



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

# MODELOS ESTADÍSTICOS DE PELIGRO SÍSMICO APLICADOS A MINERÍA DE PANEL CAVING

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

GONZALO MATÍAS PIZARRO BORE

PROFESOR GUÍA:

JAVIER VALLEJOS MASSA

PROFESOR CO-GUÍA:

XAVIER EMERY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CARLO LOBIANO CORREA

RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

SANTIAGO DE CHILE

2018

## **RESUMEN**

La evolución de la minería subterránea a yacimientos de mayor profundidad ha conllevado a un aumento significativo de la ocurrencia de interferencias operacionales asociadas a la sismicidad inducida producto de la actividad minera. Estos eventos sísmicos pueden causar estallidos de rocas, los cuales pueden generar consecuencias para los trabajadores, equipos y la sustentabilidad del negocio minero.

El presente trabajo propone utilizar modelos estadísticos para estimar el peligro sísmico asociado a la minería de Panel Caving. Se emplean dos modelos; el primer modelo corresponde a una regresión logística en función de variables geo-mineras, y el segundo corresponde a un índice que es una combinación lineal de parámetros geotécnicos pre-minería.

Como caso de estudio se utiliza la minería de panel caving realizada en el sector Reservas Nortes (RENO) de la Mina El Teniente, CODELCO-CHILE, considerando el periodo 2000-2010. En base a una zonificación que considera aspectos geotécnicos y mineros, se definen cinco zonas de análisis en la mina y utilizando una escala temporal mensual, se genera una base de datos estandarizada de 660 casos con variables geo-mineras que incluyen: área socavada, área incorporada, ancho del frente, velocidad de extracción, ángulo de extracción, presencia de fracturamiento hidráulico, Fallas geológicas, condición de esfuerzos, unidades litológicas y geotécnicas. De estos 660 casos, 52 casos presentan eventos sísmicos con magnitud de momento mayor,  $M_w \geq 1.0$ .

Los modelos son calibrados utilizando la base de datos generada. El modelo de regresión logística permite estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos  $M_w \geq 1.0$  utilizando como input las variables geo-mineras, mientras que, el índice ambiental permite categorizar de manera relativa, zonas de mayor peligro sísmico. El mejor ajuste del modelo de Regresión Logística alcanza una tasa de aciertos (TPR) de 74%, y una precisión de 67%. La categorización de zonas sísmicas obtenida del índice ambiental se realiza mediante curvas de distribución acumulada de la magnitud de momento, mostrando consistencia entre las clases definidas.

Se concluye, que este tipo de modelos podrían ser parte de un set de herramientas de manera de integrar el peligro sísmico en el proceso de planificación y diseño minero.

Como resultado y aporte del estudio se conceptualizan, implementan y testean algoritmos matemáticos en herramientas computacionales que permiten replicar y estandarizar el uso de la metodología desarrollada en otras operaciones mineras.

Se recomienda incluir modelos tridimensionales de las unidades litológicas, zonas geotécnicas, fallas estructurales y modelamiento numérico, de modo de mejorar el análisis e interpretación de la sismicidad inducida, las bases de datos y los modelos estadísticos calibrados.

# ABSTRACT

The evolution of underground mining to greater depths has caused a significant increase in the occurrences of operational interference associated with induced seismicity resulting from mining activity. These seismic events can cause rock bursts, which can generate consequences for workers, equipment and the sustainability of the mining business.

This thesis proposes the use of statistical models to estimate the seismic hazard associated with Panel Caving operations. Two models are used; the first model corresponds to a logistic regression based on geo-mining variables, and the second corresponds to an index that is a linear combination of pre-mining geotechnical parameters.

As a case study, the panel caving mining in Reservas Norte (RENO) sector of the El Teniente Mine, CODELCO-CHILE, is used, considering the period 2000-2010. Based on a zoning that considers geotechnical and mining aspects, five analysis zones are defined in the mine and using a monthly time scale, a standardized database of 660 cases is generated with geo-mining variables that includes: undercut area, incorporated area, front width, extraction angle, presence of hydraulic fracturing, geological faults, stress conditions, lithological and geotechnical units. Of these 660 cases, 52 cases present seismic events with greater moment magnitude,  $M_w \geq 1.0$ .

The models are calibrated using the generated database. The logistic regression model allows estimating the probability of occurrence of  $M_w \geq 1.0$  events using the geo-mining variables as an input, while the environmental index allows a relative categorization of areas of greater seismic hazard. The best adjustment of the logistic regression model reaches a success rate (TPR) of 74%, and an accuracy of 67%. The categorization of seismic zones obtained from the environmental index is done by curves of accumulated distribution of the moment magnitude, showing consistency between the classes defined.

It is concluded that this type of models could be part of a set of tools in order to integrate the seismic hazard in the planning and mining design process.

As a result and contribution of the study, mathematical algorithms are conceptualized, implemented and tested in computational tools that allow to replicate and standardize the use of the methodology developed in other mining operations.

It is recommended to include three-dimensional models of the lithological units, geotechnical zones, structural faults and numerical modeling, in order to improve the analysis and interpretation of the induced seismicity, the databases and the calibrated statistical models.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos van dirigidos a todas las personas que estuvieron presentes a lo largo de todo mi paso por la Universidad.

A mi familia por todo su apoyo incondicional ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A Ximena en particular por aguantarnos y apoyarnos mutuamente durante varios años.

A los profesores y cuerpos docentes de la universidad por todos sus conocimientos entregados en esta etapa de formación.

A mis amigos y compañeros de la universidad y de la vida, en especial a Giovanni, Carlo, Cristian y Sebastián, ya que sin ellos el paso por la universidad no hubiera sido lo mismo.

A mis compañeros de la oficina 201, en especial a Gary y Rodrigo por toda su ayuda en las etapas iniciales de este trabajo.

Al Profesor Javier Vallejos, por la oportunidad de realizar el magíster bajo su guía y todos los conocimientos entregados a lo largo de mi paso por la universidad y en esta etapa.

Al Profesor Xavier Emery, por su tiempo y disposición a formar parte de la comisión evaluadora de este trabajo.

A Rodrigo Estay, por su ayuda en las etapas iniciales del trabajo, además de su tiempo y disposición a formar parte de la comisión evaluadora de este trabajo.

A Carlo Lobiano por toda su ayuda y apoyo en todo ámbito a lo largo de este largo proceso y por formar parte de la comisión evaluadora de este trabajo.

A los miembros del Departamento de Ingeniería de Minas, por su buena disposición y cercanía en todo momento.

# TABLA DE CONTENIDO

Capitulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Alcances.....	4
1.4 Metodología .....	4
CAPITULO 2 Antecedentes .....	6
2.1 Minería Subterránea.....	6
2.1.1 Panel Caving .....	7
2.2 Mina El Teniente, Sector Reservas Norte (RENO).....	10
2.2.1 Litología .....	11
2.2.2 Estructuras principales en RENO .....	14
2.3 Generalidades de la sismicidad .....	15
2.3.1 Sísmicidad inducida en Minería .....	16
2.3.2 Energía radiada por el evento sísmico .....	17
2.3.3 Magnitud del evento sísmico .....	18
2.3.4 Momento sísmico.....	19
2.3.5 Momento Magnitud.....	20
CAPITULO 3 Modelos.....	21
3.1 Índice Ambiental.....	21
3.2 Regresión Logística.....	23
3.2.1 Desempeño del modelo y curva ROC .....	24
CAPITULO 4 Generación de Base de Datos y Estadísticas .....	26

4.1	Geología.....	27
4.1.1	Unidades Litológicas.....	28
4.1.2	Unidades Geotécnicas.....	29
4.1.3	Fallas y Estructuras .....	31
4.2	Condición de Esfuerzos .....	33
4.3	Variables Mineras.....	34
4.3.1	Frentes Mineros.....	35
4.3.2	Definición de áreas .....	38
4.3.3	Ancho de frentes.....	47
4.3.4	Velocidad de Extracción y ángulo de extracción.....	49
4.3.5	Esfuerzo Vertical en la Zona de Abutment .....	54
4.3.6	Fracturamiento hidráulico (FH) .....	58
4.4	Análisis de la sismicidad inducida .....	58
4.4.1	Zona Sísmica.....	59
4.4.2	Zona de Abutment .....	65
4.5	Resumen Base de datos generada para modelo de Regresión .....	66
4.6	Parámetros Índice Ambiental .....	67
4.6.1	Geología .....	68
4.6.2	Condición de Esfuerzos.....	70
4.6.3	Geotecnia .....	71
CAPITULO 5 Herramientas computacionales desarrolladas .....		74
5.1	Extraer información del archivo DXF en Python.....	75
5.2	Procesamiento de la información inicial .....	75
5.2.1	Trazado de Frentes Mineros.....	76
5.2.2	Procesamiento de unidades litológicas y geotécnicas.....	78

5.2.3	Procesamiento de Fallas estructurales.....	78
5.2.4	Procesamiento de Topografía.....	79
5.2.5	Procesamiento Catalogo de extracción .....	79
5.3	Obtención de Variables Mineras .....	80
5.3.1	Calculo de áreas.....	80
5.3.2	Discretización unidades litológicas y Geotécnicas.....	82
5.3.3	Discretización de fallas estructurales.....	84
5.3.4	Obtención de velocidad de extracción, altura extraída, tonelaje extraído y Ángulo de extracción. ....	85
5.3.5	Profundidad y condición de esfuerzos .....	86
5.4	Extracción de Eventos Sísmicos .....	87
5.5	Calculo de parámetros del Índice Ambiental .....	88
CAPITULO 6 Resultados y Análisis .....		90
6.1	Historiales de variables geo-mineras .....	90
6.1.1	Área Socavada .....	91
6.1.2	Área Incorporada .....	93
6.1.3	Área en Quiebre .....	95
6.1.4	Área de Losa .....	96
6.1.5	Velocidad de extracción.....	98
6.1.6	Ángulo de Extracción promedio .....	102
6.1.7	Esfuerzo vertical en la zona de abutment.....	104
6.1.8	Observaciones.....	106
6.2	Modelo de Regresión Logística .....	106
6.2.1	Escenario Base.....	109
6.2.2	Escenario con nuevos casos .....	114

6.3	Índice Ambiental.....	119
6.3.1	Análisis de la distribución de Momento Magnitud.....	119
6.3.2	Resultados Modelo, caso Base .....	120
6.3.3	Resultado Modelo, ajuste Local.....	124
CAPITULO 7 Conclusiones y Recomendaciones .....		128
7.1	Generación y obtención de Base de datos.....	128
7.1.1	Automatización del proceso de generación y filtrado de datos.....	128
7.1.2	Base de datos obtenida .....	129
7.2	Análisis eventos sísmicos .....	129
7.3	Elaboración y calibración de modelos.....	130
7.3.1	Modelo de Regresión Logística .....	130
7.3.2	Índice Ambiental .....	131
7.4	Conclusiones del trabajo .....	131
CAPITULO 8 Bibliografía .....		133

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Daño en infraestructura (galería de sección de 6.0x6.0 m) debido a sismicidad inducida (estallido de roca).....	2
Figura 2	Panel Caving Convencional .....	8
Figura 3	Panel Caving con Hundimiento Previo .....	8
Figura 4	Panel Caving con Hundimiento Avanzado .....	8
Figura 5	Comportamiento de los Esfuerzos, Abutment Stress (basado en Karzulovic, 2005 [14]) .....	9
Figura 6	Mina El Teniente, Cornejo [12]......	11
Figura 7	Mapa litológico y layout del nivel de producción de mina el RENO. Sectorización Fw (patilla) y Hw (cabeza). .....	12



Figura 8. Emplazamiento de estructuras principales en RENO.....	14
Figura 9 Esquema conceptual de generación de actividad sísmica en minería de Caving [22]. .....	16
Figura 10 Metodología utilizada para generar el Índice ambiental .....	21
Figura 11 Esquema general de la definición del índice ambiental.....	22
Figura 12 Curva ROC (Fawcett,2005).....	25
Figura 13 Litologías Mina El Teniente, AutoCAD. (Plano Geológico Integrado, Nivel de Hundimiento 2121, GL9-10649) .....	28
Figura 14 Litologías Mina El Teniente, Generadas en Python .....	29
Figura 15 Plano de Zonas geotécnicas definidas a partir del desarme potencial de macizo rocoso [30] .....	30
Figura 16 Fallas Geológicas, Mina El Teniente, AutoCAD .....	32
Figura 17 Discretización de Fallas Geológicas, Python .....	32
Figura 18 Topografía Mina El Teniente, AutoCAD .....	33
Figura 19 Topografía sector RENO, obtenido en Python .....	33
Figura 20 Modelo de Esfuerzos In-situ utilizando los promedios de sectores indicados por AKL [32] .....	34
Figura 21 Definición de zonas de Análisis, Frentes mineros Diciembre 2010, Sector RENO.....	35
Figura 22 Frentes de Socavación 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.....	36
Figura 23 Frentes de Extracción 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.....	37
Figura 24 Frentes de Régimen 2000-2010, Sector RENO, El Teniente. ....	38
Figura 25 Área Socavada periodo i.....	39
Figura 26 Gráfico Área Socavada por Zona y periodo .....	39
Figura 27 Gráfico Área Socavada Acumulada por zona. ....	40
Figura 28 Área Incorporada periodo i.....	41
Figura 29 Gráfico Área Incorporada por Periodo y Zona.....	42
Figura 30 Gráfico Área Incorporada Acumulada por zona. ....	42
Figura 31 Área en Quiebre periodo i .....	43
Figura 32 Gráfico Evolución temporal Área en Quiebre por Zona.....	44
Figura 33 Área de Losa periodo i .....	45

Figura 34 Gráfico Evolución temporal Área de Losa por Zona.....	46
Figura 35 Ancho de Frente de extracción y socavación .....	47
Figura 36 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Extracción por zona. .	48
Figura 37 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Socavación por zona.	48
Figura 38 Estimación del ángulo de extracción para cada periodo i y zona j .....	50
Figura 39 Gráfico Tonelaje Extraído en Área en Quiebre por periodo y zona. ....	52
Figura 40 Velocidad de Extracción en Área en Quiebre por zona y periodo. ....	52
Figura 41 Gráfico velocidad de extracción versus altura extraída, Puntos de extracción en Quiebre. ....	53
Figura 42 Gráfico Ángulo de Extracción promedio .....	54
Figura 43 Profundidad Representativa para cada zona y periodo.....	57
Figura 44 Esfuerzo Vertical Zona de Abutment stress .....	57
Figura 45 Polígono de búsqueda, Zona Sísmica.....	60
Figura 46 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 1 .....	60
Figura 47 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 2 .....	61
Figura 48 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 3 .....	61
Figura 49 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 4 .....	62
Figura 50 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 5 .....	62
Figura 51 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Sector RENO .....	63
Figura 52 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Sísmica. ....	65
Figura 53 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Abutment.....	66
Figura 54 Zona de estudio Índice Ambiental. 800x800 metros.....	68
Figura 55 Mapa Contactos Litológicos, Índice Ambiental .....	69
Figura 56 Mapa Fallas Geológicas, Índice Ambiental .....	70

Figura 57 a) Mapa Esfuerzo Principal Mayor ( $s_1$ ), b) Mapa razón anisotropía ( $s_1/s_3$ ). .....	71
Figura 58 Histograma $U_i$ .....	72
Figura 59 Mapa $U_i$ .....	72
Figura 60 Resultado Triangulación de Delaunay, Python. ....	81
Figura 61 Generación de Contornos de unidades litológicas, AutoCAD .....	82
Figura 62 Contornos unidades Litológicas en formato requerido, AutoCAD .....	82
Figura 63 Discretización unidades litológicas cada 1 metro.....	83
Figura 64 Topografía, Formato original, a) vista en Planta, b) vista isométrica.....	86
Figura 65 Celda de la triangulación de la Topografía.....	87
Figura 66 Gráficos Área socavada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes. ....	92
Figura 67 Gráficos Área incorporada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes. ....	94
Figura 68 Gráficos Área en Quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes. ....	96
Figura 69 Gráficos Área de Losa por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes. ....	97
Figura 70 Gráficos Velocidad de Extracción en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.....	99
Figura 71 Gráficos Velocidad de extracción máxima por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes. ....	100
Figura 72 Gráficos Tonelaje extraído en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Tonelaje Extraído acumulado en área en quiebre.....	102

Figura 73 Gráficos Ángulo de Extracción promedio en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.....	103
Figura 74 Gráficos Esfuerzo vertical en la zona de Abutment por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes .....	105
Figura 75 Gráfico Indicadores de calidad de los Modelos de Regresión.....	113
Figura 76 Grafico métricas de los Modelos de Regresión Logística, Nuevo Escenario. ....	117
Figura 77 Distribución de Momento magnitud, Casos cota $2100 \pm 25, 50, 75, 100$ . .....	120
Figura 78 Mapa Índice Ambiental.....	121
Figura 79 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Base .....	121
Figura 80 Histograma Índice Ambiental, caso base .....	122
Figura 81 Curvas Gutenberg-Richter, Índice Ambiental Base .....	122
Figura 82 a) Mapa Sumatoria de Momento caso $\pm 100$ , b) Frente de Socavación Diciembre 2010. ....	123
Figura 83 Sistema de Falla N1, G, F y C.....	124
Figura 84 Mapa Parámetro presencia de Fallas Principales .....	124
Figura 85 Mapa Índice ambiental local.....	125
Figura 86 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Local.....	126
Figura 87 Histograma Índice ambiental local.....	126
Figura 88 Curvas Gutenberg-Richter casos $\pm 25, 50, 75$ y $100$ m. Índice ambiental .....	127

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales unidades litológicas de sector RENO, El Teniente [17].....	13
Tabla 2. Estructuras principales y sus características. ....	14

Tabla 3 Relación Cualitativa entre la magnitud de un evento sísmico y como se sintió en la mina (Hudyma et al.,2003) .....	19
Tabla 4 Matriz de contingencia.....	24
Tabla 5 Zonas Geotécnicas [30].....	31
Tabla 6 Estadística Descriptiva Área Socavada por periodo.....	41
Tabla 7 Estadística Descriptiva Área Incorporada.....	43
Tabla 8 Estadística Descriptiva Área en Quiebre .....	45
Tabla 9 Estadística Descriptiva Área de Losa .....	46
Tabla 10 Estadísticas Ancho Frentes de socavación y extracción .....	49
Tabla 11 Estadísticas Velocidades de extracción y Tonelaje extraído en polígono en Quiebre. ....	50
Tabla 12 Estadísticas Ángulo de Extracción por zona .....	53
Tabla 13 Estadísticas condición de esfuerzos por Zona .....	56
Tabla 14 Formato EVP, Eventos Sísmicos.....	59
Tabla 15 Eventos Sísmicos con Momento Magnitud > 1.0 para cada Zona Sísmica .....	63
Tabla 16 Variables Geo-Mineras Obtenidas.....	67
Tabla 17 Distribución Litológica, Celdas Índice Ambiental .....	69
Tabla 18 Detalle contactos litológicos. ....	69
Tabla 19 Estadísticas Fallas Geológicas, Índice Ambiental .....	70
Tabla 20 Condición de Esfuerzos, Índice Ambiental. ....	71
Tabla 21 Estadística Ui .....	72
Tabla 23 Variables tentativas a Utilizar en Modelo de Regresión .....	107
Tabla 24 Correlación de Variables. ....	109
Tabla 25 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 1, 2 y 3....	110
Tabla 26 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 4, 5 y 6....	111
Tabla 27 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 7 .....	112
Tabla 28 Matriz de Confusión, modelo 6, Escenario Base.....	114
Tabla 29 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 1, 2 y 3..	115
Tabla 30 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 4 y 5.....	116
Tabla 31 Matriz de Confusión, Modelo 4, Nuevo Escenario.....	118

Tabla 32 Parámetros y Ponderadores Índice Ambiental [37] .....	120
Tabla 33 Parámetros Índice Ambiental, Ajuste Local .....	125

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1 Energía Radiada, Boatwright y Fletcher 1984 .....	17
Ecuación 2 Momento Sísmico, Aki y Richards 1980 .....	19
Ecuación 3 Expresión derivada para estimar el Momento Sísmico, Hanks y Wyss 1972 .....	20
Ecuación 4 Momento Magnitud. ....	20
Ecuación 5 Métricas Desempeño .....	24
Ecuación 6 Esfuerzo vertical en la zona de Abutment, Karzulovic [14] .....	55
Ecuación 7 Modelo de Regresión Logística, Escenario Base .....	113
Ecuación 8 Modelo de Regresión Logística, Nuevo Escenario .....	118

# **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

En minería es fundamental asegurar la extracción segura de las reservas de mineral, tanto para el futuro del negocio minero como para los trabajadores. Actualmente la actividad minera subterránea a nivel mundial presenta ciertas condiciones que han conllevado a un aumento en la ocurrencia de eventos sísmicos inducidos por la minería.

Un evento sísmico es la liberación repentina de energía acumulada en la roca. Esta acumulación se debe a la redistribución de esfuerzos producto de la minería [1]. Los eventos de sismicidad inducida en minas subterráneas han sido reportados como un peligro para los trabajadores además de una interferencia operacional en la capacidad productiva. Dichos reportes provienen mayoritariamente de minas subterráneas en roca dura ubicadas en una variedad de países (Australia, Canadá, Sudáfrica, China, Chile y Perú). El problema no es nuevo y se ha intensificado con la progresión de la actividad minera moderna en profundidades cada vez mayores. Algunos de estos eventos sísmicos pueden causar explosiones violentas de material rocoso (los que son conocidos como estallidos de roca), con graves consecuencias tales como; lesiones e incluso la muerte de trabajadores, daños en equipos e infraestructura, pérdida de continuidad en la capacidad productiva y los costos asociados a la rehabilitación. La Figura 1 presenta el daño en infraestructura (galería de sección de 6.0x6.0 m) causado por sismicidad inducida (estallido de roca), en donde la proyección de material ha obstruido el 90% de la sección de la galería por una extensión de 96 metros lineales. Este tipo de siniestro geotécnico se presenta tanto en la mediana como en la gran minería subterránea.



**Figura 1 Daño en infraestructura (galería de sección de 6.0x6.0 m) debido a sismicidad inducida (estallido de roca)**

En la actualidad las operaciones mineras emplean diferentes medidas y estrategias para mitigar el riesgo asociado a la sismicidad inducida. Algunas de las medidas implementadas en las faenas afectadas por este problema son las siguientes:

- Protocolos de re-ingreso posterior al evento sísmico importante.
- Protocolos de aislamiento por tronadura.
- Monitoreo sísmico 24/7.
- Regulaciones en velocidad de extracción y crecimiento de las labores mineras.
- Fracturamiento hidráulico.

Los protocolos de re-ingreso consisten en restringir el acceso al sector afectado por algún evento sísmico de gran magnitud o tronadura y mediante el monitoreo continuo de los niveles de actividad sísmica posteriores al evento relevante la restricción de acceso al sector se mantiene hasta que la actividad sísmica vuelva a un nivel base [2]. El periodo de decaimiento de la actividad sísmica es generalmente una cuestión de horas. A medida que la minería progresa a mayores profundidades, el tiempo de decaimiento de la actividad sísmica a un nivel base aumentara. Esto implicara un aumento en las perdidas productivas debido a la restricción de acceso



del sector. Vallejos y McKinnon [2] concluyen que algunos parámetros que afectan el tiempo de decaimiento de la sismicidad inducida por la minería son: volumen de roca minada, profundidad y magnitud del evento principal.

Una de las medidas que ha demostrado ser de las más eficaces en la disminución del riesgo asociado a la sismicidad inducida y estallidos de rocas ha sido el Fracturamiento hidráulico. Araneda y Morales [3] concluye que la aplicación de Fracturamiento hidráulico en el sector a ser explotado mejora la hundibilidad, las tasas de propagación del Caving y contribuye a una disminución de la actividad sísmica sin generar eventos desastrosos como los estallidos de roca.

Los eventos de sismicidad inducida, son en la actualidad un tema de suma relevancia en la industria, ya que generan pérdidas importantes en la rentabilidad del negocio, al comprometer el cumplimiento de los planes de producción, aumento de costos de rehabilitación y la sustentabilidad de la operación.

Diversos investigadores y miembros de la industria participaron en el noveno congreso internacional de estallidos de roca y sismicidad en minas, RaSIM9 realizado en Noviembre del 2017 en Chile.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es generar una metodología que permita aplicar modelos estadísticos a la estimación del peligro sísmico en minería subterránea de Panel Caving.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Cuantificar variables geotécnicas y mineras en minería de Panel Caving de manera de generar bases de datos estandarizadas

- Calibrar y evaluar modelos estadísticos de peligro sísmico aplicados a minería de Panel Caving
- Identificar las variables geo-mineras más relevantes en la estimación del peligro sísmico

### **1.3 ALCANCES**

Los alcances son los siguientes:

- El estudio se basa en los datos e información recolectada para el Sector RENO, de la Mina El Teniente, para el periodo 2000 a 2010.
- Los modelos son calibrados para reproducir las bases de datos generadas.

### **1.4 METODOLOGÍA**

A continuación se detalla de manera general la metodología empleada en el presente trabajo:

- Identificación de variables geo-mineras.
- Generación de bases de datos.
  - Variables Geomineras.
  - Geología, unidades litológicas y Fallas.
  - Filtro Eventos Sísmicos.
- Modelos de Análisis.
  - Análisis estadístico.
  - Modelo de Regresión Logística.
  - Índice Ambiental.
- Análisis de Resultados.
- Conclusiones.

Es importante notar que para la generación de base de datos se empleó Python 2.7 [4] además de las siguientes librerías, NumPy [5], Matplotlib [6], Pandas [7]. Para el modelo de regresión logística se empleó SPSS Statistics [8].

## CAPITULO 2 ANTECEDENTES

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los antecedentes principales de las distintas áreas estudiadas en las cuales se fundamenta el trabajo realizado.

