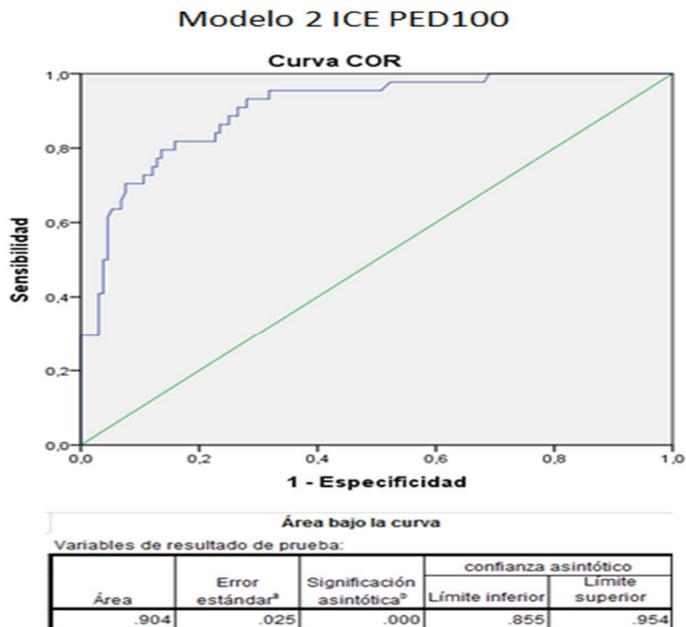
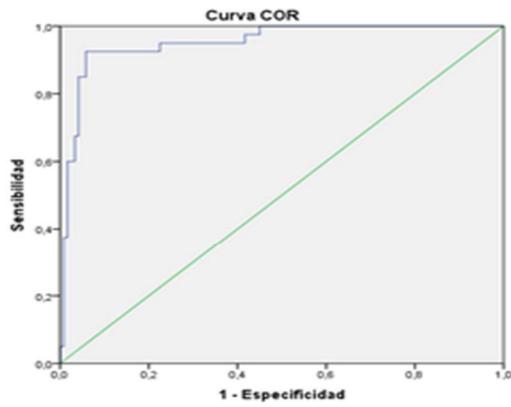


Figura 159: Curva ROC, Modelo 2 ICE

Modelo 1 ICW

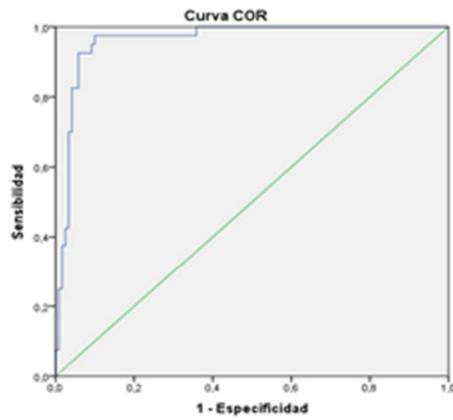


Variables de resultado de prueba:

Área	Error estándar	Significación asintótica	95% de intervalo de confianza asintótico	
			Límite inferior	Límite superior
.952	.019	.000	.916	.988

Figura 160: Curva ROC, Modelo 1 ICW

Modelo 2 ICW



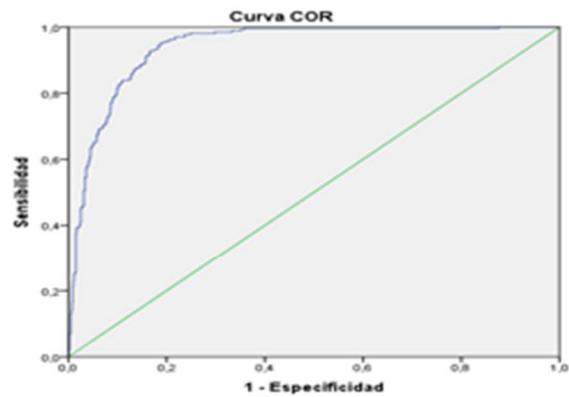
Área bajo la curva

Variables de resultado de prueba:

Área	Error estándar	Significación asintótica	95% de intervalo de confianza asintótico	
			Límite inferior	Límite superior
.961	.015	.000	.931	.991

Figura 161: Curva ROC Modelo 2 ICW

Modelo 1 IN



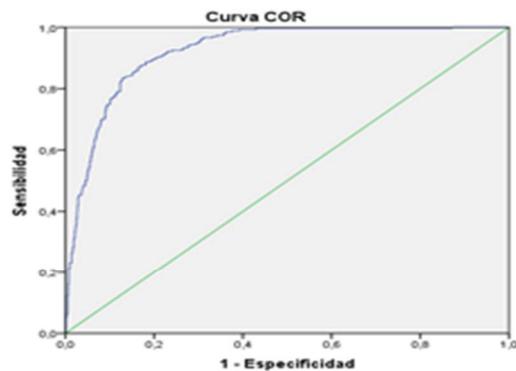
Área bajo la curva

Variables de resultado de prueba:

Área	Error estándar	Significación asintótica	95% de intervalo de confianza asintótico	
			Límite inferior	Límite superior
.940	.007	.000	.926	.954

Figura 162: Curva ROC Modelo 1 IN

Modelo 2 IN



Los segmentos de diagonal se generan mediante empates.