### 2.1 MINERÍA SUBTERRÁNEA

La minería consiste en el proceso de extracción de mineral desde la tierra. Históricamente los depósitos han sido explotados en forma superficial o subterránea. La selección de una de estas dos opciones depende principalmente de:

- Tamaño, forma y profundidad del depósito.
- Estructuras geológicas y condiciones geomecánicas.
- Capacidad productiva.
- Recuperación minera.
- Condiciones de seguridad.
- Impacto ambiental durante y después de las labores.
- Legislación de la zona de interés.

Según la SME [9], luego de ser evaluadas estas características se decide el método que entregue la mayor rentabilidad, sin dejar de lado el impacto social de este.

Existen distintos métodos subterráneos y variantes de los mismos, por lo mismo existen distintos modos de clasificarlo. A continuación, se presenta una clasificación general de los métodos subterráneos introducida por Hartman y Mutmansky [9]:

- No soportados o Soporte Natural:
  - Room and Pillar.
  - Sublevel Stopping.
- Soportados o Soporte Artificial:
  - Cut-and-Fill Stopping.
  - Bench and Fill Stopping.

- Shrinkage Stopping.
- VCR Stopping.
- Hundimiento Masivo (Caving):
  - Sublevel Caving.
  - Longwall Mining.
  - Block Caving.
  - Panel Caving.

El presente trabajo se centra en la variante Panel Caving por lo cual solamente se explicará ésta en más detalle.

### **2.1.1 PANEL CAVING**

Los métodos de Panel y Block Caving se caracterizan por la extracción de un volumen basal, comúnmente denominada socavación, hasta que el radio hidráulico alcance o exceda un valor crítico. La continua extracción de este volumen genera un cambio en los esfuerzos y desconfinamiento del techo del volumen socavado, provocando que este colapse en el vacío generado por la extracción. La propagación vertical del caving ocurrirá a medida que se extrae el mineral de los puntos de extracción. En cambio, la propagación horizontal ocurrirá a medida que se incorporen nuevos puntos de extracción (Brown [11]).

Brown también nota la importancia que tienen los siguientes factores en el éxito de ejecución del método:

- Secuencia del desarrollo de los niveles de socavación y extracción.
- Posición relativa y distancia del frente de hundimiento, el frente de extracción y frente de desarrollo del nivel de extracción.
- Dirección de avance de la socavación.
- Tasa de socavación.
- Altura de socavación.
- Forma de socavación.

Debido a lo anterior existen distintas variantes del Panel Caving como bien las explica Cavieres [12]:

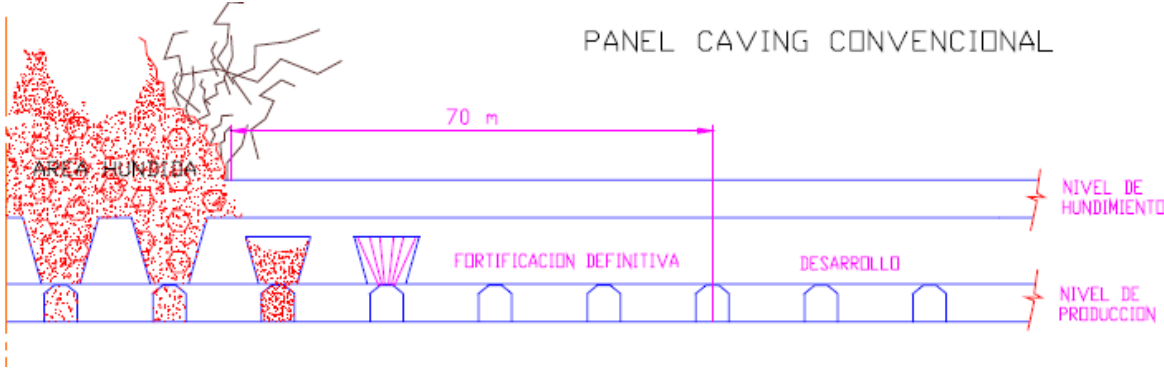


Figura 2 Panel Caving Convencional

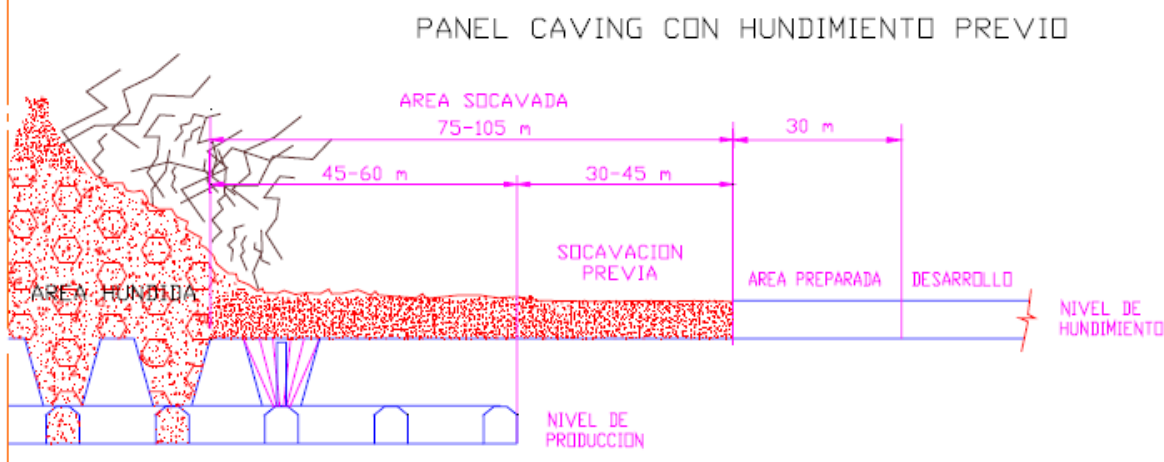


Figura 3 Panel Caving con Hundimiento Previo

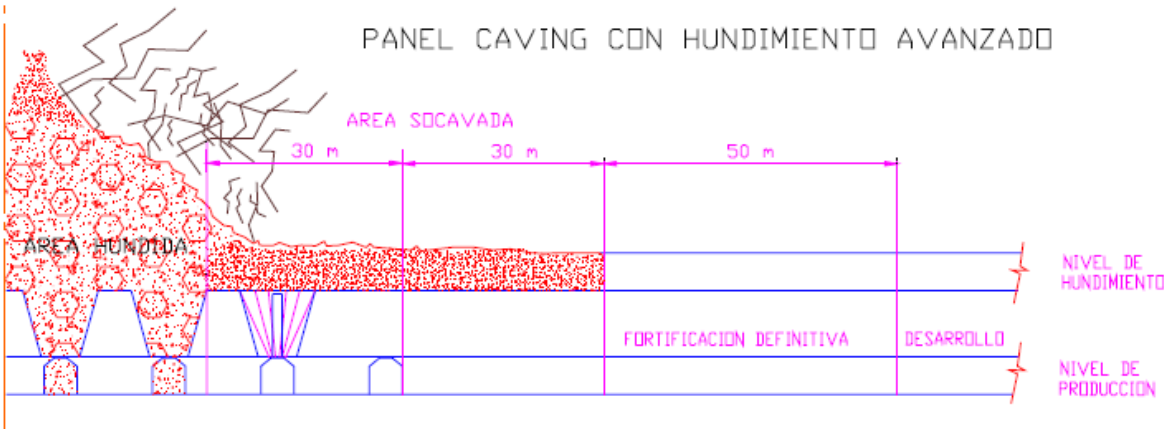


Figura 4 Panel Caving con Hundimiento Avanzado

Araneda [13] comenta que, según la experiencia en los años 80' y 90' con panel Caving convencional, los principales problemas que presentaron fueron un alto nivel de daño en el nivel de producción y baja disponibilidad de la infraestructura productiva.

Estos daños se generan debido a la alta magnitud de esfuerzos que se producen en la zona de abutment stress. Esta zona se produce debido a la redistribución de los esfuerzos producto de la cavidad generada con la socavación y posterior extracción de mineral. En la Figura 5 se muestra de manera simplificada como esta zona de transición se desplaza en función del frente de socavación. Es importante notar que en esta zona los esfuerzos inducidos pueden triplicar los esfuerzos in-situ, como lo expone Karzulovic con el factor de amplificación [14], generando graves daños a la infraestructura que se encuentra en esta zona, además de aumentar el riesgo de estallidos de rocas. Esto último se vuelve aún más crítico para el futuro de la minería a mayores profundidades (Nuevo nivel mina El Teniente).

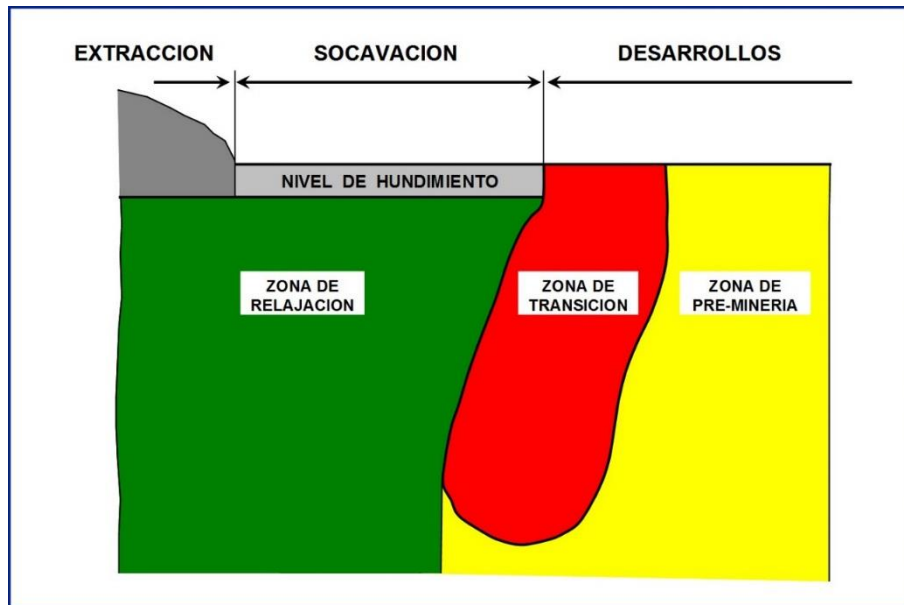


Figura 5 Comportamiento de los Esfuerzos, Abutment Stress (basado en Karzulovic, 2005 [14])

Según Araneda [13] el mejor diseño es el Hundimiento Avanzado ya que este reduce la complejidad con respecto a los desarrollos mineros, reduce el span del nivel de hundimiento y se encuentra mejor posicionado para manejar colapsos.

Jamett y Alegría [15] comentan que, a pesar del cambio a hundimiento avanzado en el sector Esmeralda, los problemas de estabilidad continuaron hasta frenar completamente el desarrollo. Debido a esto se desarrolló una nueva secuencia de explotación por bloques, cambiando el diseño minero a Panel Caving convencional con pre-acondicionamiento (Fracturamiento Hidráulico) y con la orientación del frente de hundimiento en función de las estructuras geológicas y litologías relevantes. En Julio del 2011, esta nueva estrategia entró en operación entregando buenos resultados.

Con lo anterior se debe notar que no existe un método perfecto de explotación, por lo cual es importante que en el proceso de diseño y planificación se incorporen todos los riesgos asociados a la geotecnia, a modo de no comprometer la sustentabilidad del negocio, ni la seguridad de los trabajadores.

## **2.2 MINA EL TENIENTE, SECTOR RESERVAS NORTE (RENO)**

El presente trabajo se basó en el sector RENO de mina El Teniente, CODELCO.

La mina El Teniente se encuentra ubicada en la comuna de Machalí en la Cordillera de los Andes en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, aproximadamente a unos 80 km al sureste de Santiago.



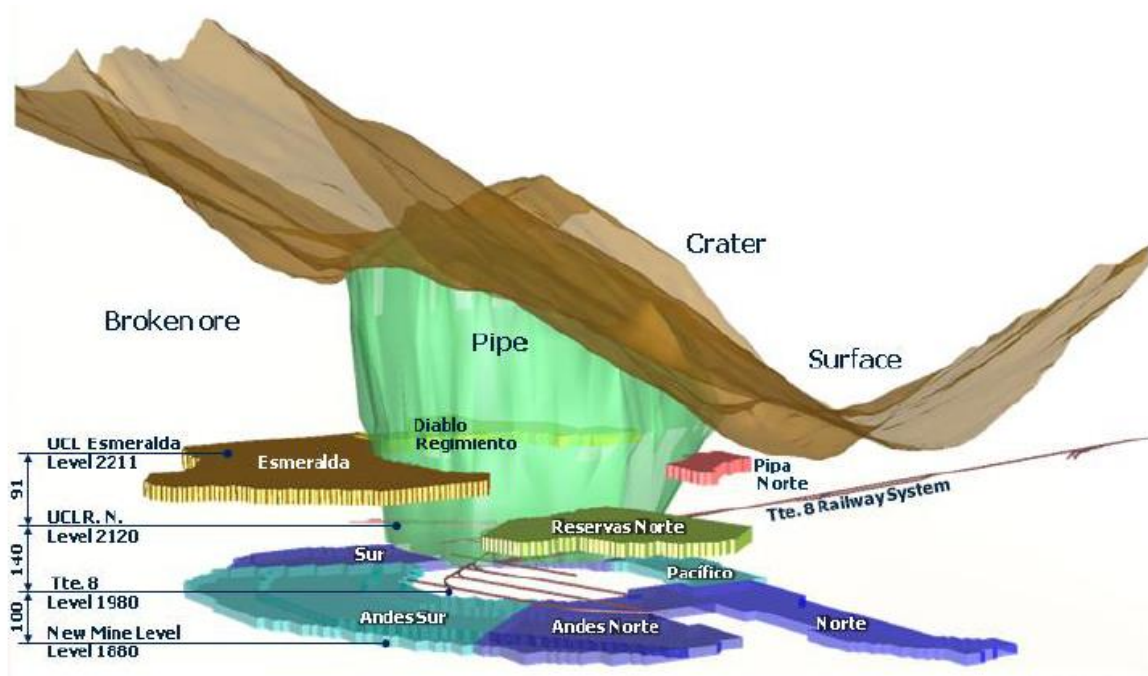


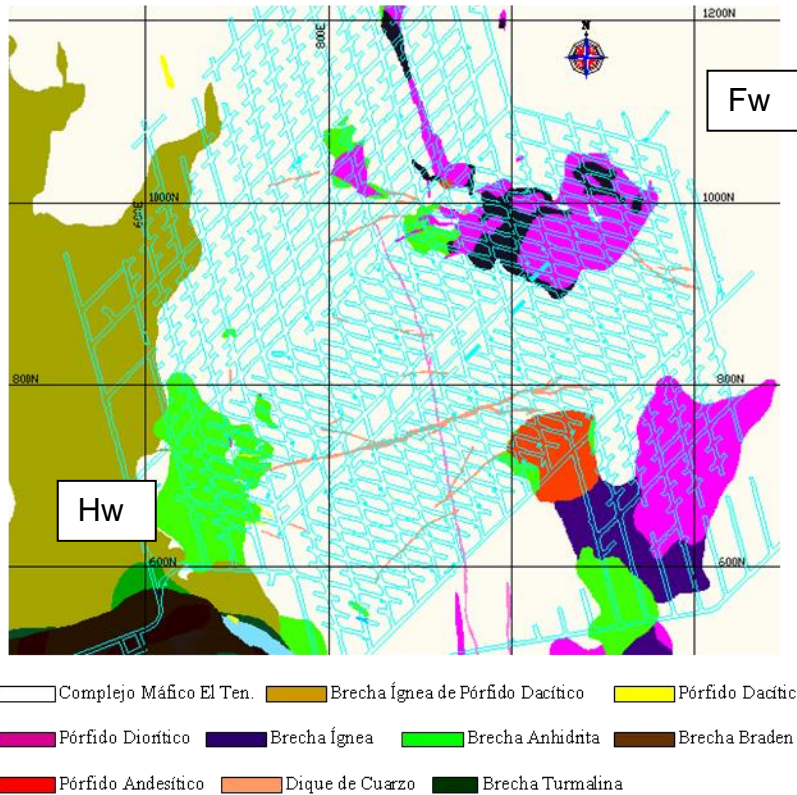
Figura 6 Mina El Teniente, Cornejo [Error! No se encuentra el origen de la referencia..]

Las reservas extraíbles para el sector RENO están definidas en torno a 128.5 Mt de mineral con una ley media de 1.11%CuT y 0,023% de Molibdeno. La variante del método Panel Caving utilizada es el Hundimiento Avanzado. El sector además se encuentra con la columna de roca sobre el nivel de hundimiento (elevación 2120 msnm.) con la aplicación de pre-acondicionamiento mediante fracturamiento hidráulico desde mediados de 2007 y durante 2010, bajo el nivel de producción en el entorno de la Falla G en el extremo Hw Sur [16].

### 2.2.1 LITOLOGÍA

El Complejo Máfico El Teniente (CMET), corresponde a la litología predominante del sector RENO. Se compone por rocas de carácter andesítico, constituyendo un complejo de rocas máficas, desde gabros a pórfidos basalto-andesíticos. La anterior se encuentra intruida por cuerpos irregulares de composición diorítica, algunos dacíticos y brechas menores [17].

Es posible presentar la litología del sector RENO, junto al layout representativo del nivel de producción en la Figura 7:



**Figura 7 Mapa litológico y layout del nivel de producción de mina el RENO. Sectorización Fw (patilla) y Hw (cabeza).**

El desarrollo de nuevas labores en los últimos años, ha permitido precisar los contactos litológicos de los cuerpos intrusivos félsicos, correspondientes al Pórfido Dacítico y al Pórfido Diorítico en los niveles de hundimiento y producción. Además, los desarrollos realizados en el sector Hw han permitido delimitar con mayor exactitud el cuerpo de Brecha de Anhidrita.

A continuación se presenta un resumen de las unidades litológicas:

**Tabla 1 Principales unidades litológicas de sector RENO, El Teniente [17]**

Nombre	Características
<b>Complejo Máfico El Teniente (CMET)</b>	Es un complejo sub-volcánico de composición básica que tiene una extensión vertical de 2 km. Corresponde a la roca de más amplia distribución en el yacimiento alojando el 90% de la mineralización de mina El Teniente. Es considerada la roca caja de los demás cuerpos intrusivos. Bajo esta denominación se agrupan diabasas, gabros y pórfidos basálticos que se han descrito regularmente como andesitas.
<b>Pórfido Dacítico</b>	Cuerpo con características de dique orientado N-S a NNW y manteo sub-vertical de 1.500 m de longitud y 50 m de potencia, ubicándose al norte del depósito. En general presenta leyes semejantes a la andesita sin embargo su distribución no es homogénea en el espacio disminuyendo hacia el norte.
<b>Pórfido Diorítico</b>	Distribuidos en la zona centro y norte, como una serie de cuerpos y diques menores alineados en dirección N30°W, presentan una gran extensión vertical, desde más arriba de Teniente 1 hasta cotas más abajo de la 1.200.
<b>Pórfido Andesítico</b>	Se presenta como un apófisis irregular en el área sureste del sector RENO, de característico color negro grisáceo debido a su intensa alteración hidrotermal principal a la que es sometido. Esta roca presenta textura porfídica característica, con fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental afanítica.
<b>Brecha Anhidrita y Turmalina</b>	Se asocian a los contactos de los pórfidos que intruyen al CMET incorporando fragmentos máficos y pórfidos. Se divide según su cemento en brecha anhidrita o turmalina y en general presentan leyes altas.
<b>Brecha Ígnea</b>	Se conocen tres tipos relacionados a los tres cuerpos intrusivos anteriores, brechas ígneas de pórfido dacítico, diorítico y andesítico. Tienen una menor distribución de área. Se ubica en el contacto entre CMET y los distintos pórfidos que la intruyen, generando potencias de centímetros a algunas decenas de metros.
<b>Diques de Cuarzo y Anhidrita</b>	Abundantes en la parte norte y oeste del depósito con espesores entre 0,2 a 3 m. En general, no desarrollan halos de alteración en la roca caja y sus contactos son tajantes.
<b>Brecha Braden</b>	Mega estructura en forma de cono invertido, de planta semicircular que se emplaza en la zona centro del yacimiento, agrupándose en ella brechas de baja ley.

En términos geotécnicos mina RENO es un sector emplazado en roca primaria, esta posee una alta capacidad de almacenar energía, una alta competencia, pero el comportamiento de este tipo de roca, es frágil y por lo tanto su actividad sísmica presenta una mayor fuente de peligro que la roca secundaria.

Las vetillas abundan en el macizo rocoso primario. La gran mayoría se encuentran selladas con rellenos bastante competentes con vetillas del tipo stockwork. Estas

estructuras predominan en la roca primaria y alojan más del 80% de la mineralización de cobre en el yacimiento.

### 2.2.2 ESTRUCTURAS PRINCIPALES EN RENO

Mina RENO posee un set de estructuras que atraviesan el sector las cuales no solo tienen una relevancia geotécnica sino también para los procesos de planificación, desarrollo, preparación y operación minera.

De sur a norte estas corresponden a: Falla G, Falla F, Falla C y Falla N1. Todas tienen la clasificación de fallas maestras (alta persistencia y espesor) menos la Falla F que es catalogada como mayor (menor persistencia que las maestras) [18].

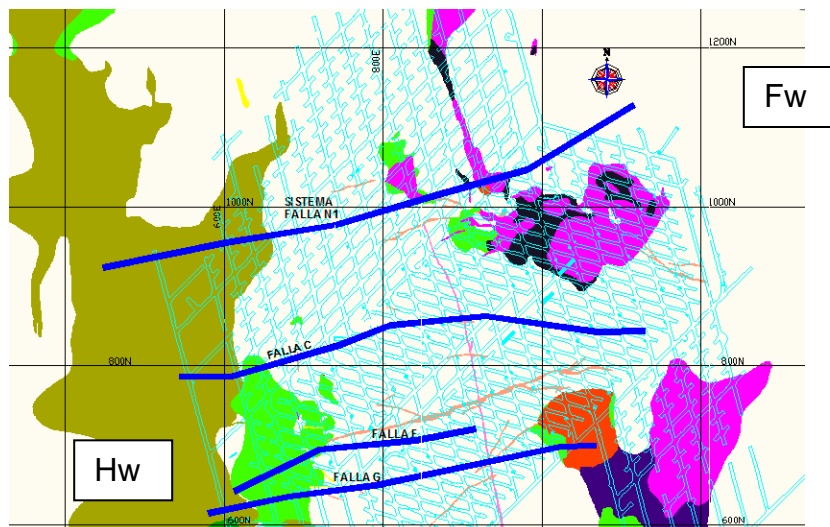


Figura 8. Emplazamiento de estructuras principales en RENO.

Tabla 2. Estructuras principales y sus características.

Nombre	Característica
<b>Falla N1</b>	Ubicada en la parte norte con rumbo N74°E y un manto de 83°S, con espesores de 0,5 m
<b>Falla G</b>	Observada en niveles de producción y hundimiento, ubicándose en el suroeste del sector con rumbo N80°E y un manto de 86°N, con espesores de 1 a 15 cm.
<b>Falla C</b>	Se ubica entre las fallas N1 y G, con umbo N89°W y un manto de 68°N. Su espesor varía de 1 a 10 cm.
<b>Falla F</b>	Observada en niveles de producción y hundimiento, con rumbo N82°E y un manto de 86°N, con espesores de 1 a 7 cm.

Como se observa en la Figura 8 y Tabla 2, sus orientaciones son preferentemente este-oeste y de manteos subverticales. Sus trazas son sinuosas y bordean los 500 metros. Los rellenos mineralógicos son de carácter blando del tipo hidrotermal tardío, tales como: anhidrita, carbonatos, molibdenita, clorita, calcopirita, yeso, turmalina y salbanda de falla.

### **2.3 GENERALIDADES DE LA SISMICIDAD**

Un evento sísmico es una onda de esfuerzo dinámico transitorio causado por falla en el macizo rocoso. Hudyma [19] explica que la vibración generada por el deslizamiento del macizo rocoso corresponde a una respuesta normal de éste a los cambios de esfuerzo causados por la creación de excavaciones mineras.

Un estallido de roca es un evento sísmico que tiene como resultados un daño visible sobre el macizo rocoso. En mina El Teniente, entienden que su definición incorpora además los impactos económicos con respecto a la pérdida de continuidad del proceso productivo, provocada por la ruptura y proyección del macizo al interior de excavaciones [20].

La sismicidad inducida y los estallidos de roca, son fenómenos que han sido durante mucho tiempo acontecimientos claves en la minería subterránea (en macizos rocosos de alta resistencia y dureza). La tendencia creciente hacia operaciones mineras altamente mecanizadas, operando con altas tasas de extracción y cada vez a mayores profundidades, ha llevado a un aumento de la prevalencia de estos sucesos en el tiempo.

Si bien la sismicidad es un tema complejo de analizar, se sostiene que las razones fundamentales de la generación de sismicidad en minas son una combinación de tres factores: esfuerzo inducido, estructuras geológicas y el método o secuencia minera (generación de pilares).

En la minería del caving para provocar el hundimiento se necesita de la generación de tronaduras las cuales se relacionan a su vez con la generación de eventos de alta magnitud.

El peligro sísmico se define comúnmente por diversos investigadores, como la probabilidad de que ocurra un evento de gran magnitud. Para entender el peligro sísmico es necesario investigar datos históricos relevantes del sector de interés [21].

El peligro sísmico varía en el tiempo. En muchas faenas mineras los cambios de esfuerzo relacionados con tronaduras es un mecanismo dominante, sin embargo poseen una influencia discontinua en el medio.

### 2.3.1 SÍSMICIDAD INDUCIDA EN MINERÍA

Como bien lo explica Cornejo [22] la sismicidad inducida es la respuesta del macizo rocoso al proceso minero, así la minería (socavación, extracción, desarrollo) perturba al macizo, sacándolo de su estado de equilibrio mecánico. El macizo libera energía produciendo fracturas o quiebres que emiten ondas elásticas, como un proceso de re-equilibrio.



Figura 9 Esquema conceptual de generación de actividad sísmica en minería de Caving [22].

Un evento sísmico es una onda de esfuerzo dinámico transitorio causado por falla o fractura en el macizo rocoso. La amplitud y frecuencia de estas ondas sísmicas radiadas, dependen en general del esfuerzo y el estado tensional general de la roca, el tamaño de la fuente sísmica radiante, la magnitud y la velocidad a la que la roca se deforma durante el proceso de fracturación (Shearer [23]). Las ondas elásticas emitidas son detectadas por sistemas de monitoreo sísmico y desplegadas como sismogramas para su procesamiento.

Para caracterizar cuantitativamente un evento sísmico se requiere [24]:

- Tiempo de ocurrencia.
- Ubicación.
- Por lo menos dos parámetros independientes asociado a la fuente sísmica:
  - Momento sísmico.
  - Energía radiada.

A continuación se presentan algunos conceptos fundamentales para comprender los eventos sísmicos. Estos conceptos fueron extraídos del trabajo de Heal [25] en el cual realiza una revisión detallada de la sismicidad inducida y como esta se relaciona con los estallidos de roca y daños en las excavaciones.

### 2.3.2 ENERGÍA RADIADA POR EL EVENTO SÍSMICO

La energía radiada ( $E_o$ ) por el evento sísmico es una porción de la energía liberada en la fuente durante un evento sísmico que es irradiada en forma de ondas sísmicas.

Es un parámetro independiente y es calculado mediante una aproximación numérica que integra los datos brutos de la velocidad producida en forma de ondas, tanto para la onda P y onda S. Boatwright y Fletcher (1984) derivaron la siguiente relación entre la energía radiada y el flujo de energía ( $J_c$ ).

$$E_o = 4\pi\rho_0c_0 \langle F_c \rangle^2 \left( \frac{R}{F_c R_c} \right)^2 J_c$$

**Ecuación 1 Energía Radiada, Boatwright y Fletcher 1984**

Donde:

- $\rho_0$  es la densidad del material de la fuente.
- $c_0$  es la velocidad de la onda P u onda S.
- R es la distancia entre la fuente y el receptor.
- $R_c$  cuenta por la amplificación de superficie libre de la onda P u onda S.
- $\langle F_c \rangle^2$  es el cuadrado de la media del coeficiente de patrón de radiación para la onda P (4/15) u onda S (2/15)(Aki and Richards, 1980).

La energía total irradiada es la suma de las componentes para la onda P y onda S.

$$E_o = E_p + E_s$$

Se ha encontrado que la razón entre la energía de la onda S y onda P ( $E_s/E_p$ ) está fuertemente relacionada con el mecanismo del evento sísmico (Gibowicz et al., 1992). Una razón mayor a 10 sugiere un mecanismo de corte (cizallamiento). Una razón menor a 3 sugiere un mecanismo tensional (Hudyma, 2007).

Típicamente, solo un 2-8% de la energía total liberada por la deformación inelástica es en forma de ondas sísmicas, con la mayoría de esta en el proceso de conminución de la roca y una pequeña parte en ruido y calor.

### **2.3.3 MAGNITUD DEL EVENTO SÍSMICO**

La magnitud de un evento sísmico es una medida relativa de su intensidad y se basa usualmente en el máximo desplazamiento medido a una frecuencia dada. Se han sido desarrollados diferentes medidas para la magnitud de un evento sísmico. Siendo la más conocida y usada la escala de magnitud Richter (1958). Esta es comúnmente utilizada en minería debido a que es aceptada universalmente y entendida por el personal.

Hudyma et al. (2003) relaciona la escala Richter con las respuesta del macizo rocoso en minas activas sísmicamente en Australia.



**Tabla 3 Relación Cualitativa entre la magnitud de un evento sísmico y como se sintió en la mina (Hudyma et al.,2003)**

<b>Magnitud Richter Aproximada</b>	<b>Descripción Cualitativa</b>
-3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeñas explosiones o golpes se escuchan cerca. Típicamente estos eventos solo son escuchados relativamente cerca de la fuente del evento.</li> <li>• Este nivel de ruido sísmico es normal después de tronaduras de desarrollo en condiciones de altos esfuerzos.</li> <li>• Los eventos son escuchables pero las vibraciones son muy pequeñas para sentir las.</li> <li>• No son detectables por la mayoría de los sistemas de monitoreo de micro sismicidades.</li> </ul>
-2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temblor significativo.</li> <li>• Se siente como buenos golpes o estruendos. Puede ser sentido remotamente de la fuente del evento (más de 100 metros).</li> <li>• Comúnmente detectado por sistemas de monitoreo de micro sismicidades.</li> </ul>
-1.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es sentido por varios trabajadores en la mina.</li> <li>• Debería ser detectable por los sistema de monitoreo sísmico</li> <li>• Se siente un temblor mayor cerca de la fuente</li> <li>• Vibraciones similares a una tronadura secundaria</li> </ul>
0.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las vibraciones se escuchan y sienten a lo largo de la mina</li> <li>• Puede ser sentido en superficie (a cientos de metros de la fuente) pero no debería ser escuchable.</li> <li>• Vibraciones sentidas en superficie son similares a las generadas por una ronda de desarrollo</li> </ul>
1.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escuchado y sentido muy claramente en superficie</li> <li>• Vibraciones sentidas en superficie similar a una tronadura de producción importante.</li> <li>• Puede ser detectado por sensores sísmicos regionales a kilómetros de distancia.</li> </ul>
2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibraciones sentidas en superficie es mayor a las de una gran tronadura de producción.</li> <li>• Sistemas geológicas pueden detectar eventos sísmicos de este tamaño</li> </ul>
3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento detectado por los sistemas de monitoreo de terremotos a lo largo de Australia</li> </ul>
4.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventos sísmico asociado a la minería mayor registrado en Australia</li> </ul>

### **2.3.4 MOMENTO SÍSMICO**

El momento sísmico ( $M_0$ ) mide la deformación inelástica en la fuente del evento sísmico. De acuerdo a Aki y Richards (1980), se calcula como:

$$M_0 = G u_s A$$

**Ecuación 2 Momento Sísmico, Aki y Richards 1980**

Donde:

- G es el módulo de elasticidad transversal o cizalladura en la fuente.
- $u_s$  es el desplazamiento promedio a lo largo de la discontinuidad.
- A es el área de deslizamiento de la discontinuidad.

En la práctica es imposible medir precisamente el desplazamiento promedio o el área de deslizamiento de una discontinuidad en una mina subterránea. El momento sísmico puede ser estimado a partir de la información de la forma de la onda. La expresión para estimar el momento sísmico fue derivada por Hanks y Wyss (1972):

$$M_0 = \frac{4\pi\rho_0c_0^3R\Omega_0}{F_cR_cS_c}$$

**Ecuación 3 Expresión derivada para estimar el Momento Sísmico, Hanks y Wyss 1972**

Donde:

- $\rho_0$  es la densidad del material de la fuente.
- $c_0$  es la velocidad de la onda.
- R es la distancia entre la fuente y el receptor.
- $\Omega_0$  es el nivel espectral de baja frecuencia.
- $R_c$  cuenta por la amplificación de superficie libre de la onda P u onda S.

### **2.3.5 MOMENTO MAGNITUD**

Se usa como magnitud local de los eventos del yacimiento, la magnitud momento o magnitud “Hanks-Kanamori” [26], definida por la Ecuación 4, donde  $M_0$  es el momento sísmico.

$$M_w = \frac{2}{3} * M_0 - 6.1$$

**Ecuación 4 Momento Magnitud.**

En función de la magnitud momento se definen los eventos sísmicos relevantes como aquellos que posee un valor mayor o igual a 1.0.

## CAPITULO 3 MODELOS

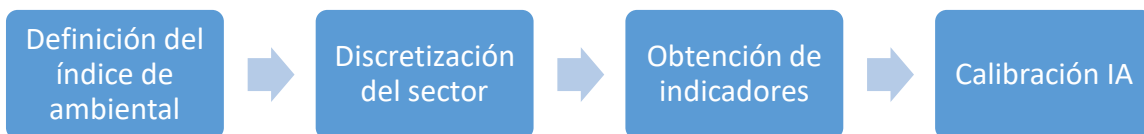
En este capítulo se presentarán los modelos que se emplearán, con sus respectivas variables y planteamientos. Los modelos planteados son los siguientes:

- Índice Ambiental.
- Regresión Logística.

### 3.1 ÍNDICE AMBIENTAL

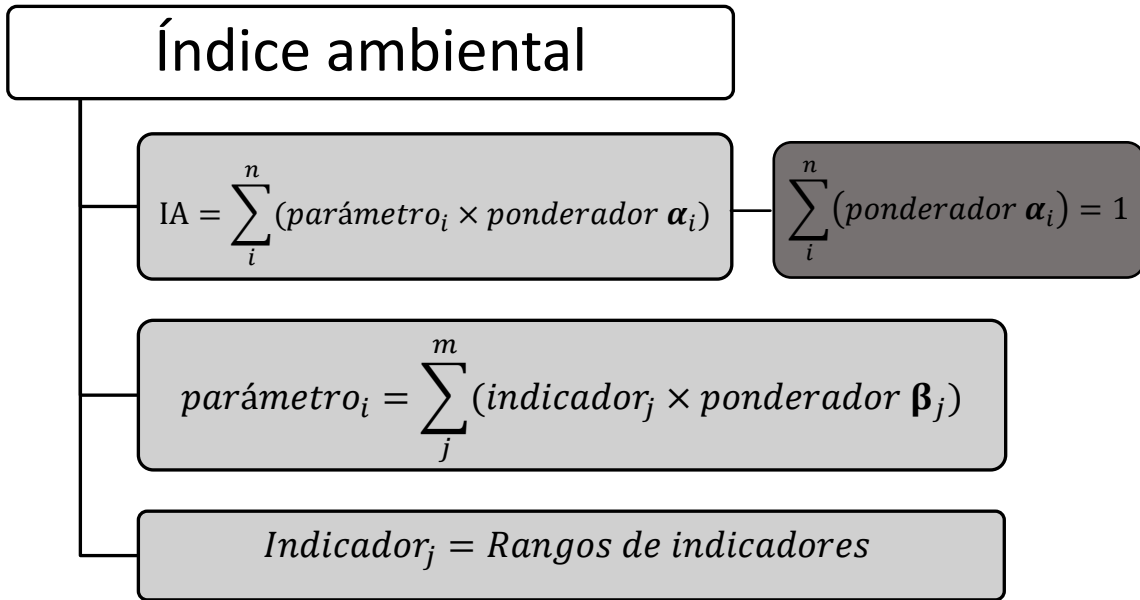
Se busca construir un índice que sea capaz de estimar la susceptibilidad de generar sismicidad inducida con cierta capacidad máxima de liberación de energía.

Este índice se basa en las condiciones geomecánicas ambientales del sector. Espinoza “et al” (2017), presentaron este índice enfocado en dar soporte a decisiones de constructibilidad de tuneles. La Figura 10 presenta la metodología utilizada para la configuración de este índice



**Figura 10 Metodología utilizada para generar el Índice ambiental**

Se define el índice como una sumatoria de parámetros, la definición general de este es la siguiente.



**Figura 11** Esquema general de la definición del índice ambiental

El objetivo de este índice es ilustrar en un mapa la distribución de variables ambientales para la zona de la mina de interés. Los coeficientes son calibrados mediante back-análisis y el índice es correlacionado con la sismicidad inducida. Este índice considera solamente parámetros pre-minería, para lo cual se propone utilizar los siguientes:

- Condición de Esfuerzos:
  - Magnitud de esfuerzos pre-existentes en la zona,  $\sigma$ .
  - Anisotropía de esfuerzos pre-existentes en la zona,  $k$ .
- Calidad geotécnica, G:
  - Energía de deformación elástica,  $U_i$ :
    - Resistencia a la compresión Uniaxial, UCS.
    - Módulo de Deformación, E.
- Geología:
  - Contactos litológicos, C.
  - Fallas geológicas, F.

### 3.2 REGRESIÓN LOGÍSTICA

Los modelos de regresión se han convertido en un componente integral de cualquier análisis de datos que busque describir la relación entre la respuesta y una o más variables que la expliquen. En este caso el resultado del modelo es discreto, al igual que algunas variables que se emplearán. La regresión logística se ha vuelto, en varios campos de estudio, el método de análisis estándar en esta situación, según lo establece Hosmer [27]. Lo que diferencia el modelo de regresión logística de un modelo de regresión lineal es que el resultado es una variable binaria o dicótoma.

La función logística refleja la probabilidad del evento (momento magnitud sobre un  $M_w^*$  crítico) expresada como razón de chances (“Odds ratio”):

$$\frac{P(M_w \geq M_w^*)}{P(M_w < M_w^*)} = e^z$$

Donde:

$$z = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i$$

De Manera que:

$$z = \ln \left[ \frac{P(M_w \geq M_w^*)}{P(M_w < M_w^*)} \right]$$

- Z: es una medida de la contribución de todas las variables independientes  $x_i$  utilizadas en la construcción modelo.
- $\beta_i$ : son los coeficientes de regresión de las variables, obtenidos mediante algoritmos de Machine Learning, que pueden ser positivos o negativos.
- $X_i$  representan las variables geo-mineras estimadas mensualmente.

P es la respuesta categórica que representa la probabilidad de un resultado en particular y presenta valores asignados de 1 ó 0.

El método que se empleará para construir el modelo es el siguiente:

- Obtención de variables y generación de base de datos.
- Se incluirán todas las variables que se estimen necesarias.

- Se empleará el método de Backward Elimination, empleando un p-value crítico de 5-10%.
- Se evalúa el desempeño del modelo y curva ROC (Característica Operativa del Receptor).

### 3.2.1 DESEMPEÑO DEL MODELO Y CURVA ROC

Se presenta el procedimiento utilizado para evaluar el desempeño del estimador probabilístico. Dada una probabilidad umbral de decisión ( $P^*$ ), es decir, si  $P(M_w \geq M_w^*) \geq P^*$  entonces el indicador indica un evento con  $M_w \geq M_w^*$ , se estiman los siguientes escenarios con el objetivo de evaluar la matriz de contingencia (Tabla 4):

- TP(Acierto):  $P(M_w \geq M_w^*) \geq P^*$  y ocurre un evento con  $M_w \geq M_w^*$ .
- FN(Fallido):  $P(M_w \geq M_w^*) < P^*$  y ocurre un evento con  $M_w \geq M_w^*$ .
- FP(Falsa Alarma):  $P(M_w \geq M_w^*) \geq P^*$  y no ocurre un evento con  $M_w \geq M_w^*$ .
- TN(Negativo correcto):  $P(M_w \geq M_w^*) < P^*$  y no ocurre un evento con  $M_w \geq M_w^*$ .

Tabla 4 Matriz de contingencia

		Valor actual	
		Evento con $M_w \geq M_w^*$	Evento con $M_w < M_w^*$
Valor estimado	Evento con $M_w \geq M_w^*$	<b>TP</b>	<b>FP</b>
	Evento con $M_w < M_w^*$	<b>FN</b>	<b>TN</b>
		<b>P</b>	<b>N</b>

A partir de la matriz de contingencia es posible estimar las siguientes métricas de desempeño:

#### Ecuación 5 Métricas Desempeño

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$

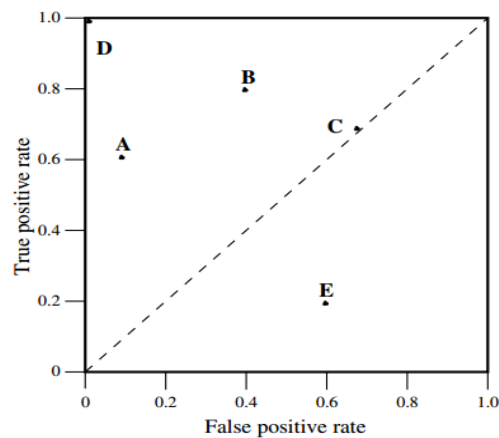
$$PSS = TPR - FPR$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

Donde TPR corresponde a la tasa de aciertos, FPR corresponde al porcentaje de falsas alarmas. PSS corresponde a una medida de desempeño (“Skill Score”) propuesto por Peirce (1884) y ACC es la proporción de resultados verdaderos en la población de casos denominados exactitud. Un indicador perfecto cumple con  $TPR=1$ ,  $FPR=0$ ,  $PSS=1$ ,  $ACC=1$ .

Mediante la examinación de la matriz de contingencia y la maximización de la métrica de desempeño PSS, es posible encontrar un umbral de decisión óptimo ( $P^*$ ) que permita optimizar la clasificación del modelo determinado.

El análisis ROC es descrito por Fawcett [28] y permite analizar y comparar el comportamiento de distintos indicadores. Un mejor indicador posee una alta tasa de aciertos y baja tasa de falsas alarmas.



**Figura 12 Curva ROC (Fawcett,2005)**

El área bajo la curva o AUC es el estadístico por excelencia para medir la capacidad discriminante de la prueba, además de comparar pruebas entre sí. El criterio de Swets [29] dicta que un área por debajo de 0.7 tiene una baja capacidad discriminante y que por debajo de 0.9 puede ser útil para algunos propósitos, catalogando a las mayores de 0.9 con alta exactitud.

# CAPITULO 4 GENERACIÓN DE BASE DE DATOS Y ESTADÍSTICAS

Para este trabajo fue necesario generar una completa base de datos en función de las variables que se utilizarán. Para esto se debió programar con Python 2.7 [4] distintos algoritmos para extraer la información requerida en el formato deseado. A continuación, se detallan las variables de la base de datos generada. Es importante notar que se logró automatizar en gran parte la obtención de las variables presentadas a continuación, siendo esto un aporte importante para futuros desarrollos.

## Modelo de regresión logística

- Geología:
  - Unidades Litológicas.
  - Unidades Geotécnicas:
    - Resistencia a la compresión uniaxial, UCS.
    - Módulo de deformación a escala de roca intacta, E.
    - Frecuencia de Vetillas blandas de espesor  $\geq$  a 1mm., P<sub>10</sub>.
    - Área de estructuras por unidad de volumen [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>], P<sub>32</sub>.
  - Fallas y estructuras.
- Condición de Esfuerzos:
  - Profundidad.
  - Esfuerzos in-situ.
- Variables Mineras:
  - Frentes mineros:
    - Hundimiento.
    - Extracción.
    - Régimen.
  - Definición de Áreas:



- Área Socavada.
  - Área Incorporada.
  - Área en Quiebre.
- Ancho de los frentes:
  - Frente de Socavación.
  - Frente de Extracción.
- Velocidad de Extracción.
- Angulo de Extracción.
- Esfuerzos verticales en la zona de Abutment.
- Presencia de Fracturamiento hidráulico.
- Sismicidad inducida:
  - Eventos sísmicos en zona sísmica.
  - Eventos sísmicos en zona de Abutment Stress.

### **Parámetros Índice Ambiental**

- Geología:
  - Contactos litológicos.
  - Fallas.
- Condición de esfuerzos:
  - Esfuerzo Principal mayor.
  - Anisotropía.
- Geotecnia:
  - Resistencia a la compresión uniaxial, UCS.
  - Módulo de deformación medido en laboratorio, E.

## **4.1 GEOLOGÍA**

A continuación, se presenta el procedimiento generado para procesar la Geología del sector. Se debe notar que para obtener estos resultados fue necesario realizar una limpieza y cambio de formato del input entregado a modo de poder procesarlo en Python y obtener los resultados buscados.

#### 4.1.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

Se tienen 18 unidades litológicas en la Mina El Teniente, CODELCO.

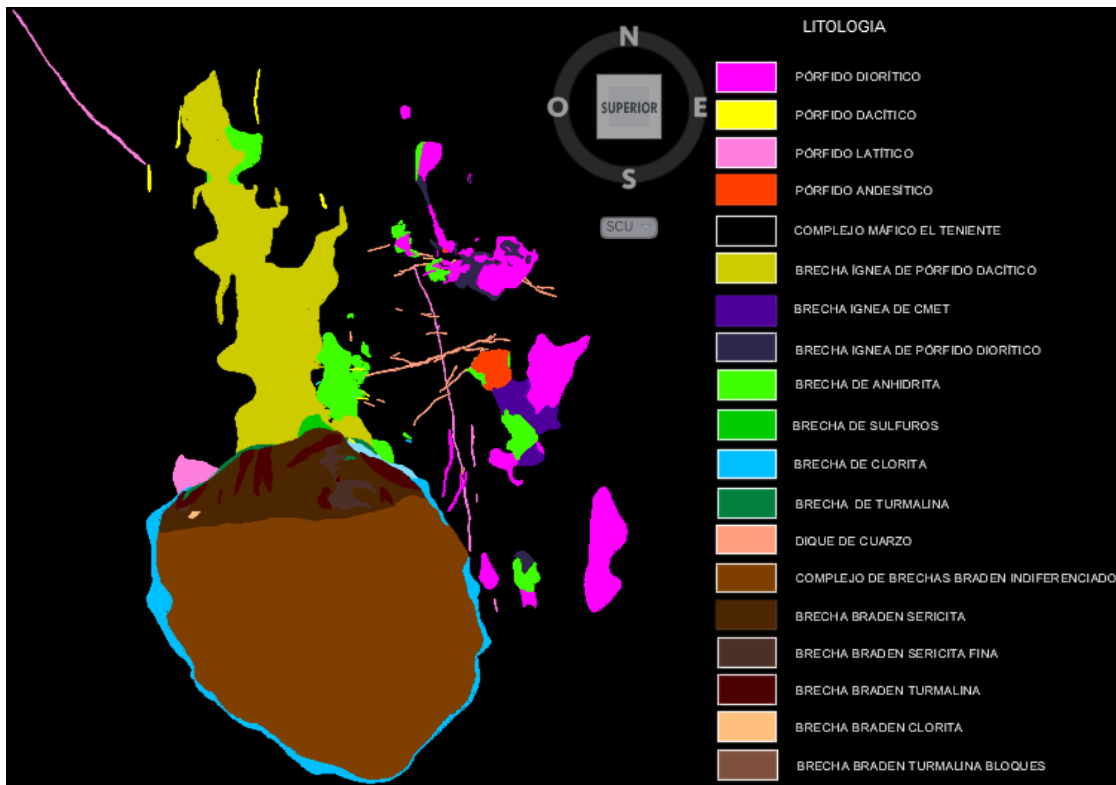
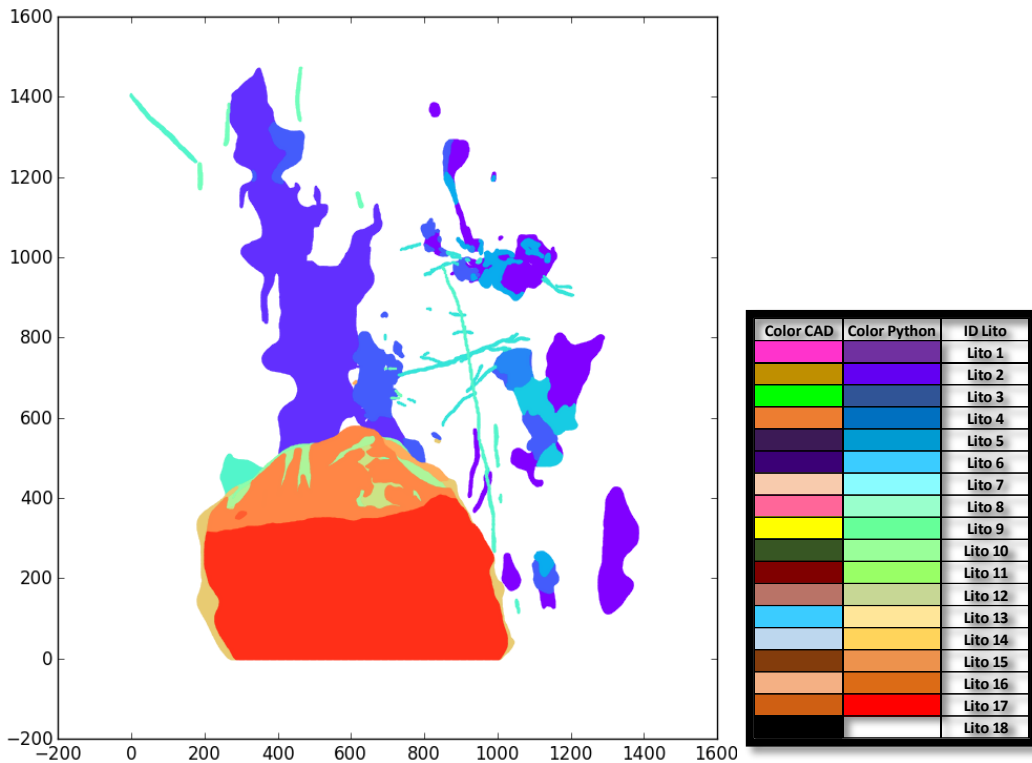


Figura 13 Litologías Mina El Teniente, AutoCAD. (Plano Geológico Integrado, Nivel de Hundimiento 2121, GL9-10649)

Con el fin de poder utilizar esta información se creó un algoritmo que discretiza estas litologías en nubes de puntos equi-espaciados cada 1 metro, obteniendo lo siguiente (Figura 14).