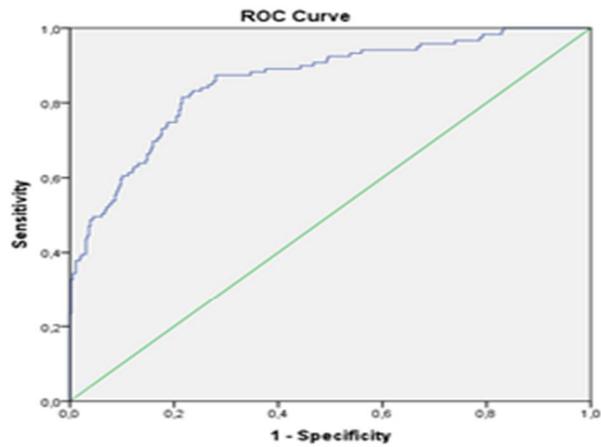
Área bajo la curva

Variables de resultado de prueba:

Área	Error estándar	Significación asintótica	95% de intervalo de confianza asintótico	
			Límite inferior	Límite superior
.922	.008	.000	.906	.939

Figura 163: Curva ROC Modelo 2 IN

Modelo 1 IW



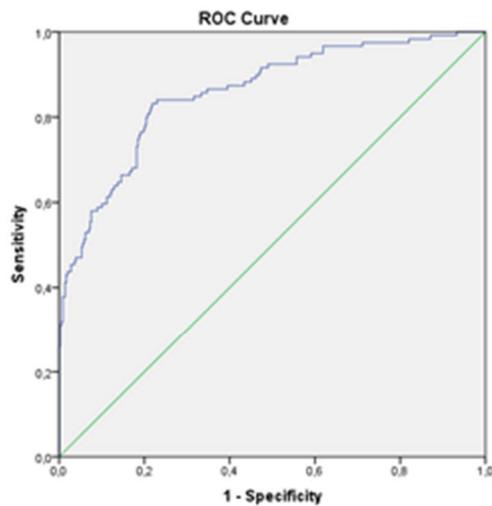
Area Under the Curve

Test Result Variable(s):

Area	Std. Error	Asymptotic Sig.	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.859	.020	.000	.819	.899

Figura 164: Curva ROC Modelo 1 IW

Modelo 2 IW



Area Under the Curve

Test Result Variable(s):

Area	Std. Error	Asymptotic Sig.	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.858	.021	.000	.818	.898

Figura 165: Curva ROC Modelo 2 IW

Errores PED por puntos de extracción FlowSim 2.0

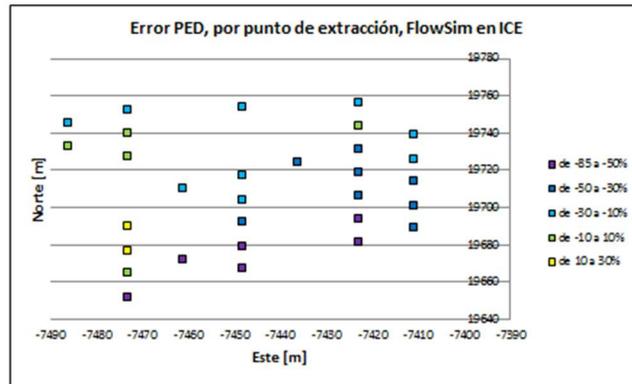


Figura 166: Error PED por punto de extracción, FlowSim en ICE

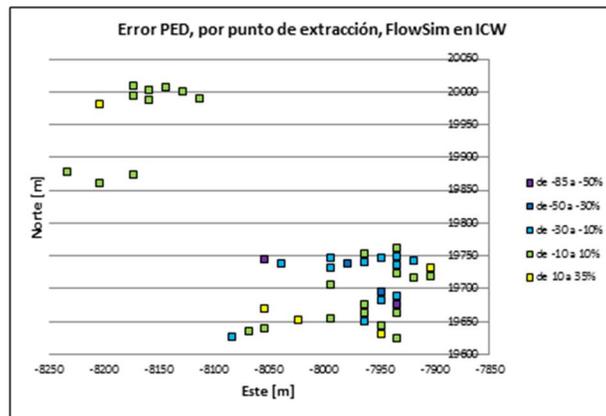


Figura 167: Error PED por punto de extracción, FlowSim en ICW

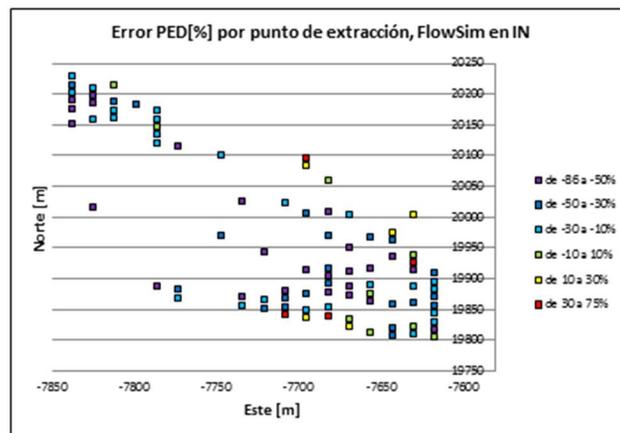


Figura 168: Error PED por punto de extracción, FlowSim en IN