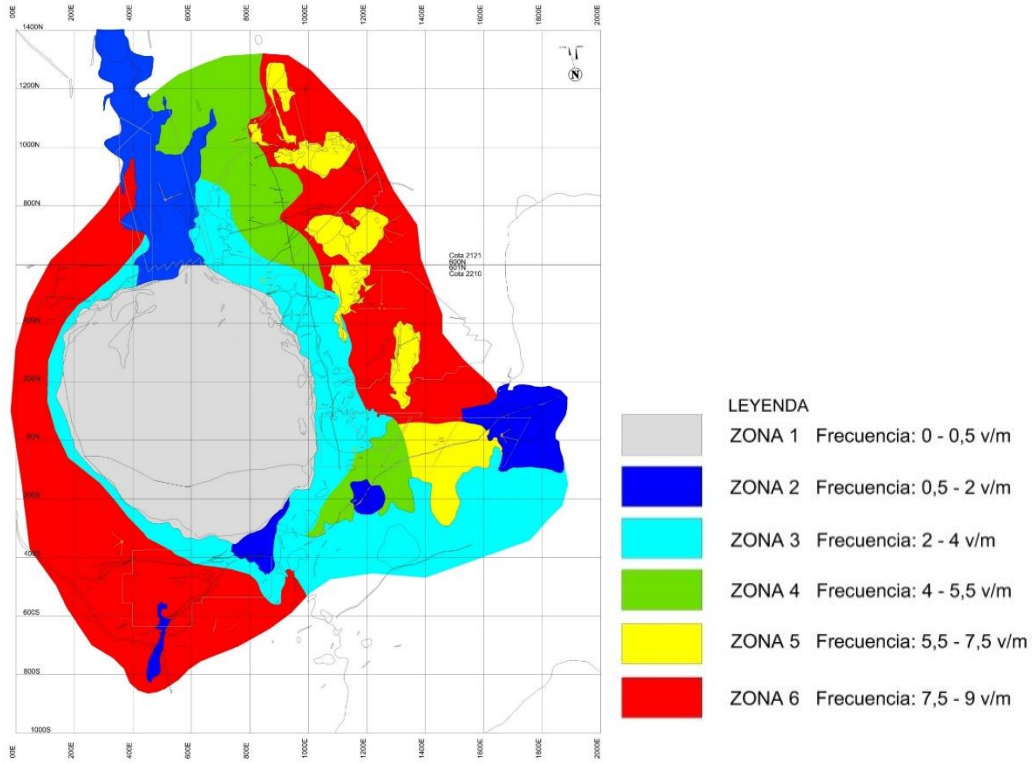


**Figura 14 Litologías Mina El Teniente, Generadas en Python**

Con esta información es posible determinar la proporción geológica para cualquier polígono, como también la presencia de contactos litológicos en la zona de interés.

#### **4.1.2 UNIDADES GEOTÉCNICAS**

Se tienen 6 zonas geotécnicas identificadas por Brzovic y Schachter [30]. La Figura 15 corresponde al plano de desarme potencial del macizo rocoso durante el proceso minero.



**Figura 15 Plano de Zonas geotécnicas definidas a partir del desarme potencial de macizo rocoso [30]**

Para cada una de estas zonas se tiene la siguiente información.

Tabla 5 Zonas Geotécnicas [30]

Zonas de desarme potencia I	Sector (Roca primaria)	Vetillas blandas de espesor $\geq 1\text{mm}$		Fallas $P_{10}$ ( $\text{m}^{-1}$ )	UCS (MPa)	E (GPa) [31]
		$P_{10}$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$P_{32}$ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )			
Zona 1	Brecha Braden – Sector Pipa	<0.5	-	-	68	27
Zona 2	Dacita – Sector Dacita	1.6	3.1	0.05	167	39
	Brecha Hidrotermal – Sector Esmeralda Fw	1.5	2.6	0.16	68	27
Zona 3	Complejo Máfico El Teniente - Sector Reserva Norte Corbata	3.6	6.6	0.08	121	48
	Pórfido Diorítico – Sector Esmeralda Hw	3.6	6.6	0.16	140	48
Zona 4	Complejo Máfico El Teniente – Sector Reservas Norte Hw	4.4	7.6	0.07	121	57
	Complejo Máfico El Teniente – Sector Esmeralda Hw	4.5	8.6	0.16	121	57
Zona 5	Pórfido Diorítico – Sector Pilar Norte (intermedio)	7.0	12.5	0.12	140	48
	Complejo Máfico El Teniente – Sector Esmeralda Fw	5.9	10.01	0.43	121	57
Zona 6	Complejo Máfico El Teniente – Sector Pilar Norte y Reservas Norte Fw	8.1	14.9	0.12	121	50
	Complejo Máfico El Teniente – Sector Diablo Regimiento	8.0	14.5	0.40	121	50

Se creó un algoritmo que realiza la discretización de las zonas en nubes de punto equi-espaciados cada 1 metro. Con los resultados del algoritmo y los valores de la Tabla 5 se obtiene los parámetros geomecánicos para cualquier polígono de interés.

#### 4.1.3 FALLAS Y ESTRUCTURAS

Para analizar las fallas geológicas se construyó un algoritmo que discretiza estas en puntos espaciados cada 0.5 metros a lo largo de éstas. No se consideró la potencia de éstas para el análisis.

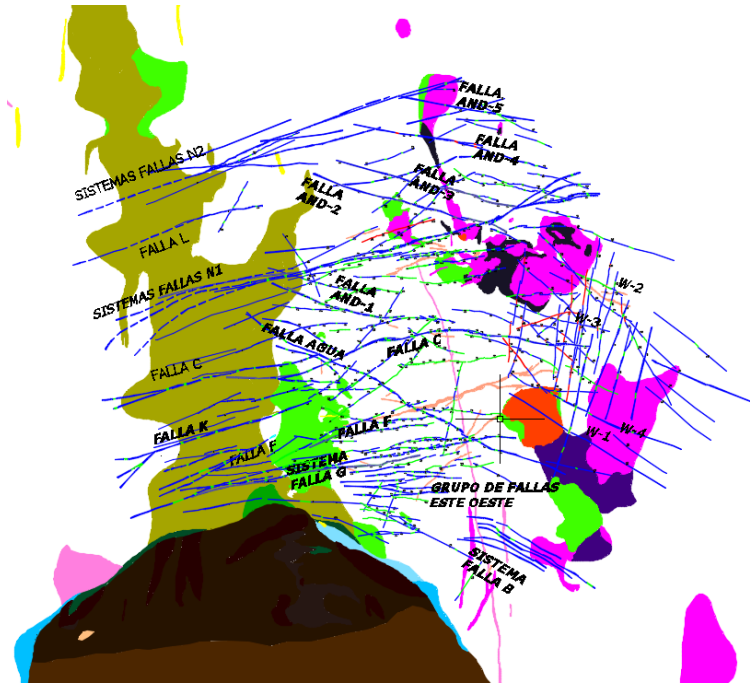


Figura 16 Fallas Geológicas, Mina El Teniente, AutoCAD

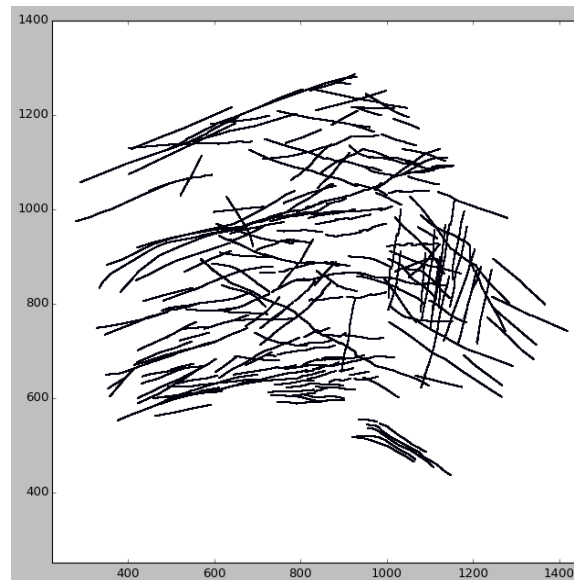


Figura 17 Discretización de Fallas Geológicas, Python

Con estos resultados (Figura 17) es posible determinar para cualquier polígono si en este se encuentran presentes fallas geológicas. Además, es posible identificar cuál falla principal se encuentra en el polígono de interés.

## 4.2 CONDICIÓN DE ESFUERZOS

Para determinar la profundidad se realizó un algoritmo que obtiene la proyección de cualquier punto en función de la topografía.

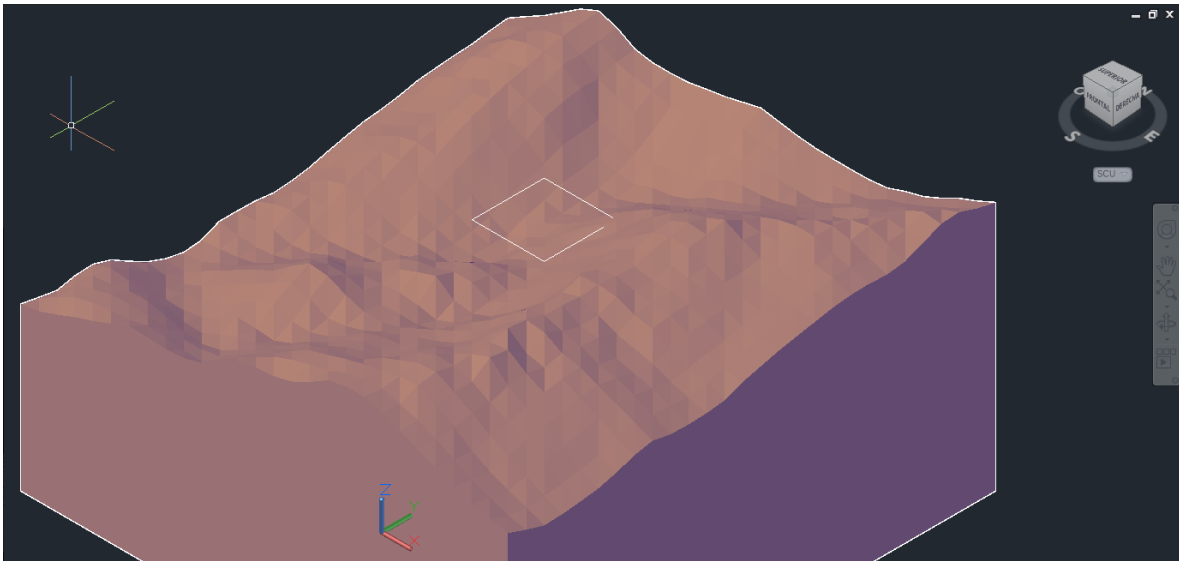


Figura 18 Topografía Mina El Teniente, AutoCAD

La topografía es una triangulación por lo cual en una vista en planta son solamente triángulos. Con esto en mente se determina para cualquier punto a qué triángulo pertenece, con esto se obtiene la ecuación del plano y la posterior proyección del punto en este para determinar la cota de corte con la superficie. Se obtiene los resultados presentados en la Figura 19.

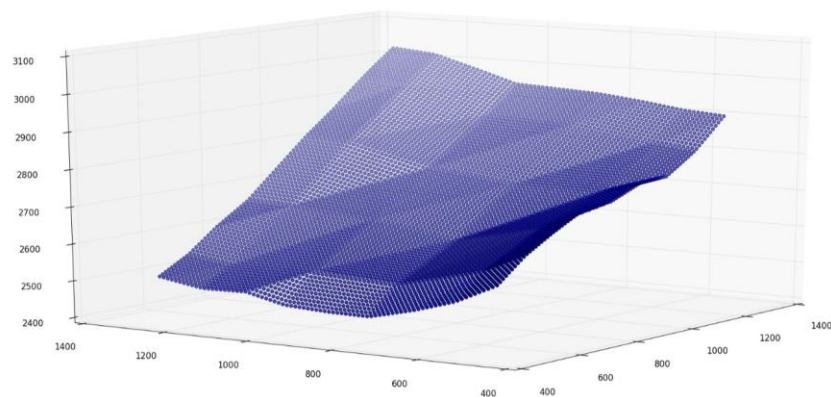


Figura 19 Topografía sector RENO, obtenido en Python

Con esto es posible obtener la profundidad para cualquier punto. En las secciones siguientes se explicará el punto representativo utilizado para cada caso.

En base al estudio realizado por AKL [32] se obtienen las siguientes relaciones para los esfuerzos in-situ en función de la profundidad.

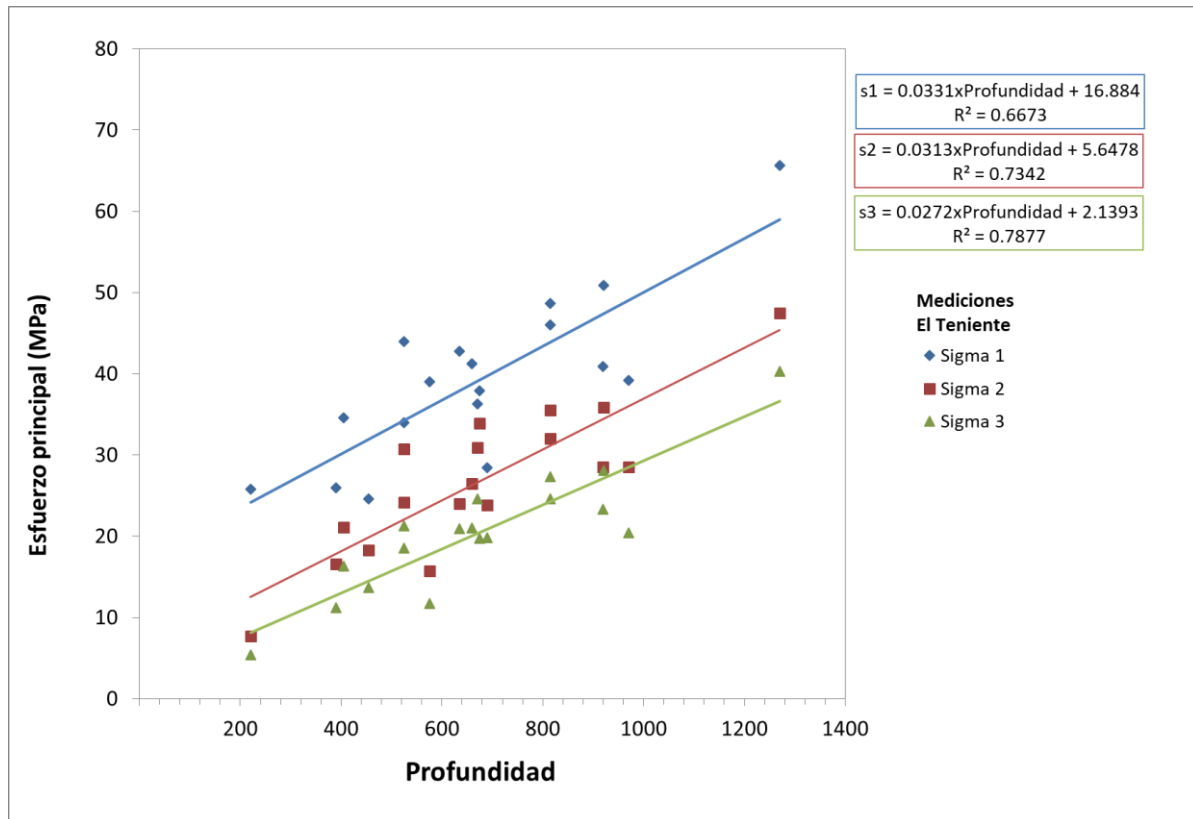


Figura 20 Modelo de Esfuerzos In-situ utilizando los promedios de sectores indicados por AKL [32]

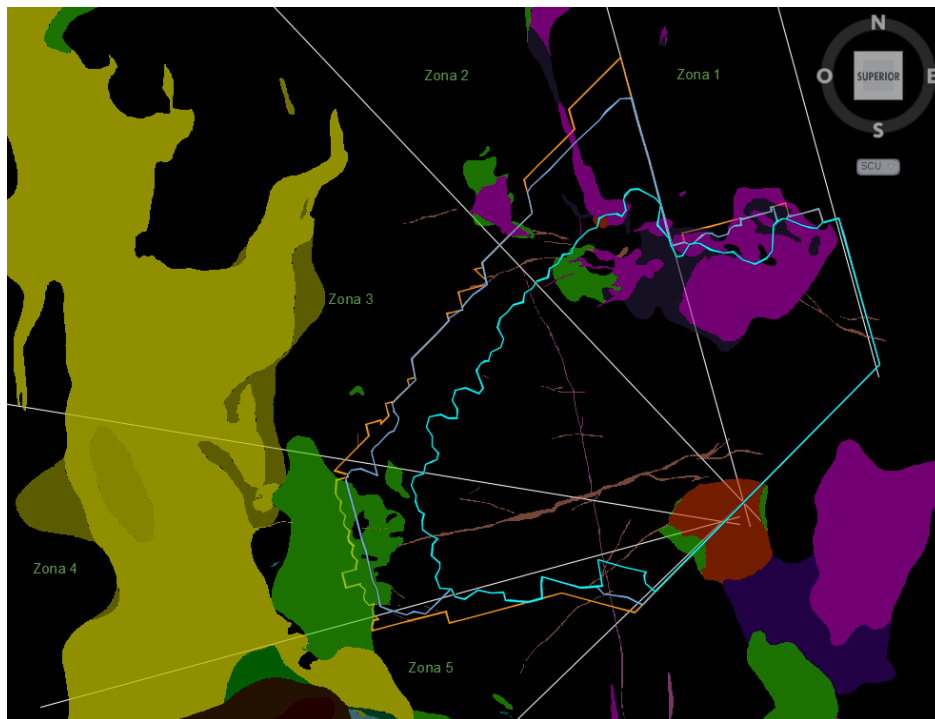
### 4.3 VARIABLES MINERAS

Antes de entrar en detalle con cada una de las variables mineras obtenidas es importante definir las zonas de análisis que se emplearán en este estudio.

Las zonas que se emplearán son las definidas en función de las zonas empleadas por Cornejo [33]. Estas zonas de análisis se definen conjugando variables geotécnicas y mineras, respetando el contacto entre unidades geotécnicas, diseño



minero (variante, geometría) y la altura de columna (diferenciación entre baja y alta montaña). En la Figura 21 se muestran las zonas a utilizar.



**Figura 21 Definición de zonas de Análisis, Frentes mineros Diciembre 2010, Sector RENO.**

La generación de los frentes sigue la evolución temporal de la minería. La escala temporal escogida es mensual.

En consecuencia, a lo anterior se tendrán cinco casos por mes (uno por zona), lo que se traduce en un total de 660 casos para el periodo Enero 2000 - Diciembre 2010.

A continuación, se detalla cada uno de los frentes mineros obtenidos y el procedimiento realizado para esto.

#### **4.3.1 FRENTES MINEROS**

En la minería de panel Caving se definen tres frentes mineros relevantes, Frente de Socavación, Frente de Extracción y Frente de Régimen. A continuación, se detallan las consideraciones y la forma en la cual se obtuvieron estos frentes mensualmente

para el sector RENO en el periodo 2000-2010. Cada frente fue trazado manualmente siguiendo las consideraciones explicadas a continuación.

#### 4.3.1.1 FRENTE DE SOCAVACIÓN

Este frente se define en función de las socavaciones realizadas en el nivel de hundimiento. Para trazarlo se utilizan los polvorazos respectivos asociados a cada mes. En la Figura 22 se muestran los frentes de socavación para el mes de diciembre de cada año, además del frente inicial correspondiente a enero del 2000.

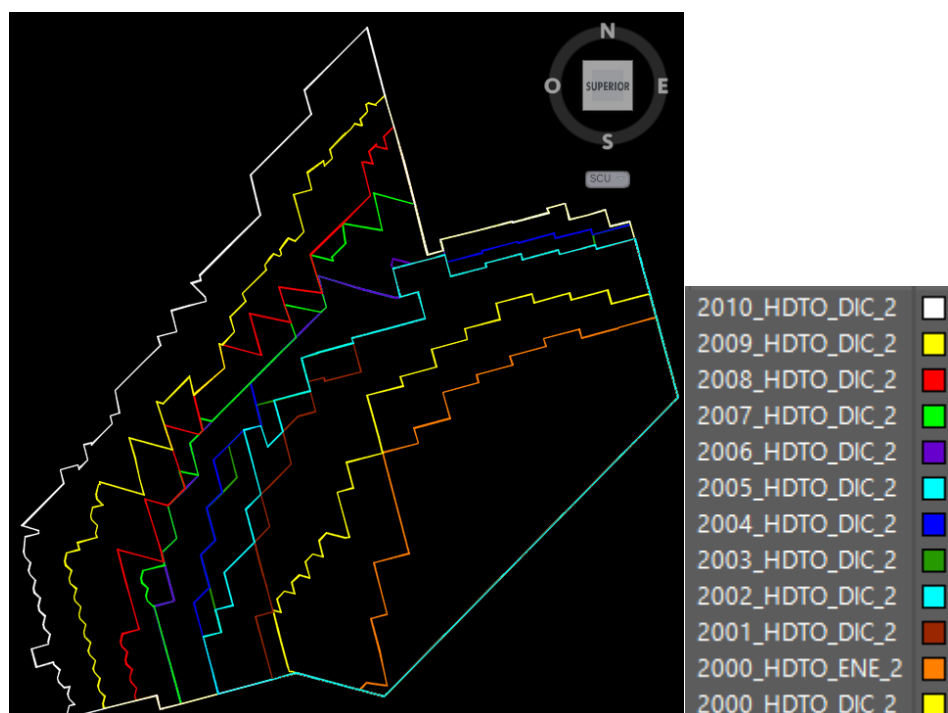


Figura 22 Frentes de Socavación 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.

#### 4.3.1.2 FRENTE DE EXTRACCIÓN

Para determinar el frente de extracción se utiliza el catálogo de extracción. A cada punto de extracción se le asigna un elipsoide de radio de 10 metros. Con esto se traza el frente de extracción conteniendo todo los puntos de extracción activos. Además se impone que el frente de extracción no puede sobrepasar al frente de hundimiento. En la Figura 23 se muestran los frentes de extracción para el mes de diciembre de cada año, además del frente inicial correspondiente a enero del 2000.

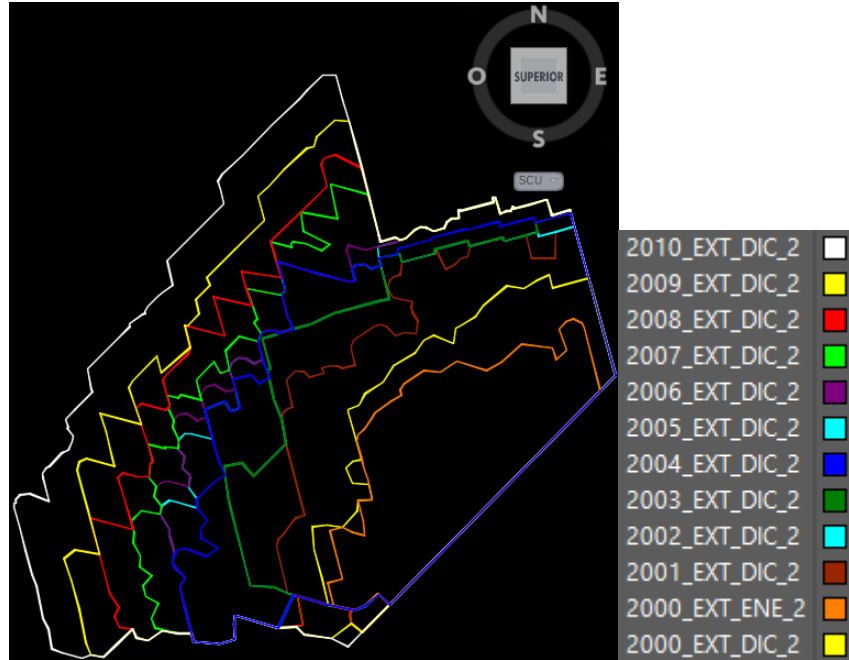


Figura 23 Frentes de Extracción 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.

#### 4.3.1.3 FRENTE DE RÉGIMEN

Para que un punto de extracción se considere en régimen debe cumplir que la altura extraída alcanza 80 metros o un 30% de la altura de mineralización primaria.

Con esto siguiendo el mismo procedimiento del frente de extracción se obtienen los frentes en régimen mensuales. El frente de régimen no puede sobrepasar al frente de extracción. En la Figura 24 se muestran los frentes de régimen para el mes de diciembre de cada año, además del frente inicial correspondiente a enero del 2000.

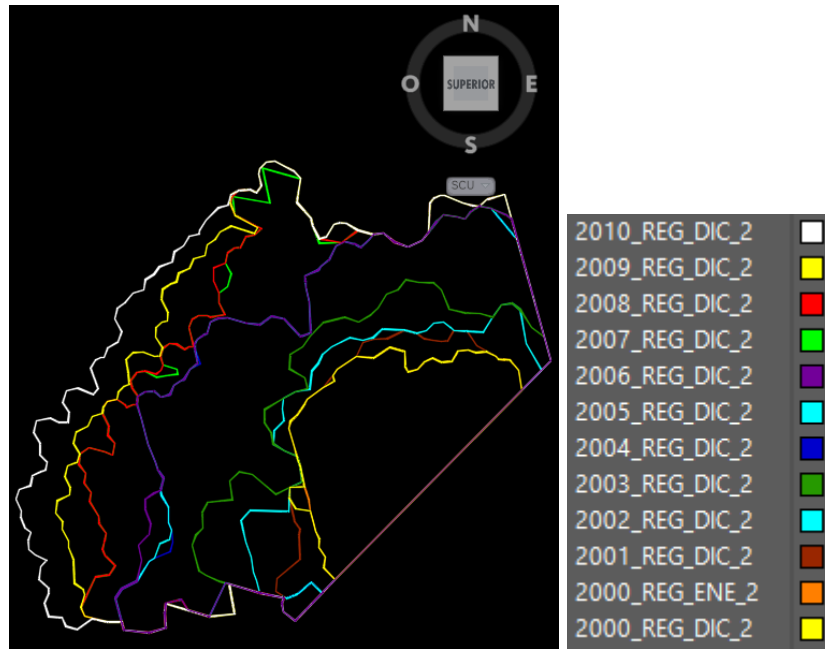


Figura 24 Frentes de Régimen 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.

Con estos frentes y las zonas de análisis definidas se obtienen las siguientes variables mineras.

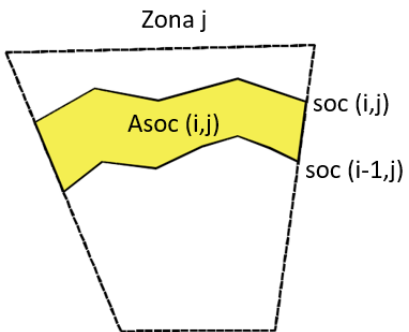
#### 4.3.2 DEFINICIÓN DE ÁREAS

A continuación se detallará cada área obtenida a partir de los frentes mineros y sus estadísticas respectivas.

Se construyó un algoritmo en Python para obtener cada una de las áreas que serán explicadas a continuación.

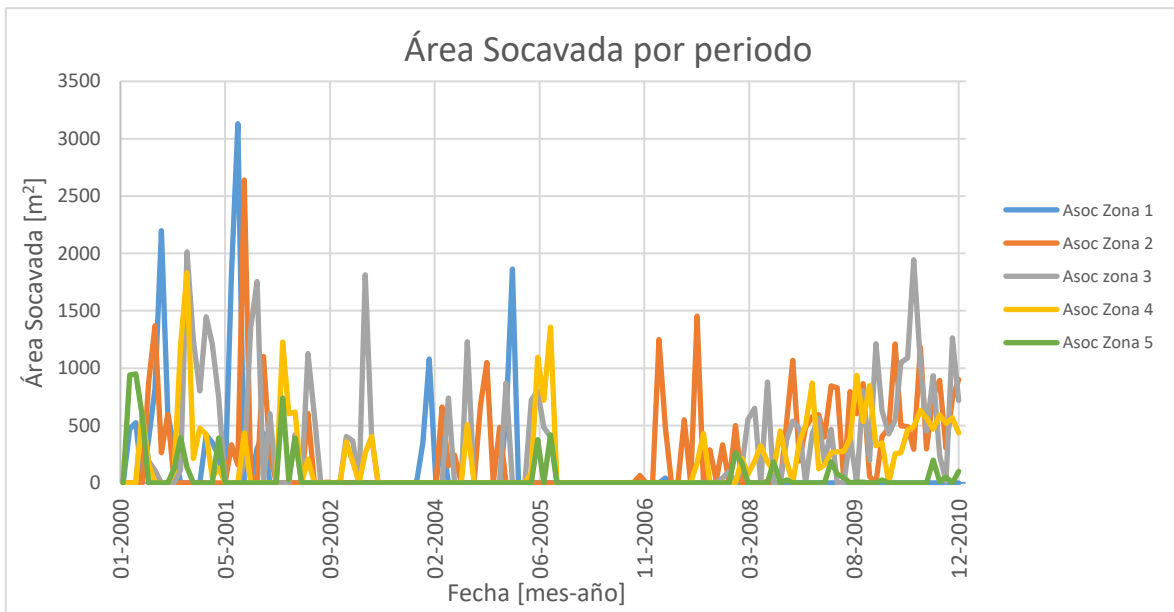
##### 4.3.2.1 ÁREA SOCAVADA

Se define como el área que se encuentra entre frentes de socavación de dos periodos de tiempo. En la Figura 25 se esquematiza el área socavada.

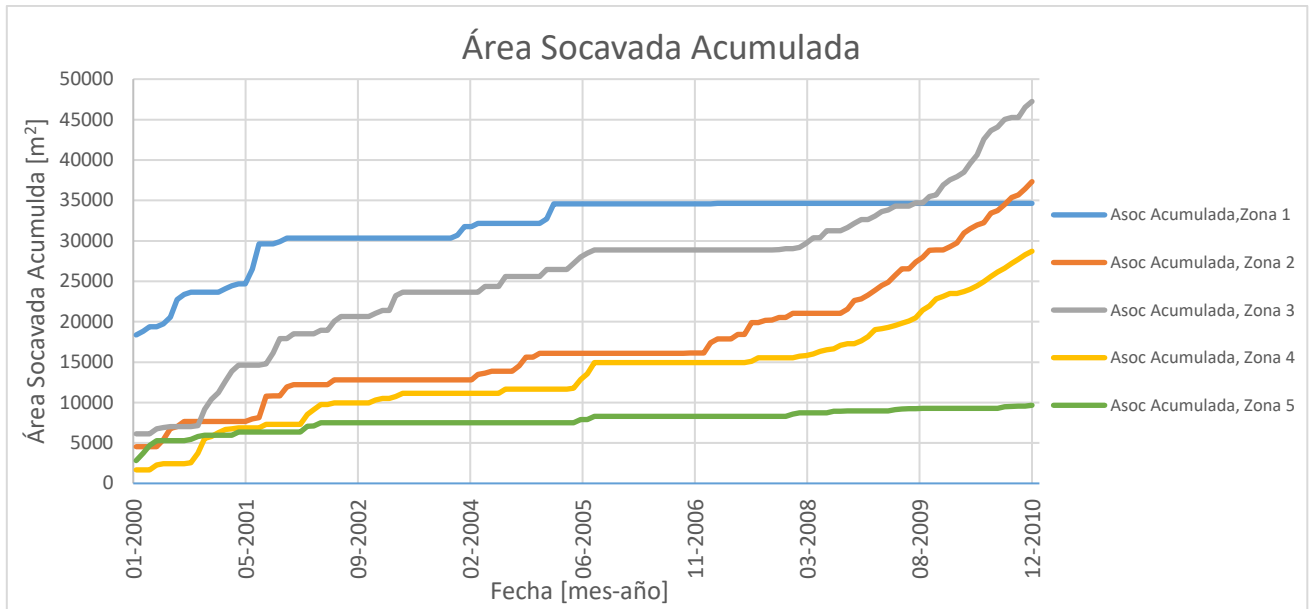


**Figura 25 Área Socavada periodo i**

Para cada zona definida en la Figura 21 se obtiene mensualmente el área socavada. En la Figura 26 se muestra el gráfico del área socavada por periodo para cada zona.



**Figura 26 Gráfico Área Socavada por Zona y periodo**



**Figura 27 Gráfico Área Socavada Acumulada por zona.**

En la Figura 27 el área inicial de cada zona corresponde al área del frente de socavación para Enero del 2000. Además se observa el área socavada acumulada para cada zona. De este gráfico se desprende lo siguiente:

- El frente de socavación en la zona 1 se encuentra detenido desde Febrero del 2005.
- En el periodo de mediados del 2005 hasta fines del 2006 no se producen socavaciones en ninguna zona.
- La zona 2, 3, 4 siguen una tendencia similar con respecto a las socavaciones, notando que a partir del año 2007 (Aplicación de Fracturamiento Hidráulico en el sector) el ritmo de socavación aumenta significativamente.
- La zona 5 solamente presenta socavación en 27 periodos de los 132 periodos estudiados. Con una media de socavación inferior al resto de las zonas (Tabla 6).

Tabla 6 Estadística Descriptiva Área Socavada por periodo

<i>Área Socavada por periodo[m<sup>2</sup>]</i>					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
<b>Media</b>	123.3	248.4	311.5	204.9	51.9
<b>D. estándar</b>	424.4	419.7	473.5	325.0	160.4
<b>Mínimo</b>	0	0	0	0	0
<b>Máximo</b>	3130.9	2640.0	2013.9	1830.6	950.3
<b>Suma</b>	16275	32787	41113	27051	6844
<b>Periodos con socavación</b>	22	59	62	63	27
<b>Media</b>	739.8	555.7	663.1	429.4	253.5

#### 4.3.2.2 ÁREA INCORPORADA

Se define como el área que se encuentra entre frentes de extracción de dos periodos de tiempo. En la Figura 28 se esquematiza el área incorporada.

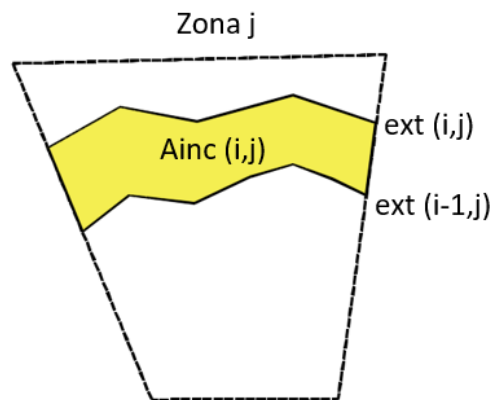
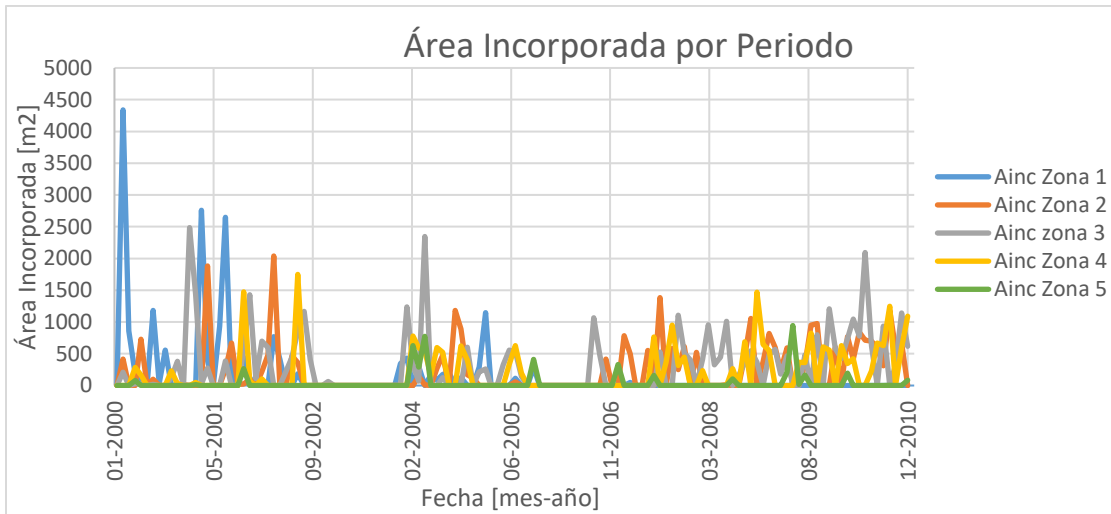
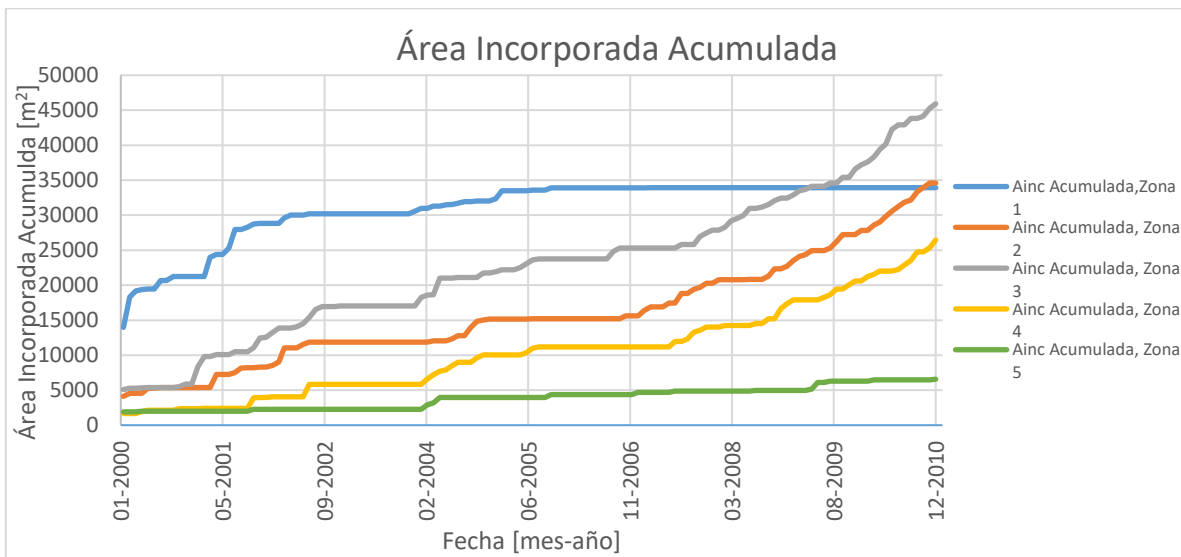


Figura 28 Área Incorporada periodo i

Para cada zona definida en la Figura 21 se obtiene mensualmente el área incorporada. En la Figura 29 se muestra el gráfico del área incorporada por periodo para cada zona. En la sección 6.1.2 se correlacionará esta variable con los eventos sísmicos relevantes (sección 4.4).



**Figura 29 Gráfico Área Incorporada por Periodo y Zona**



**Figura 30 Gráfico Área Incorporada Acumulada por zona.**

En la Figura 30 el área inicial de cada zona corresponde al área del frente de extracción para Enero del 2000. Además se observa el área incorporada acumulada para cada zona. De este gráfico se desprende lo siguiente:

- Desde Agosto del 2002 a fines del 2003 no se presentaron cambios en los frentes de extracción, esto también se observa en la Figura 23.
- En el periodo desde mediados del 2005 hasta fines del 2006 no se producen incorporaciones de área.



- Desde el 2007 se aprecia un incremento constante del área incorporada para las zonas 2,3 y 4, siguiendo la tendencia del área socavada observada en la Figura 27.

Tabla 7 Estadística Descriptiva Área Incorporada

<i>Área Incorporada por periodo [m<sup>2</sup>]</i>					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
<b>Media</b>	151.2	230.9	309.4	187.8	35.4
<b>D. estándar</b>	532.1	388.1	476.4	343.6	132.8
<b>Mínimo</b>	0	0	0	0	0
<b>Máximo</b>	4339.3	2039.3	2486.4	1749.4	944.3
<b>Suma</b>	19957	30484	40836	24795	4669
<b>Periodos con Incorporación</b>	31	57	70	47	19
<b>Media sin 0</b>	643.8	534.8	583.4	527.5	245.7

En la Tabla 7 se observan las estadísticas básicas para el área incorporada por zona. La zona 5 como era de esperarse presenta un comportamiento similar al área socavada con solamente 19 periodos de los 132 con incorporación y con una media inferior a las otras zonas.

#### 4.3.2.3 ÁREA EN QUIEBRE

Se define como el área que se encuentra entre el frente de extracción y el frente en régimen de un periodo. En la Figura 31 se esquematiza el área en Quiebre.

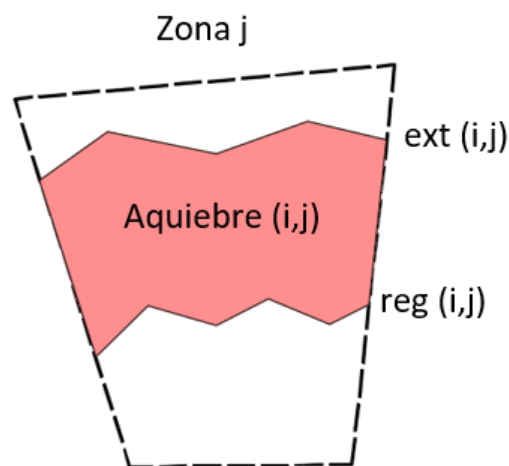
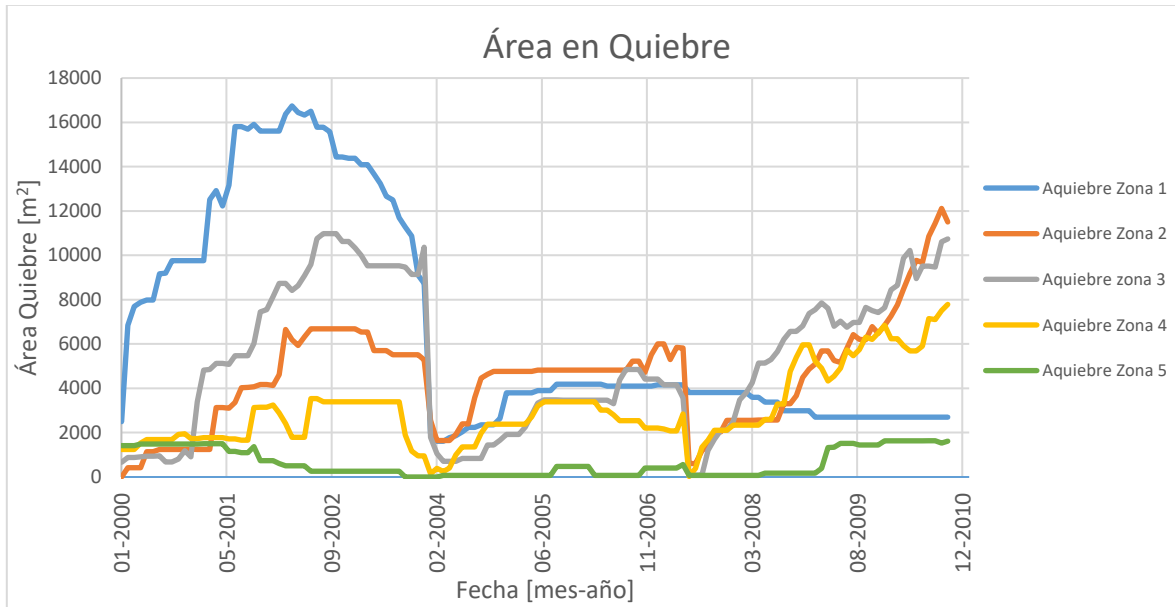


Figura 31 Área en Quiebre periodo i

Para cada zona definida en la Figura 21 se obtiene mensualmente el área en quiebre. En la Figura 32 se muestra el gráfico del área en quiebre por periodo para cada zona.



**Figura 32 Gráfico Evolución temporal Área en Quiebre por Zona**

De la Figura 32 se desprende lo siguiente:

- La caída en el área en quiebre que se observa al comienzo del 2004 se debe a que el frente de extracción se mantuvo constante durante el periodo 2002-2003 (Figura 23) por lo cual el frente en régimen alcanzó al frente de extracción en varias zonas a comienzos del 2004. Esto se observa además en la Figura 24 al notar la evolución que tiene el frente por año.
- En el periodo Junio-Julio del 2007 el frente de régimen alcanza al frente de extracción. Luego se aprecia una tendencia al alza en la área en quiebre para las distintas zonas, excluyendo la zona 1, la cual tanto su socavación como incorporación se encuentra detenida.
- En la Tabla 8 se aprecia el rango de valores en el cual fluctúa el área en quiebre para cada zona, teniendo variaciones importantes en el tiempo.

Tabla 8 Estadística Descriptiva Área en Quiebre

<i>Área en Quiebre [m<sup>2</sup>]</i>					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
<b>Media</b>	6861.4	4694.5	5496.0	3151.1	648.0
<b>D. estándar</b>	5020.5	2423.4	3392.3	1727.1	610.0
<b>Mínimo</b>	1612.2	0.0	84.9	387.5	0.0
<b>Máximo</b>	16791.7	12117.7	11228.8	8595.6	1635.3

#### 4.3.2.4 ÁREA DE LOSA

Se define como el área que se encuentra entre el frente de extracción y el frente de socavación de un periodo. En la Figura 33 se esquematiza el área de Losa.

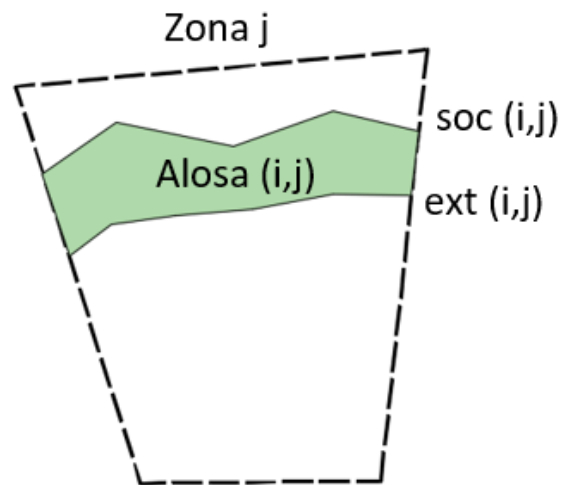
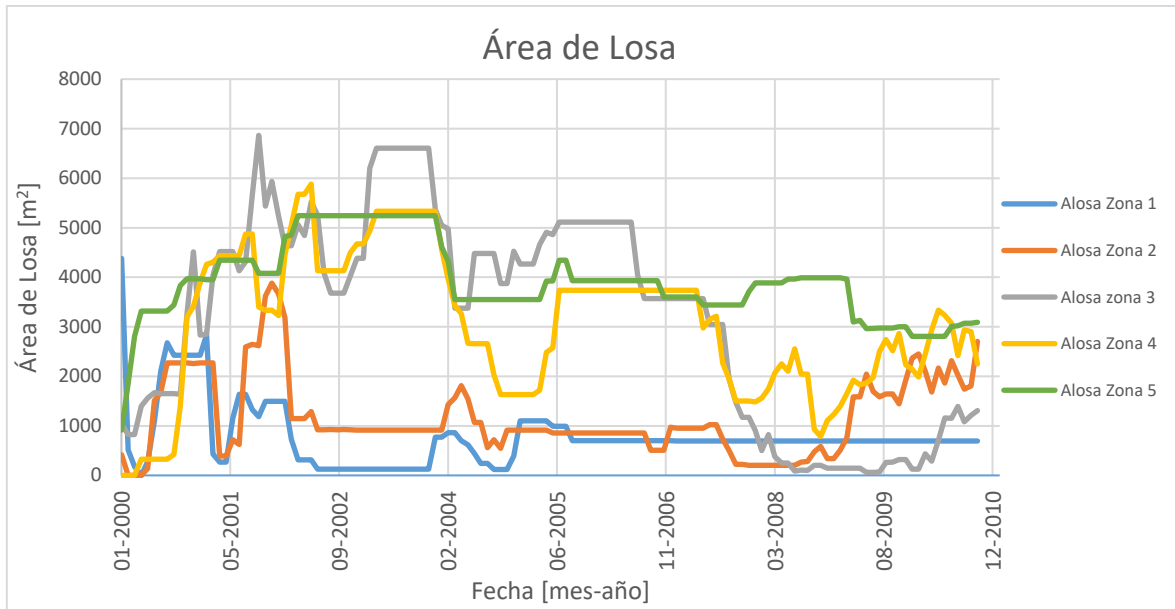


Figura 33 Área de Losa periodo i

Para cada zona definida en la Figura 21 se obtiene mensualmente el área de Losa. En la Figura 33 se muestra el gráfico del área de Losa por periodo para cada zona.



**Figura 34 Gráfico Evolución temporal Área de Losa por Zona**

De la Figura 34 se desprende lo siguiente:

- La tendencia general para todas las zonas es que la distancia entre el frente de extracción y el frente de socavación disminuye con el tiempo.
- Se observa un quiebre en la tendencia a fines del 2007, esto se debió a cambios del método de explotación para el sector de la zona 2, 3 y 4 a Panel Caving Convencional [33].
- La zona 5 presenta una mayor área de Losa debido a que los frentes de socavación y extracción para esta zona no varían considerablemente entre los periodos, por lo cual esta área no presenta tantas variaciones como para las otras zonas (Figura 22 y Figura 23).

**Tabla 9 Estadística Descriptiva Área de Losa**

<b>Área de Losa [m2]</b>					
	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	778.4	1162.3	3182.3	3051.0	3900.2
<b>D. estándar</b>	642.2	790.2	2110.5	1439.7	789.8
<b>Mínimo</b>	0.8	0.0	62.2	0.0	916.2
<b>Máximo</b>	4380.3	3881.3	6864.5	5881.5	5243.5

### 4.3.3 ANCHO DE FRENTE

Para estimar el ancho de los frentes se consideran frentes planos, esto quiere decir que se calcula como la distancia entre las intersecciones del frente con los límites de las zonas de análisis para cada periodo. A partir del valor del  $B_{soc\ i,j}$  y el área de la losa se define el tamaño de la losa  $L_2$ . La Figura 35 esquematiza el ancho de frentes y el tamaño de la losa.

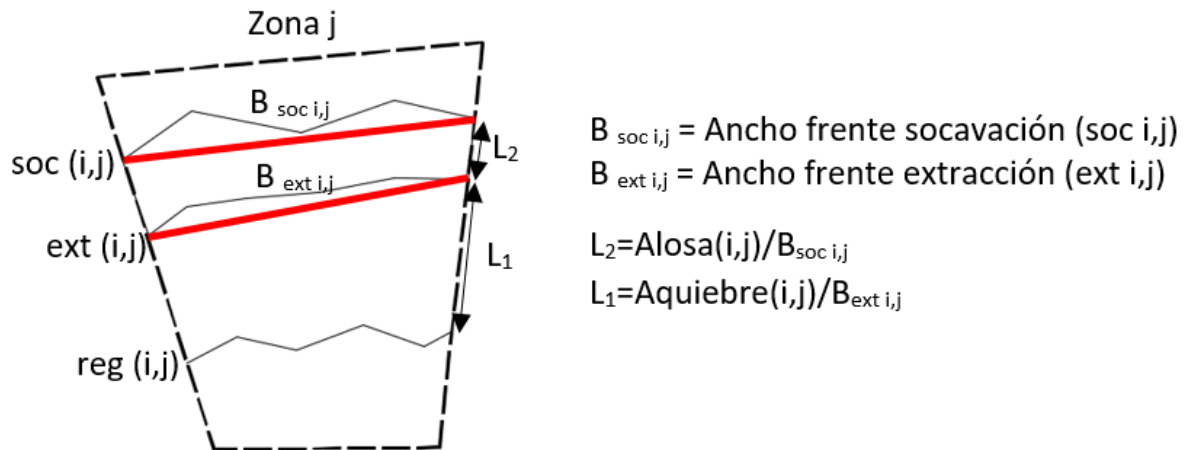
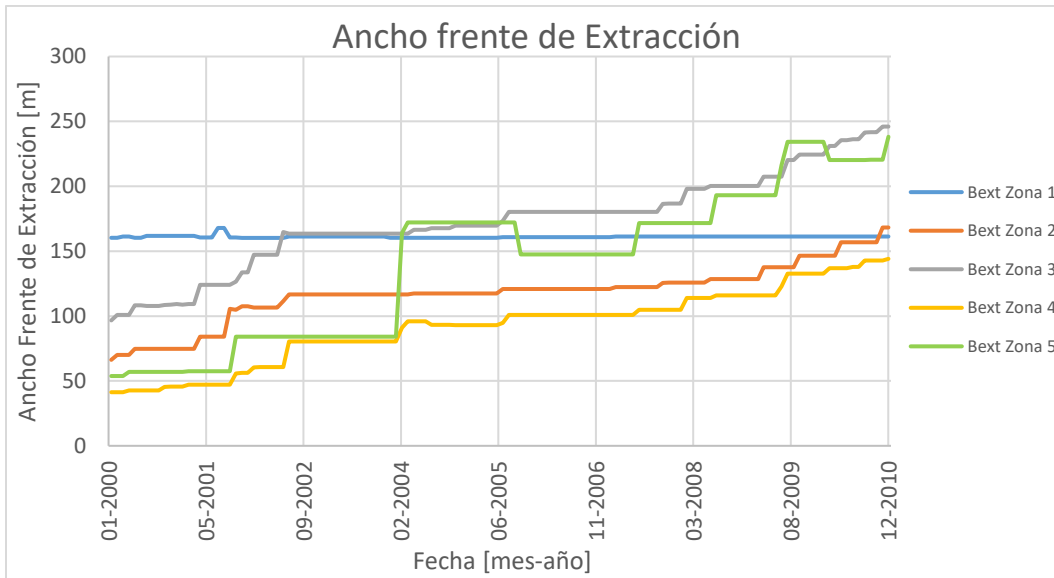
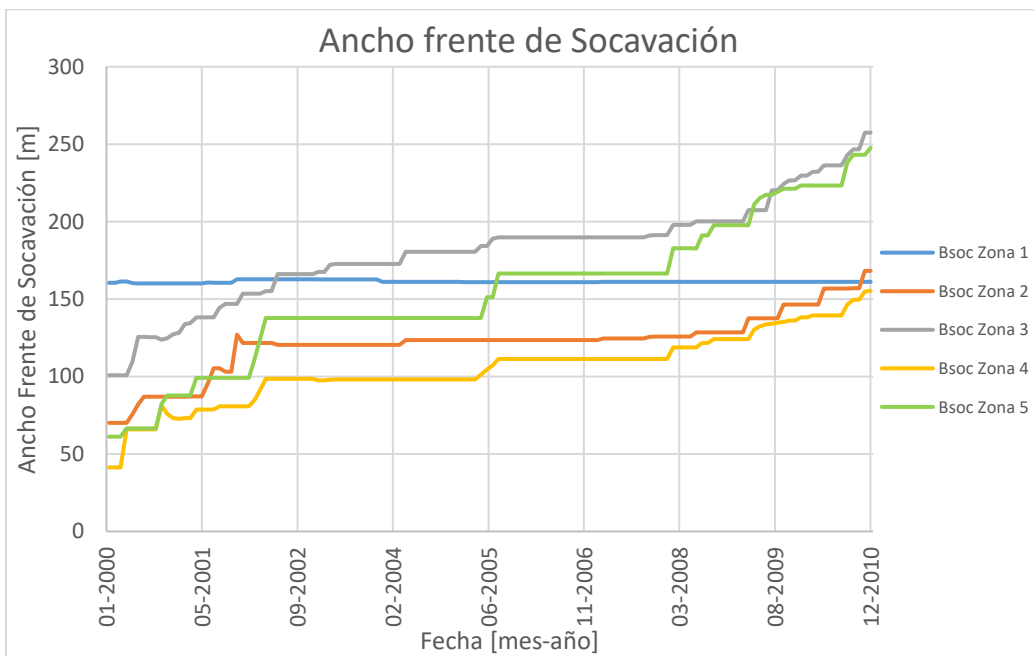


Figura 35 Ancho de Frente de extracción y socavación

Para cada zona definida en la Figura 21 se obtiene mensualmente el ancho del frente de extracción y de socavación. En la Figura 36 se muestra el gráfico del ancho del frente de extracción por periodo para cada zona. En la Figura 37 se muestra el gráfico del ancho del frente de socavación por periodo para cada zona.



**Figura 36 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Extracción por zona.**



**Figura 37 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Socavación por zona.**

Tanto en la Figura 36 como en la Figura 37 se observa la misma tendencia al alza, la cual debido a la definición de las zonas (Figura 21) es el resultado esperado.

**Tabla 10 Estadísticas Ancho Frentes de socavación y extracción**

<i>Ancho Frentes</i>										
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		Zona 5	
	$B_{ext}$	$B_{soc}$	$B_{ext}$	$B_{soc}$	$B_{ext}$	$B_{soc}$	$B_{ext}$	$B_{soc}$	$B_{ext}$	$B_{soc}$
<b>Media</b>	161.1	161.3	117.6	121.7	172.8	180.7	92.3	105.2	140.8	153.7
<b>D. estándar</b>	0.9	0.8	21.9	19.3	36.4	33.2	28.8	22.7	58.0	46.0
<b>Mínimo</b>	160.2	160.1	66.2	70.1	96.6	100.8	41.3	41.3	53.8	61.2
<b>Máximo</b>	167.9	162.7	168.2	168.2	246.0	257.5	144.1	155.2	238.2	247.6

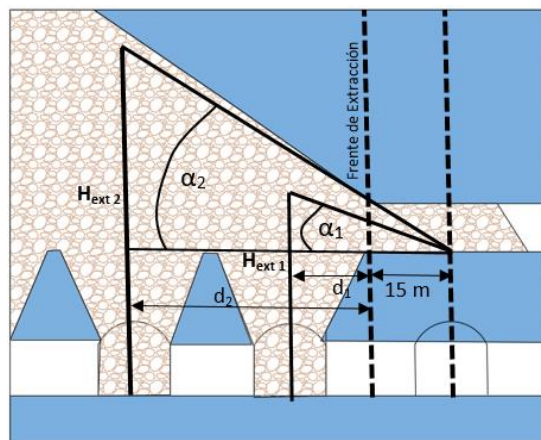
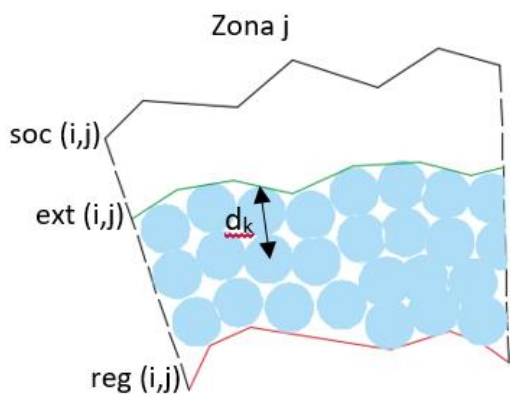
En la Tabla 10 se observa que la zona 1 es la que presenta menor varianza entre los periodos, lo cual se observa claramente en la Figura 22 y Figura 23. La zona 3 presenta la media mayor y alcanza los valores máximos para el ancho del frente de extracción y socavación.

#### **4.3.4 VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN Y ÁNGULO DE EXTRACCIÓN**

La velocidad de extracción se define como el tonelaje extraído al día por metro cuadrado [tpd/m<sup>2</sup>]. En el presente estudio se utilizará la velocidad de extracción promedio asociada al área en quiebre para cada periodo *i* y zona *j*.

Para obtener esta velocidad de extracción se construyó un algoritmo que determina todos los puntos de extracción que se encuentran activos en el periodo *i*, en el área de quiebre asociada a cada zona. De cada punto de extracción se obtiene el área de influencia, tonelaje extraído, la altura extraída a la fecha y la distancia del punto de extracción al frente de extracción y socavación.

Con esto se obtiene la velocidad de extracción para cada punto y el ángulo de extracción. La Figura 38 muestra cómo se estima el ángulo de extracción, en función de la altura extraída y la distancia. El algoritmo realizado obtiene la distancia al frente siguiendo la forma de este con respecto a la dirección de avance de la zona.



$$\alpha_k = \arctan(H_{\text{ext } k} / (d_k + 15))$$

$$\alpha_{i,j} = \text{promedio}(\alpha_k)$$

Figura 38 Estimación del ángulo de extracción para cada periodo i y zona j

Es importante notar que esta variable, al ser evaluada mensualmente genera un sesgo con respecto a los peaks de extracción diarios que se podrían haber generado en el periodo. Esto puede ocasionar que se tenga un caso con un evento sísmico asociado en la realidad a una alta velocidad de extracción por un corto periodo de tiempo, la cual al ser evaluada mensualmente no resulta ser alta, resultando que el modelo subestime la importancia de la velocidad de extracción. Con esto en mente y debido a que en este estudio no se considera el detalle de extracción diario por punto de extracción se incluirá una variable que sea la máxima velocidad de extracción para un punto de extracción contenido en el polígono de quiebre en el periodo i y zona j.

La Tabla 11 corresponde a las estadísticas de los puntos de extracción que se encuentran en el polígono en quiebre para cada periodo i y zona j.

Tabla 11 Estadísticas Velocidades de extracción y Tonelaje extraído en polígono en Quiebre.

<i>Velocidad promedio puntos de extracción Activos [tpd/m<sup>2</sup>]</i>						
	<i>Total Zonas</i>	<i>Zona 1</i>	<i>Zona 2</i>	<i>Zona 3</i>	<i>Zona 4</i>	<i>Zona 5</i>
<b>Media</b>	0.18	0.19	0.17	0.18	0.22	0.13
<b>Desviación estándar</b>	0.14	0.10	0.10	0.12	0.13	0.20
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Máximo</b>	0.89	0.59	0.41	0.73	0.62	0.89



<b>Velocidad Máxima por punto de extracción [tpd/m<sup>2</sup>]</b>						
	<b>Total Zonas</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	0.35	0.33	0.41	0.45	0.40	0.15
<b>Desviación estándar</b>	0.29	0.15	0.30	0.34	0.28	0.23
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Máximo</b>	1.84	0.73	1.49	1.84	1.53	0.91

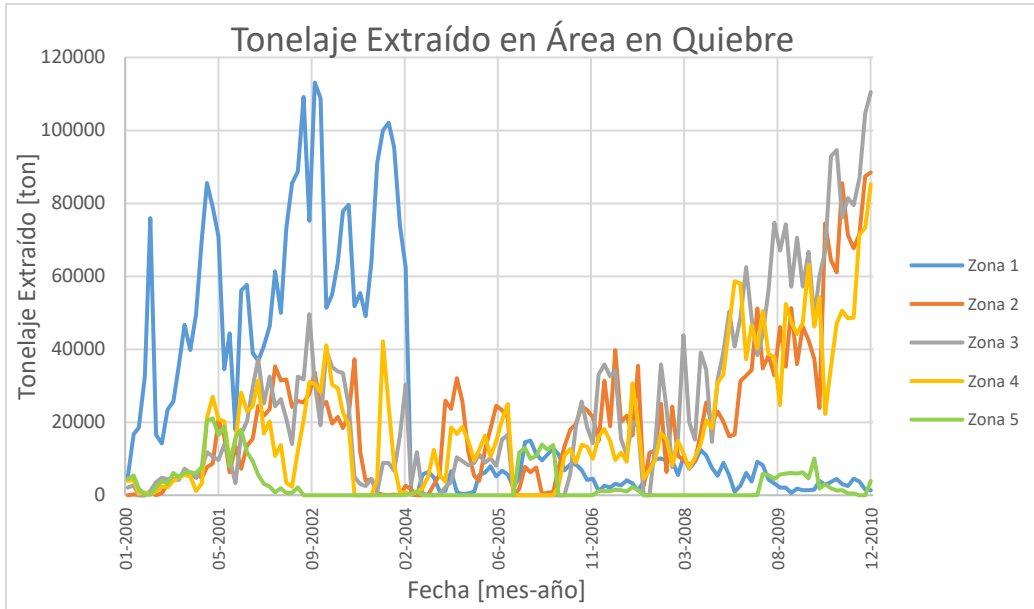
<b>Velocidad de extracción en Área en Quiebre [tpd/m<sup>2</sup>]</b>						
	<b>Total Zonas</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	0.13	0.09	0.14	0.14	0.19	0.11
<b>Desviación estándar</b>	0.13	0.07	0.09	0.11	0.12	0.21
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Máximo</b>	0.96	0.32	0.41	0.70	0.56	0.96

<b>Tonelaje Extraído zona en Quiebre [ton]</b>						
	<b>Total Zonas</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	18707	25386	20750	24885	19570	2946
<b>Desviación estándar</b>	23178	30986	19558	25672	18401	4848
<b>Mínimo</b>	0	34	0	0	0	0
<b>Máximo</b>	113,091	113,091	88,490	110,514	85,267	21,041
<b>Suma</b>	12,346,815	3,350,900	2,739,031	3,284,780	2,583,181	388,923

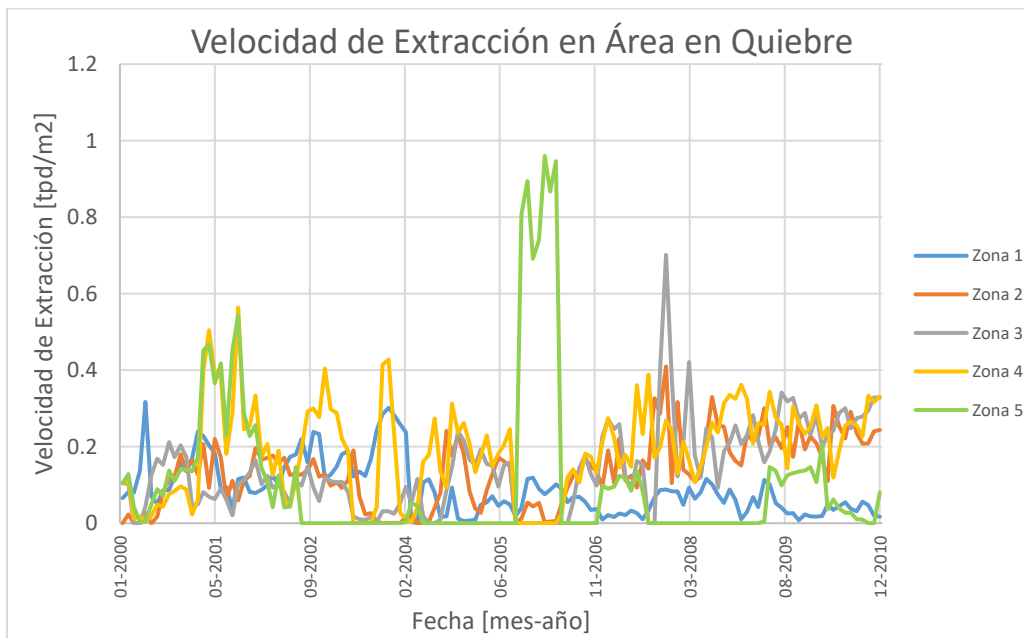
En la Tabla 11 se aprecia la diferencia significativa que se genera entre las velocidades máximas de extracción por punto de extracción con la velocidad de extracción promedio del área de interés.

La velocidad de extracción en área en quiebre se obtiene con la división del tonelaje extraído y el área en quiebre del periodo y zona.

En la Figura 39 se tiene el gráfico del tonelaje extraído por periodo y zona en el área en quiebre respectivos (solamente puntos de extracción en quiebre). A partir del 2007 se observa una tendencia al alza para la zona 2, 3 y 4. A pesar de este aumento constante en el tonelaje extraído al observar la Figura 40 no se nota una variación significativa en la velocidad de extracción, debido al aumento que se genera en el área en quiebre para el mismo periodo de tiempo (Figura 31).



**Figura 39 Gráfico Tonelaje Extraído en Área en Quiebre por periodo y zona.**



**Figura 40 Velocidad de Extracción en Área en Quiebre por zona y periodo.**

En la Figura 41 se aprecia las velocidades de extracción mensuales para cada punto de extracción en Quiebre en función de la altura extraída. Se observa que se respeta para la mayoría de los casos los lineamientos geomecánicos para puntos de extracción en Quiebre [34]. Actualmente los lineamientos geomecánicos para el sector RENO con respecto a la velocidad de extracción de puntos en quiebre es una

velocidad de extracción máxima de 0.68 tpd/m<sup>2</sup>, ésta depende de las condiciones particulares de cada punto de extracción.

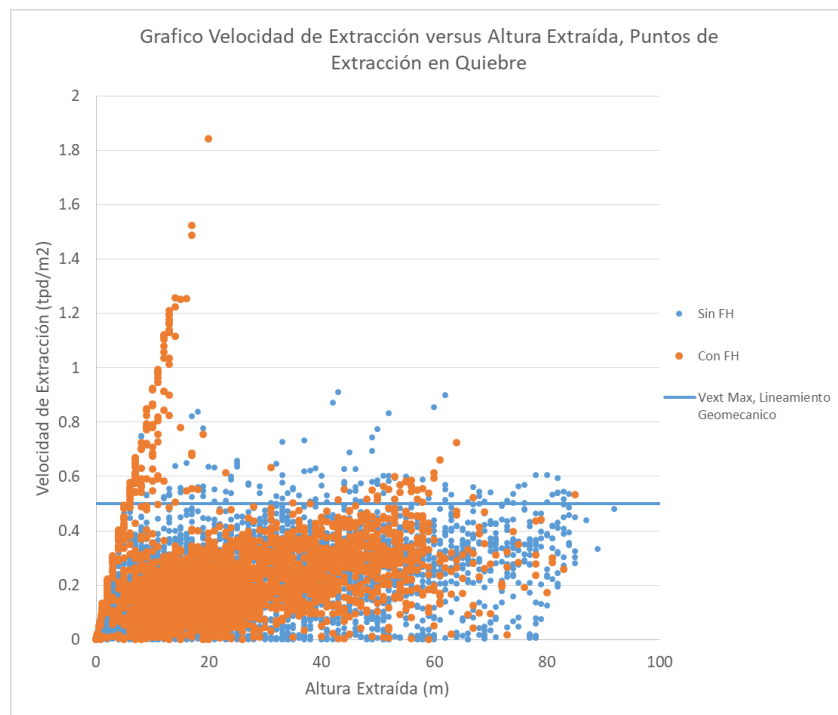


Figura 41 Gráfico velocidad de extracción versus altura extraída, Puntos de extracción en Quiebre.

Para el ángulo de extracción se utilizará el ángulo de extracción promedio y el ángulo de extracción máximo de los puntos de extracción contenidos en el polígono en quiebre.

Tabla 12 Estadísticas Ángulo de Extracción por zona

<b>Ángulo de extracción promedio</b>						
	<b>Total Zonas</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	20.89	20.32	23.95	22.13	25.28	12.76
<b>Desviación estándar</b>	12.46	6.20	7.71	9.98	12.82	17.93
<b>Mínimo</b>	0.00	6.32	0.00	0.00	0.04	0.00
<b>Máximo</b>	64.16	38.98	39.88	46.04	64.16	62.69

<b>Ángulo de Extracción máximo por punto de extracción</b>						
	<b>Total Zonas</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 5</b>
<b>Media</b>	39.67	52.31	43.92	44.19	38.67	19.27
<b>Desviación estándar</b>	19.62	16.30	9.71	15.54	13.79	22.91
<b>Mínimo</b>	0.00	17.71	0.00	0.00	0.13	0.00
<b>Máximo</b>	73.64	73.64	62.56	67.66	68.96	67.51

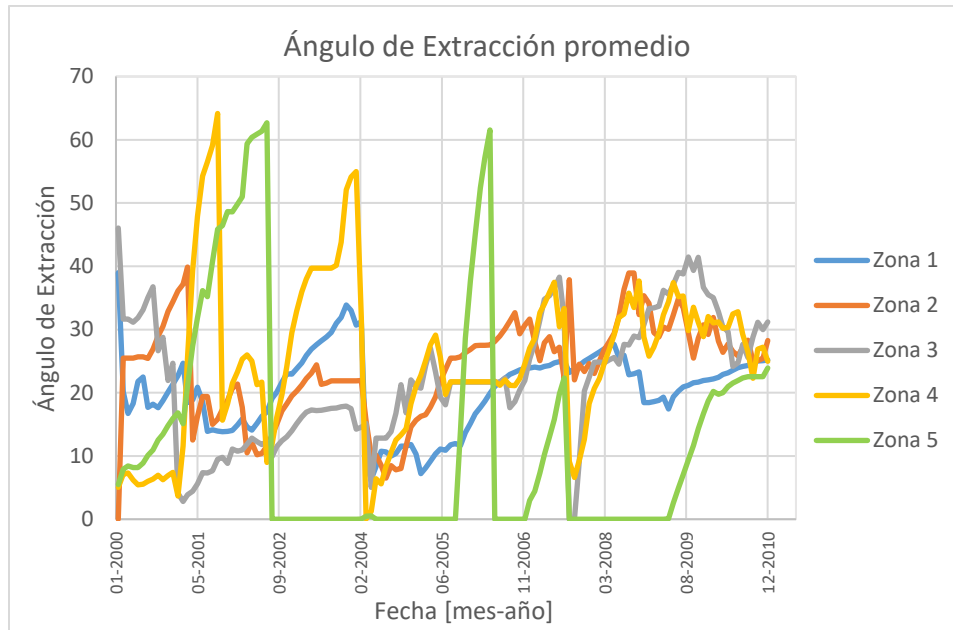


Figura 42 Gráfico Ángulo de Extracción promedio

#### 4.3.5 ESFUERZO VERTICAL EN LA ZONA DE ABUTMENT

Para evaluar el efecto de la extensión del frente de socavación por delante del frente de extracción se emplearán los resultados de modelos bidimensionales de elementos finitos en Phase2 desarrollados por Karzulovic [14] para el sector Esmeralda. Las características de estos modelos son los siguientes:

- Considera un estado de deformaciones planas.
- Supone un campo de esfuerzos definido por un esfuerzo vertical de 27 MPa, y por una razón de esfuerzos,  $K$ , igual a 1.3 en el plano de la sección analizada e igual a 1.5 en la dirección normal a ésta.
- Supone que el macizo rocoso es homogéneo e isótropo y tiene comportamiento elasto-plástico, con su resistencia definida de acuerdo al criterio de Hoek-Brown y los siguientes parámetros:
  - Módulo de deformación,  $E=36$  GPa
  - Razón de Poisson,  $\nu=0.20$
  - Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta,  $\sigma_c=120$  MPa
  - Parámetros de Hoek-Brown:  $m_b \text{ peak}=8.8$ ,  $m_b \text{ residual}=1.0$ ,  $S_{\text{peak}}=0.4$ ,  $S_{\text{residual}}=0.0$

Los resultados de estos modelos fueron utilizados para evaluar el valor medio del esfuerzo vertical resultante sobre los primeros 20 metros por delante del frente de socavación,  $S_{va}$ , resultando en la Ecuación 6:

**Ecuación 6 Esfuerzo vertical en la zona de Abutment, Karzulovic [14]**

$$S_{va} = C_{sv}S_{vo} = \sqrt{a + bL_2}S_{vo}$$

$$a = \sqrt{105.36 - 3.915h_s}; b = \sqrt{316 \times 10^{-4} - 536 \times 10^{-9}h_s^3}$$

Donde:

- $C_{sv}$ , es un factor de amplificación en la zona de abutment stress
- $S_{vo}$ , es el esfuerzo vertical in-situ
- $L_2$ , corresponde a la distancia entre frente de extracción y socavación en metros.(Figura 35)
- $h_s$ , la altura de socavación en metros. En el caso de RENO se considera igual a 3.6m (variante minera de hundimiento avanzado y bateas altas).

Para estimar el esfuerzo vertical in-situ,  $S_{vo}$ , se utilizará los resultados obtenidos en la sección 4.2. El esfuerzo vertical in-situ quedará expresado por la siguiente ecuación [32].

$$S_{vo} = 0.027 * z + 2.14$$

Se debe notar que en la Figura 20 el esfuerzo principal menor corresponde al esfuerzo vertical, dadas las razones de esfuerzos  $K_{1,2} > 1$ .

**Tabla 13 Estadísticas condición de esfuerzos por Zona**

<b>Zona 1</b>					
	<b>Profundidad</b>	<b>Svo</b>	<b>L2</b>	<b>Csv</b>	<b>Sva</b>
<b>Media</b>	714.4	21.4	4.8	3.2	69.1
<b>Desviación estándar</b>	4.2	0.1	4.0	0.1	2.4
<b>Min</b>	706.1	21.2	0.0	3.1	66.1
<b>Max</b>	717.7	21.5	27.3	3.8	81.6

<b>Zona 2</b>					
	<b>Profundidad</b>	<b>Svo</b>	<b>L2</b>	<b>Csv</b>	<b>Sva</b>
<b>Media</b>	628.1	19.1	9.7	3.4	64.1
<b>Desviación estándar</b>	5.5	0.1	7.2	0.2	3.7
<b>Min</b>	612.9	18.7	0.0	3.1	59.3
<b>Max</b>	641.5	19.5	31.9	3.9	75.2

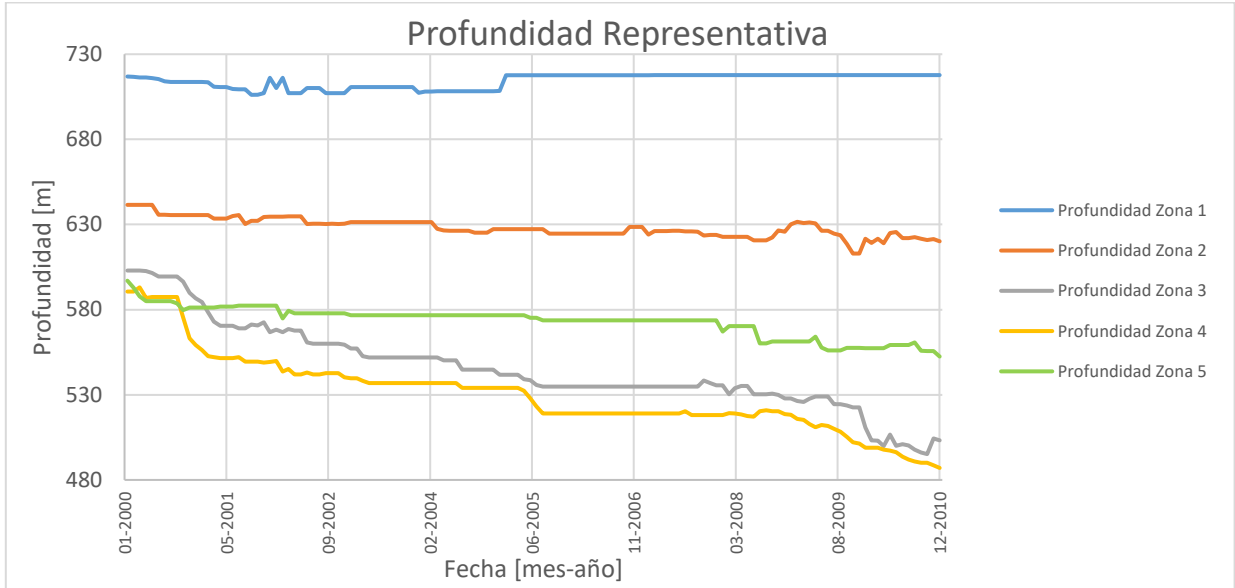
<b>Zona 3</b>					
	<b>Profundidad</b>	<b>Svo</b>	<b>L2</b>	<b>Csv</b>	<b>Sva</b>
<b>Media</b>	545.5	16.9	18.8	3.6	60.4
<b>Desviación estándar</b>	25.2	0.7	12.7	0.3	6.8
<b>Min</b>	495.2	15.5	0.3	3.1	48.6
<b>Max</b>	603.0	18.4	46.7	4.2	74.2

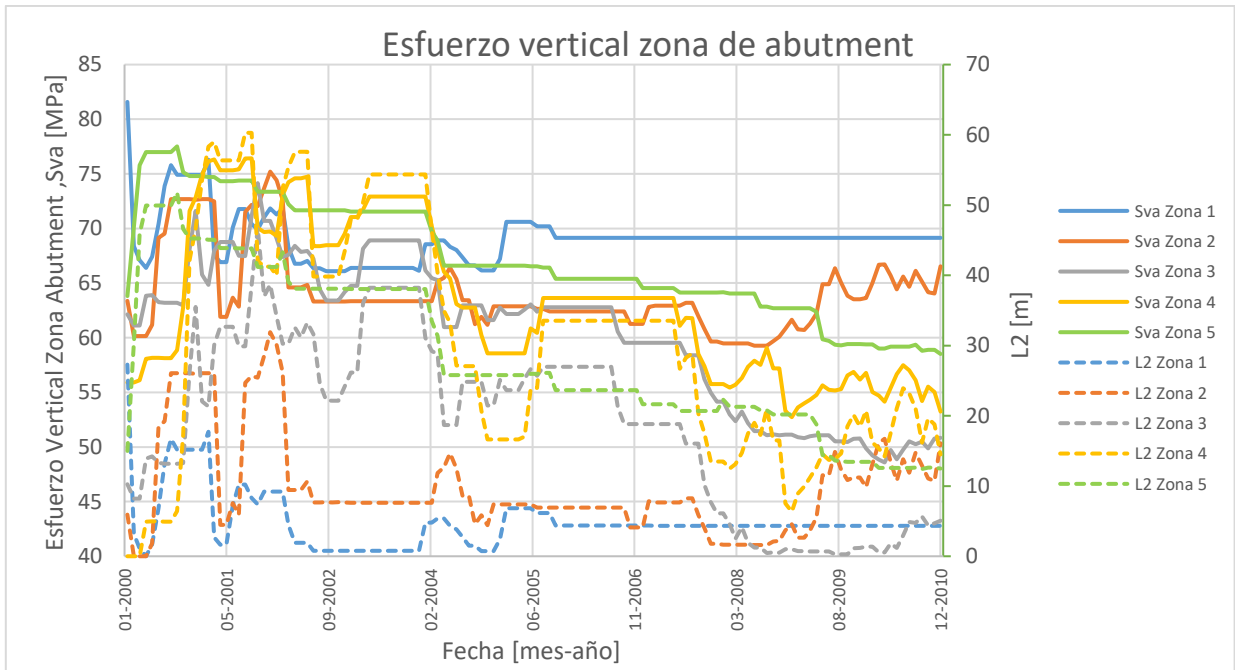
<b>Zona 4</b>					
	<b>Profundidad</b>	<b>Svo</b>	<b>L2</b>	<b>Csv</b>	<b>Sva</b>
<b>Media</b>	530.5	16.5	30.0	3.8	63.2
<b>Desviación estándar</b>	23.2	0.6	16.7	0.4	7.1
<b>Min</b>	487.0	15.3	0.0	3.1	52.7
<b>Max</b>	593.1	18.2	60.3	4.5	76.4

<b>Zona 5</b>					
	<b>Profundidad</b>	<b>Svo</b>	<b>L2</b>	<b>Csv</b>	<b>Sva</b>
<b>Media</b>	573.0	17.6	28.3	3.8	67.2
<b>Desviación estándar</b>	8.9	0.2	11.2	0.3	5.3
<b>Min</b>	552.5	17.1	12.4	3.4	58.5
<b>Max</b>	597.0	18.3	51.8	4.3	77.5



**Figura 43 Profundidad Representativa para cada zona y periodo**



**Figura 44 Esfuerzo Vertical Zona de Abutment stress**

Se debe notar que para determinar la profundidad (Figura 43) se empleó la metodología explicada en sección 4.2. El punto representativo empleado se obtiene en función del polígono sísmico, este se define desde el frente de régimen hasta 80

metros por delante del frente de socavación siguiendo la dirección de avance para cada zona (Figura 45).

En la Tabla 13 y Figura 43 se puede observar que para la zona 1 y 2 la profundidad no varía considerablemente, por lo cual la variación que se observa en el Sva corresponde principalmente a la variación que sufre el L2 (Figura 35) producto de la evolución de los frentes mineros. Para las zonas 3,4 y 5 la minería progresa a zonas de menor profundidad, por lo cual la variabilidad que se tiene en el esfuerzo vertical en la zona de abutment se debe al cambio en el factor  $C_{sv}$  debido a la variación de la distancia entre los frentes de extracción y socavación, L2. (Ver Figura 44).

#### **4.3.6 FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (FH)**

Se idealiza el FH como una variable binaria (1/0). A partir del año 2007 en adelante se considera que RENO posee fracturamiento hidráulico (valor 1 en variable binaria).

#### **4.4 ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD INDUCIDA**

A continuación, se detalla el análisis realizado al catálogo sísmico de eventos para el periodo 2000-2013. Se posee la siguiente información para cada evento sísmico (Tabla 14).



**Tabla 14 Formato EVP, Eventos Sísmicos**

Variables	Unidades o formato
Date	yyyymmdd
Time	hhmmss
Location error	m
Location (X)	m
Location (Y)	m
Location (Z)	m
Moment	Nm
Energy	J
Moment P	Nm
Energy P	J
Moment S	Nm
Energy S	J
Number of Triggers	-
Corner frequency	Hz
Static Stress Drop	Pa
Dynamic Stress Drop	Pa
Moment deviation	Nm
Energy Deviation	J
Corner frequency S	Hz

En el presente trabajo se utilizará la ubicación (X,Y,Z), fecha, momento y energía. Con estos datos y la ecuación de momento magnitud [22] (Ecuación 4) se tiene la información requerida para cada evento que se encuentre en el volumen de interés.

Se definen dos polígonos de búsqueda para las cuales se extrae la información sísmica correspondiente para cada periodo y zona.

- Zona Sísmica.
- Zona de Abutment.

#### **4.4.1 ZONA SÍSMICA**

La zona sísmica se define entre el frente en régimen y una distancia  $L_3$  (80 metros) por delante del frente de socavación (Figura 45). Para el análisis se considera una altura de 100 m sobre el nivel de hundimiento (2120 msnm) y de 100 m bajo el nivel

de producción (2100 msnm). La Figura 45 esquematiza el polígono de búsqueda a utilizar.

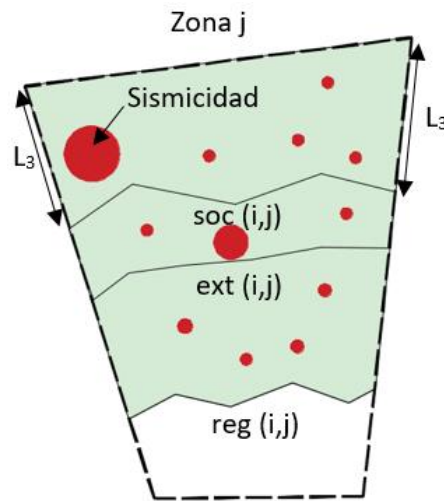


Figura 45 Polígono de búsqueda, Zona Sísmica

A continuación, se presenta el análisis de los eventos sísmicos para cada zona. Se separan los eventos con Momento de magnitud mayor a 1 ya que estos serán utilizados para el posterior ajuste del modelo.

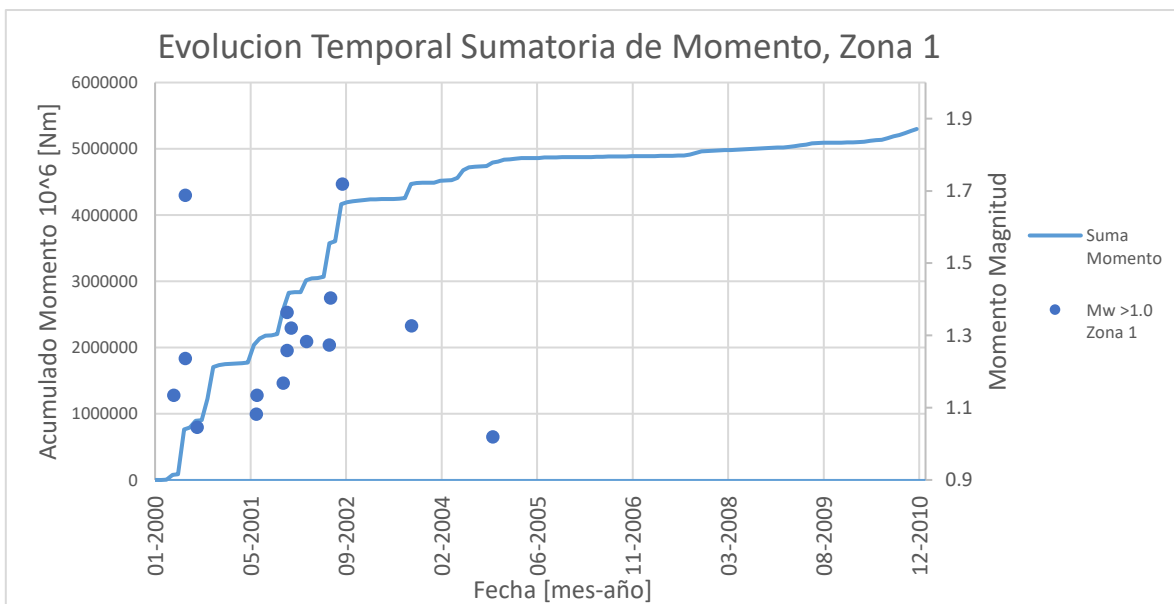
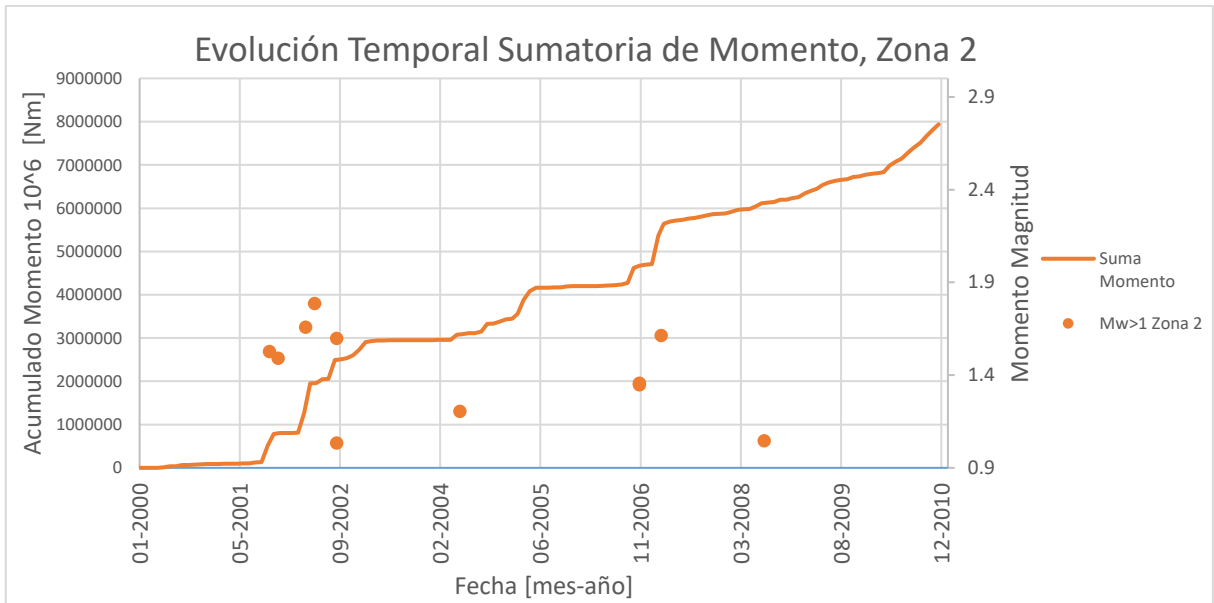
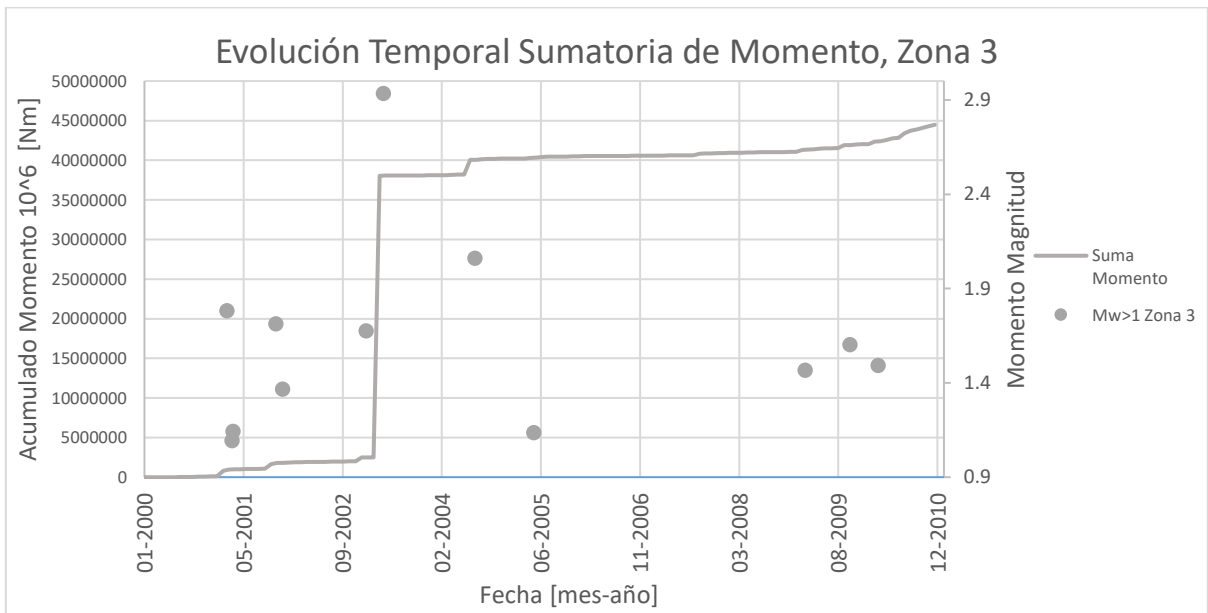


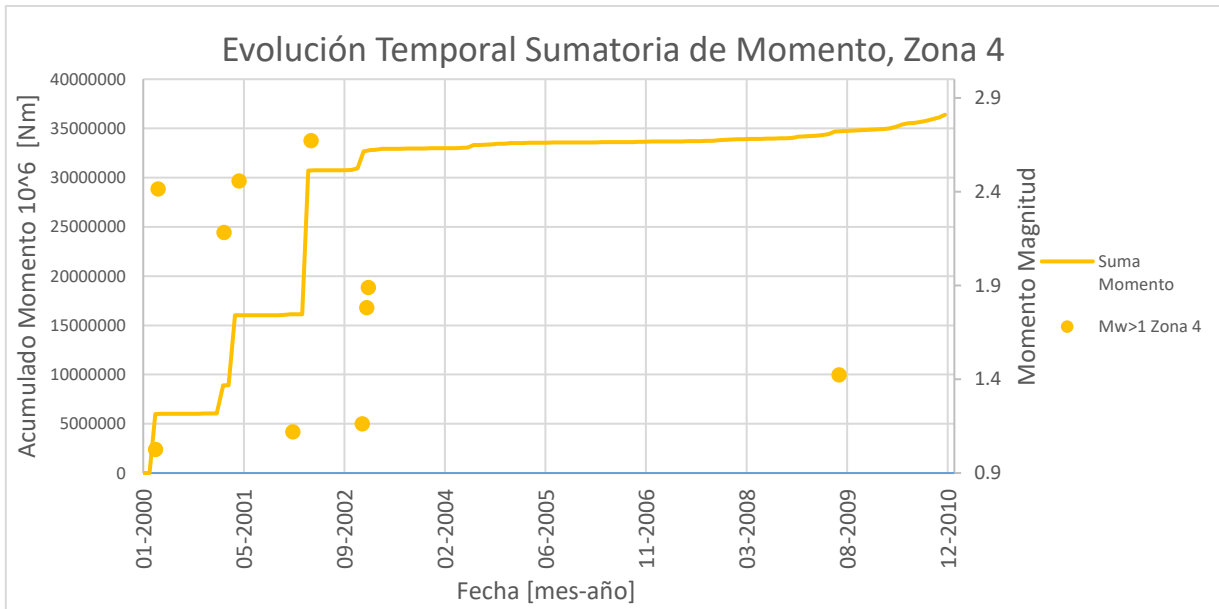
Figura 46 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 1



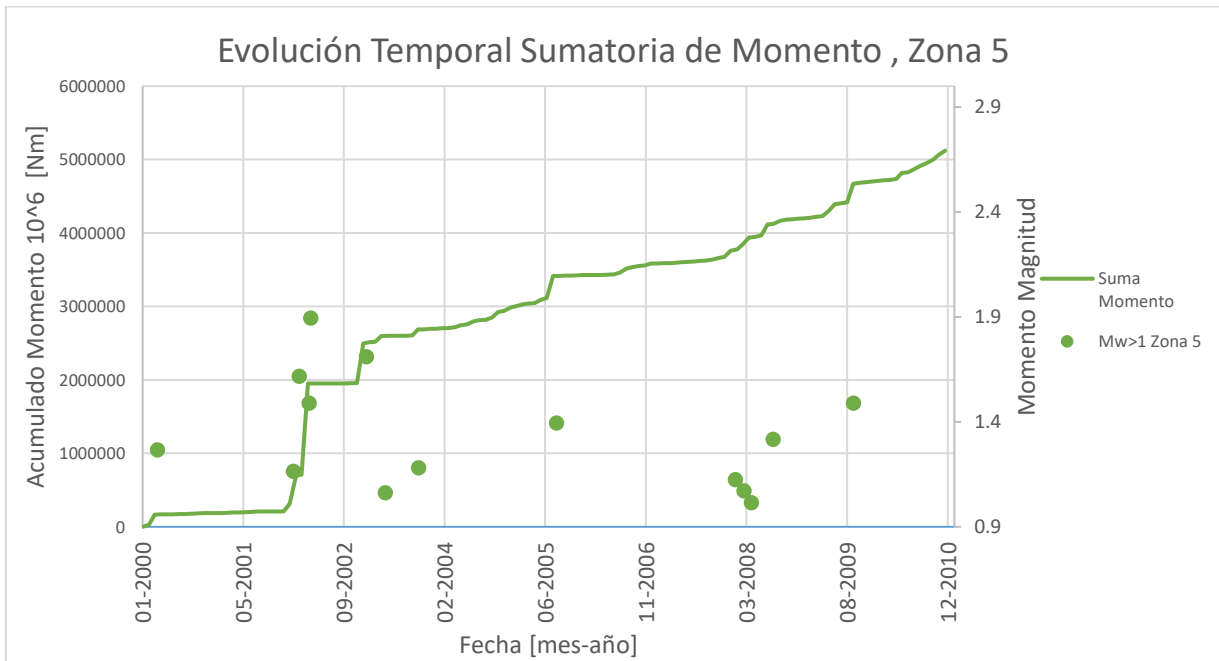
**Figura 47 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 2**



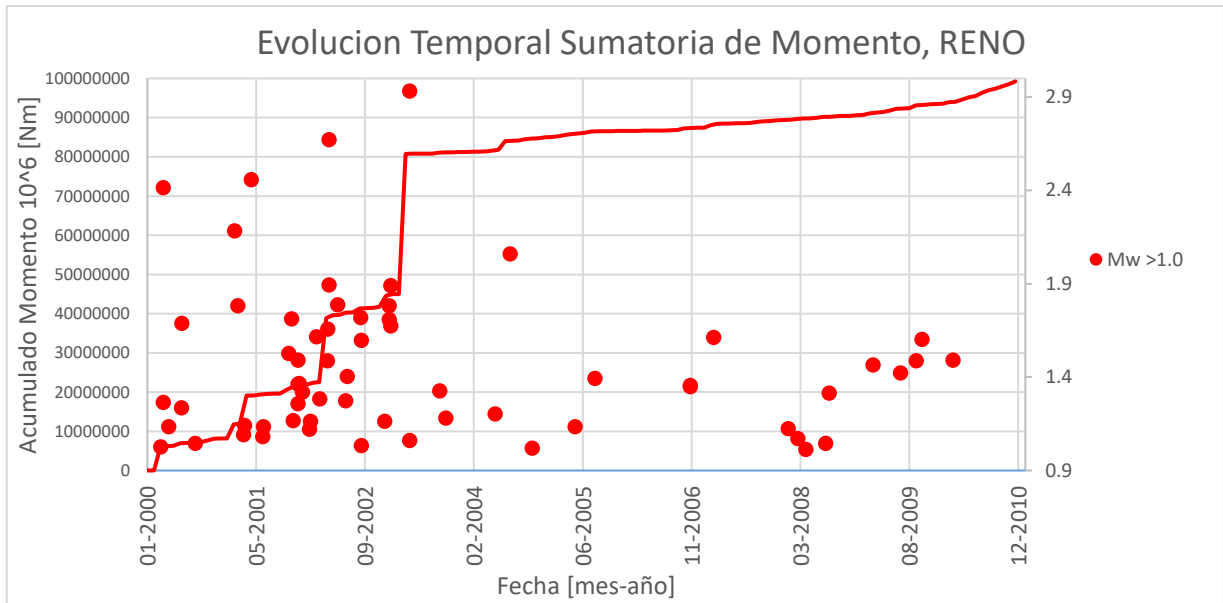
**Figura 48 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 3**



**Figura 49 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 4**



**Figura 50 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 5**



**Figura 51 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Sector RENO**

De la Figura 46 a la Figura 50 se tiene el detalle de la evolución temporal de la sumatoria de momento por zona y los eventos sísmicos relevantes. En la Figura 51 se agrupan las zonas y se visualizan todos los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15.

El evento sísmico de mayor momento magnitud fue de 2.93 el 22-04-2003 en la zona 3, este sucedió en la cota 2085 (Nivel de producción se encuentra en la cota 2100).

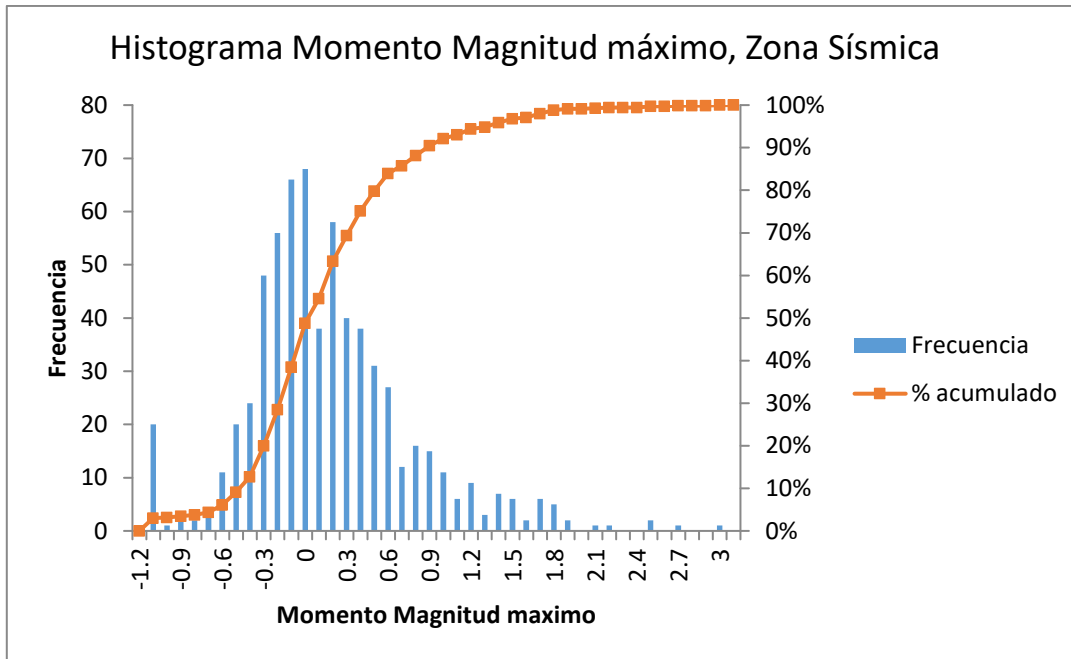
**Tabla 15 Eventos Sísmicos con Momento Magnitud > 1.0 para cada Zona Sísmica**

Año	Mes	Zona	Momento magnitud	X	Y	Z	Fecha
2000	ABR	1	1.13	1142.8	988.3	2063.2	10-04-2000
2000	JUN	1	1.24	1089.5	1007.0	2169.2	08-06-2000
2000	JUN	1	1.69	1051.0	954.1	2111.3	09-06-2000
2000	AGO	1	1.05	1033.2	955.8	2105.7	09-08-2000
2001	JUN	1	1.08	1007.1	988.1	2127.3	16-06-2001
2001	JUN	1	1.13	1156.3	996.1	2207.7	19-06-2001
2001	NOV	1	1.17	1108.7	1060.8	2146.8	03-11-2001
2001	NOV	1	1.26	1001.3	1043.6	2128.5	24-11-2001
2001	NOV	1	1.36	998.9	1009.6	2167.6	24-11-2001
2001	DIC	1	1.32	1027.6	1018.1	2156.7	15-12-2001
2002	MAR	1	1.28	1006.2	1022.5	2159.0	05-03-2002
2002	JUL	1	1.27	1089.6	1009.2	2176.6	02-07-2002
2002	JUL	1	1.40	1021.6	1040.4	2129.0	09-07-2002
2002	SEP	1	1.72	1123.0	1069.3	2170.5	09-09-2002
2003	SEP	1	1.33	1035.3	1043.4	2146.1	06-09-2003
2004	NOV	1	1.02	999.7	1048.1	2138.4	05-11-2004
2001	OCT	2	1.53	947.0	887.7	2175.3	12-10-2001

2001	NOV	2	1.49	966.2	987.6	2150.3	24-11-2001
2002	ABR	2	1.66	985.1	991.4	2156.5	10-04-2002
2002	MAY	2	1.79	993.0	997.9	2202.0	25-05-2002
2002	SEP	2	1.03	995.8	981.7	2162.6	12-09-2002
2002	SEP	2	1.60	984.2	997.6	2202.9	12-09-2002
2004	MAY	2	1.20	922.2	976.8	2171.7	18-05-2004
2006	OCT	2	1.35	939.1	998.6	2131.9	31-10-2006
2006	OCT	2	1.36	944.6	1035.5	2156.2	31-10-2006
2007	FEB	2	1.61	968.7	1074.3	2126.6	16-02-2007
2008	JUL	2	1.05	925.4	1043.4	2139.5	15-07-2008
2001	FEB	3	1.78	903.5	794.1	2096.2	21-02-2001
2001	MAR	3	1.09	939.1	747.6	2178.2	19-03-2001
2001	MAR	3	1.14	918.7	753.3	2129.6	24-03-2001
2001	OCT	3	1.71	940.7	821.4	2219.3	26-10-2001
2001	NOV	3	1.37	848.1	781.4	2133.4	30-11-2001
2003	ENE	3	1.68	924.7	824.9	2119.6	25-01-2003
2003	ABR	3	2.93	841.0	771.3	2085.2	22-04-2003
2004	JUL	3	2.06	785.3	854.2	2149.3	26-07-2004
2005	MAY	3	1.14	842.3	797.8	2117.5	20-05-2005
2009	FEB	3	1.47	809.8	871.1	2110.2	17-02-2009
2009	SEP	3	1.60	768.7	870.8	2101.7	30-09-2009
2010	FEB	3	1.49	805.2	848.5	2069.0	20-02-2010
2000	MAR	4	1.03	937.5	720.9	2081.7	03-03-2000
2000	MAR	4	2.42	948.4	718.5	2090.8	16-03-2000
2001	FEB	4	2.18	932.3	742.8	2059.4	07-02-2001
2001	ABR	4	2.46	920.0	726.1	2206.8	23-04-2001
2002	ENE	4	1.12	847.9	761.6	2141.0	16-01-2002
2002	ABR	4	2.67	862.7	726.2	2136.4	16-04-2002
2002	DIC	4	1.16	810.2	696.2	2048.2	27-12-2002
2003	ENE	4	1.78	821.6	744.4	2120.0	18-01-2003
2003	ENE	4	1.89	828.6	702.0	2110.2	25-01-2003
2009	JUN	4	1.42	743.3	685.2	2033.7	23-06-2009
2000	MAR	5	1.27	925.6	639.8	2023.2	16-03-2000
2002	ENE	5	1.16	820.4	647.3	2160.7	20-01-2002
2002	FEB	5	1.62	938.4	692.6	2214.8	18-02-2002
2002	ABR	5	1.49	878.9	675.6	2140.6	08-04-2002
2002	ABR	5	1.89	955.3	671.0	2028.8	16-04-2002
2003	ENE	5	1.71	862.1	628.3	2154.3	18-01-2003
2003	ABR	5	1.06	790.8	655.2	2099.9	22-04-2003
2003	OCT	5	1.18	791.3	631.8	2129.5	04-10-2003
2005	AGO	5	1.39	820.0	642.8	2121.1	19-08-2005
2008	ENE	5	1.12	810.4	648.1	2130.5	25-01-2008
2008	MAR	5	1.07	784.8	632.1	2129.9	08-03-2008
2008	ABR	5	1.01	807.2	649.1	2095.9	14-04-2008
2008	JUL	5	1.32	818.5	605.3	2183.3	31-07-2008
2009	SEP	5	1.49	768.3	635.0	2101.8	03-09-2009

De la Tabla 15 se obtiene que 53 eventos de los 63 con Momento magnitud mayor a 1.0 ocurren en el periodo 2000-2007 (Periodo sin FH).

A cada periodo  $i$  y zona  $j$  se le asocia el evento con momento magnitud mayor que se encuentre en el respectivo polígono. Con esto se obtienen los siguientes resultados (Figura 52).



**Figura 52 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Sísmica.**

De la Figura 52 se desprende que de los 660 casos solamente 52 casos presentan al menos un evento sísmico con Momento magnitud mayor a 1.0 y solamente 21 con Momento magnitud mayor a 1.5 (valor normalmente utilizado en El Teniente). En el Capítulo 6 se entrará en más detalle en la importancia que tendrá esto en el modelo de regresión Logística.

#### **4.4.2 ZONA DE ABUTMENT**

La zona de abutment corresponde a un subconjunto de la zona sísmica, se define entre el frente de socavación y una distancia L3 (80 metros) en frente de este. (Polígono a\*-b\*-c'-d', Figura 45)

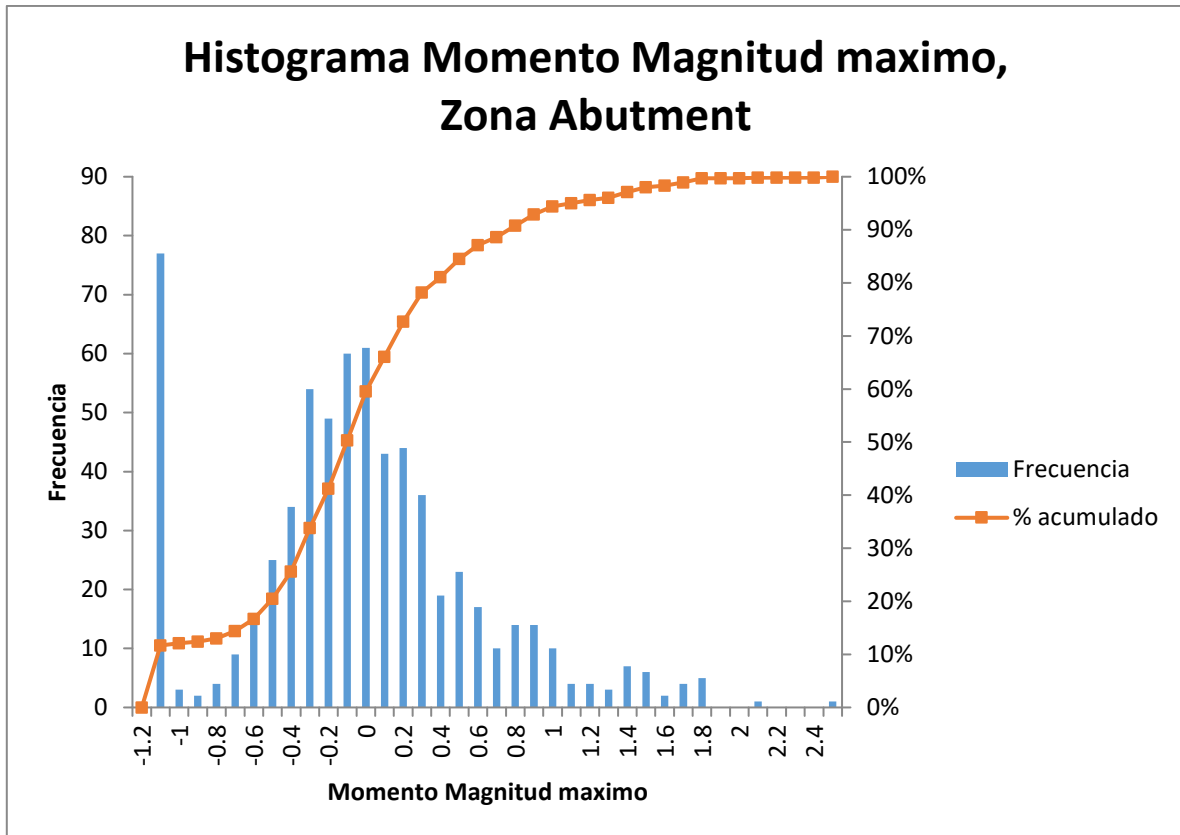


Figura 53 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Abutment.

En la Figura 53 se tienen solo 37 casos de los 660 tienen eventos de momento magnitud mayor a 1.0 y 13 casos con eventos de momento magnitud mayor a 1.5.

#### 4.5 RESUMEN BASE DE DATOS GENERADA PARA MODELO DE REGRESIÓN

En función de los resultados obtenidos en las secciones 4.1 a 4.4, se obtiene para cada uno de los 660 casos, las variables geo-mineras presentadas en la Tabla 16



**Tabla 16 Variables Geo-Mineras Obtenidas**

<b>Variables obtenidas</b>	<b>Unidades</b>
Área socavada, Asoc	m <sup>2</sup>
Área incorporada, Ainc	m <sup>2</sup>
Ancho Frente de Extracción ,Bext	m
Ancho Frente de Socavación, Bsoc	m
Velocidad avance frente Extracción, Ainc/Bext	m/mes
At=Ainc+Asoc	m <sup>2</sup>
Área en Quiebre, Aquiebre	m <sup>2</sup>
Área de Losa, Alosa	m <sup>2</sup>
L2	m
Tonelaje Total	ton
N_puntosActivos	
Area_ptos_activos	m <sup>2</sup>
Area total	m <sup>2</sup>
Velocidad promedio pts activos	tpd/m <sup>2</sup>
Vext en Area en Quiebre	tpd/m <sup>2</sup>
Velocidad Maxima	tpd/m <sup>2</sup>
Diferencia Vel max-prom	tpd/m <sup>2</sup>
Altura_Maxima	m
Angulo Maximo	°
Angulo Promedio	°
Profundidad representativa	m
S1	Mpa
S2	Mpa
S3_Svo	Mpa
Csv	
Sva	Mpa
UCS	Mpa
P10	m <sup>-1</sup>
P32	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
FH	1/0
N_Fallas	
N_Fallas_Principales	
Fallas_P (1/0)	1/0
Sumatoria de Momento sísmico	Nm
Sumatoria de Energía sísmica	J
N_eventos zona sísmica	
Mw max	
N_eventos zona abutment	
Mw max Abut	

Con esta base de datos en la sección 6.2 se buscará construir y calibrar un modelo a modo de estimar la ocurrencia de eventos sísmicos relevantes.

#### **4.6 PARÁMETROS ÍNDICE AMBIENTAL**

El Índice ambiental corresponde a una sumatoria de parámetros como fue explicado en la sección 3.1. El primer paso es definir la zona de estudio y el tamaño de las

celdas a emplear. Se decide utilizar celdas de 10x10 metros en la siguiente zona (X,Y<sub>1</sub>: 500,500 a X,Y<sub>4</sub>:1300,1300) (Figura 54).

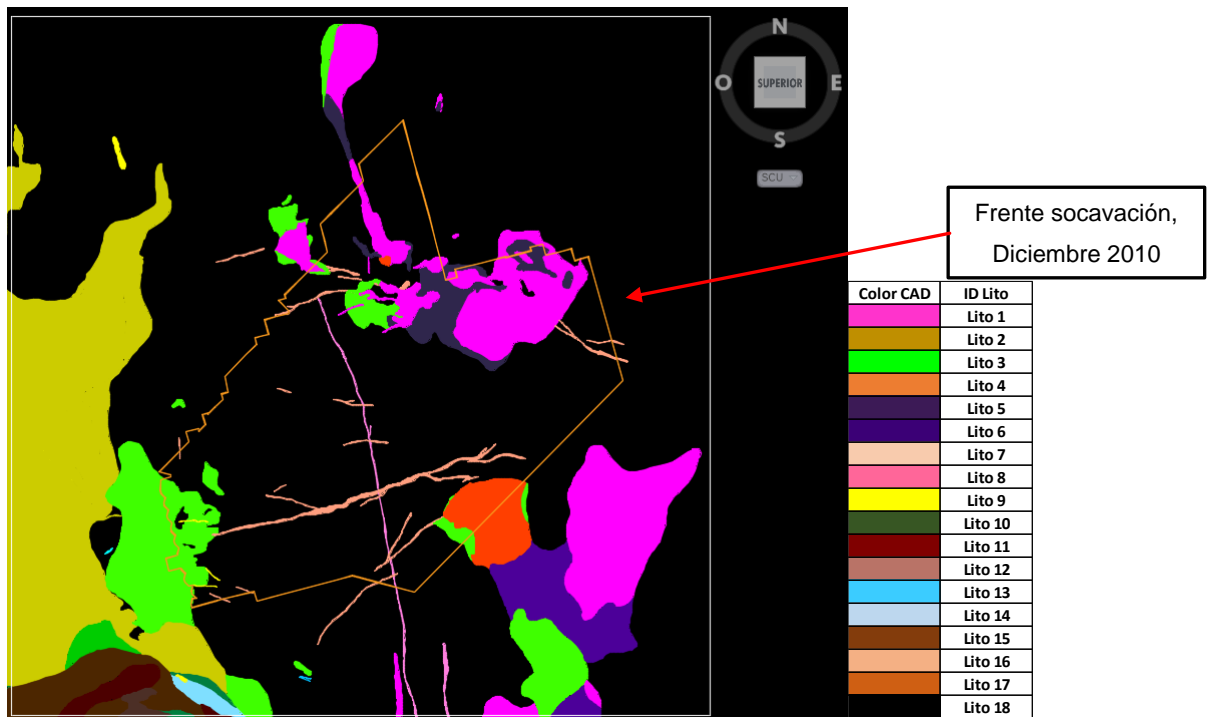


Figura 54 Zona de estudio Índice Ambiental. 800x800 metros.

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros.

#### 4.6.1 GEOLOGÍA

##### 4.6.1.1 CONTACTOS LITOLÓGICOS

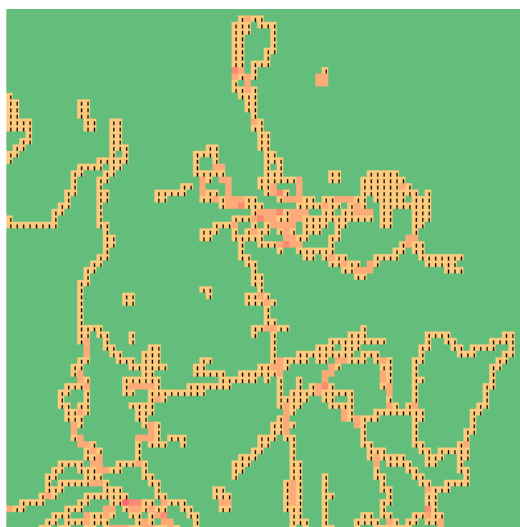
Se obtiene para cada celda la proporción presente de cada litología en ésta y el número de contactos litológicos. En la Tabla 17 se presenta la distribución litológica de las celdas.

**Tabla 17 Distribución Litológica, Celdas Índice Ambiental**

Distribución por litología	N° celdas	%	Distribución por litología	N° celdas	%
Lito 1	609	9.3%	Lito 10	22	0.3%
Lito 2	716	10.9%	Lito 11	47	0.7%
Lito 3	477	7.3%	Lito 12	18	0.3%
Lito 4	94	1.4%	Lito 13	4	0.1%
Lito 5	161	2.5%	Lito 14	28	0.4%
Lito 6	155	2.4%	Lito 15	123	1.9%
Lito 7	212	3.2%	Lito 16	0	0.0%
Lito 8	80	1.2%	Lito 17	0	0.0%
Lito 9	27	0.4%	Lito 18	5189	79.1%

**Tabla 18 Detalle contactos litológicos.**

	Numero de celdas	%
<b>Total Celdas</b>	6561	100
<b>Celdas con contacto litológicos</b>	1203	18.3
<b>Celdas con múltiples contactos</b>	185	2.8



**Figura 55 Mapa Contactos Litológicos, Índice Ambiental**

De la Tabla 18 y Figura 55 se observa que un 18.3% de las celdas presentan contactos litológicos y solo un 2.8% presenta múltiples contactos.

#### 4.6.1.2 FALLAS GEOLÓGICAS

Con la discretización de las fallas geológicas explicada en la sección 4.1.3, se determina para cada celda si es interceptada por alguna falla.

Tabla 19 Estadísticas Fallas Geológicas, Índice Ambiental

Fallas Geológicas en celdas	Numero de Celdas	%
Sin Fallas	4167	63.5
Con Fallas	2394	36.5
Con Múltiples Fallas	1137	17.3

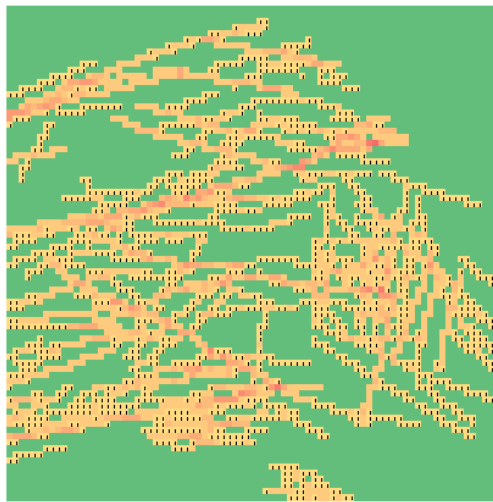


Figura 56 Mapa Fallas Geológicas, Índice Ambiental

De la Tabla 19 y Figura 56 se obtiene que un 36.5% de las celdas presentan fallas geológicas y 17.3% presenta múltiples fallas.

#### 4.6.2 CONDICIÓN DE ESFUERZOS

Para determinar la condición de esfuerzos para cada celda se usarán los resultados de la sección 4.2 para determinar la profundidad y esfuerzos de cada celda.

En función de la profundidad obtenida para el centroide de cada celda y empleando la ecuación para  $S_1$  y  $S_3$  (Figura 20) del modelo de AKL [32] se obtiene los esfuerzos para cada celda.

Tabla 20 Condición de Esfuerzos, Índice Ambiental.

	<i>Profundidad [m]</i>	<i>Esfuerzo Principal Mayor, S<sub>1</sub> [MPa]</i>	<i>Anisotropía S<sub>1</sub>/S<sub>3</sub></i>
<b>Media</b>	615	37.2	2.01
<b>Desviación estándar</b>	138	4.6	0.16
<b>Mínimo</b>	354	28.6	1.74
<b>Máximo</b>	930	47.7	2.43
<b>Cuenta</b>	6561	6561	6561

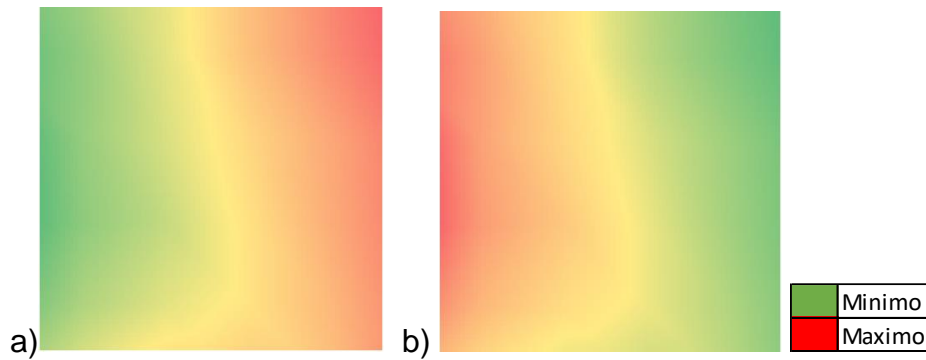


Figura 57 a) Mapa Esfuerzo Principal Mayor (s1), b) Mapa razón anisotropía (s1/s3).

De la Tabla 20 se obtiene que la profundidad fluctúa de los 354 metros a los 930 metros y el esfuerzo principal mayor de 28.6 MPa a 47.7 MPa. La anisotropía varía de 1.74 a 2.43, notándose en la Figura 57 una tendencia inversa al esfuerzo principal mayor.

#### 4.6.3 GEOTECNIA

Se emplea la misma técnica que para las unidades litológicas. Con la discretización de las zonas geotécnicas (sección 4.1.2) y los valores de la Tabla 5, se tiene para cada celda su UCS y E respectivo (promedio ponderado de las zonas que se encuentren presentes en la celda).

Con estos resultados se calcula la capacidad de almacenar energía de deformación elástica por unidad de volumen,  $U_i$ , para cada celda.

$$U_i = \frac{UCS^2}{2E}$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 21 Estadística Ui

<i>Ui [Pa]</i>	
<b>Media</b>	0.169
<b>Moda</b>	0.128
<b>Desviación estándar</b>	0.063
<b>Mínimo</b>	0.085
<b>Máximo</b>	0.357
<b>Cuenta</b>	6561

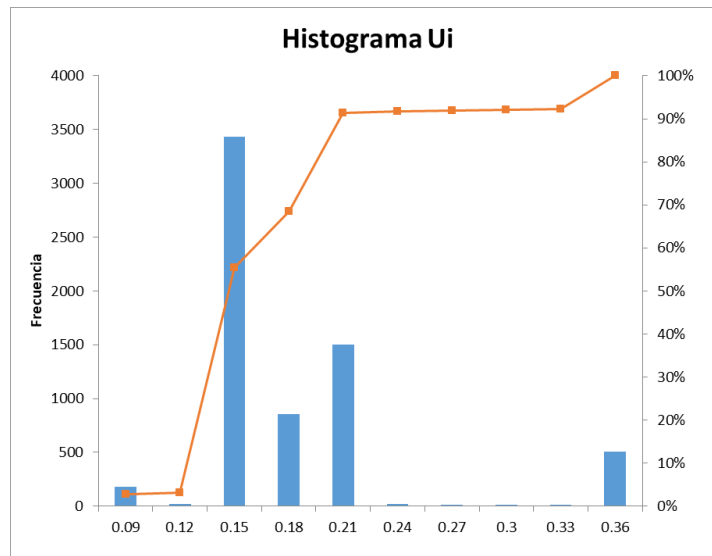


Figura 58 Histograma Ui

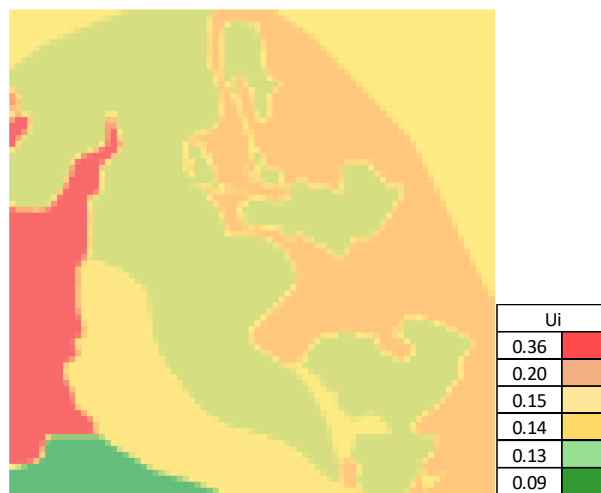


Figura 59 Mapa Ui

De la Tabla 21 se obtiene que la variable  $U_i$  se mueve entre 0.085 a 0.357. Al comparar la Figura 59 con las zonas geotécnicas (Figura 15) se obtiene que la zona 2, correspondiente al sector dacita, presenta la mayor capacidad de almacenar energía de deformación elástica ( $U_i$ ), seguida por el CMET en el sector Reservas Nortes Fw.

# CAPITULO 5 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DESARROLLADAS

En el presente capítulo se detallan las herramientas computacionales desarrolladas para poder generar la base de datos y procesar la información obtenida. El desarrollo de estas herramientas demandó la mayor parte del tiempo destinado al trabajo de tesis.

En el capítulo 4 se explicó de forma general el procedimiento realizado para obtener cada variable. A continuación se entrará en mayor detalle con respecto a los algoritmos desarrollados.

Problemáticas a solucionar:

1. Leer archivos DXF generados en AutoCAD en Python.
2. Extraer la información deseada del archivo DXF.
3. Definir formato en el cual se guardará la información importada.
4. Obtener variables a partir de la información importada.
5. Definir formato en el cual se guardarán los resultados a modo de facilitar el procesamiento y análisis posterior.

Estas son algunas de las problemáticas que se debieron solucionar. Se utilizó Python debido a la gran cantidad de información disponible y librerías existentes de libre acceso.

A continuación se detallarán con mayor detalle las soluciones a cada problemática y los pasos realizados.



## **5.1 EXTRAER INFORMACIÓN DEL ARCHIVO DXF EN PYTHON**

Para resolver esto se buscaron librerías que fueran capaces de leer la información en un archivo DXF generado en AutoCAD. Se encontraron varias opciones pero la que fue utilizada es “ezdxf” desarrollada por Manfred Moitzi.

Esta librería permitió leer el archivo DXF, pero fue necesario desarrollar una subclase que fuera capaz de extraer la información requerida de una layer en específico. En esta etapa se definió que la forma óptima de organizar la información a modo de facilitar su lectura y posterior procesamiento es:

- Archivos estructurados por layer, con nombres fáciles de recorrer con un algoritmo.
- Cada layer debe contener solo una poli línea para el caso de los frentes mineros.
- Se permiten múltiples poli líneas para las layer que contienen los contornos de las unidades litológicas y geotécnicas. (esto se explicará con mayor detalle en la sección correspondiente)
- Se permiten múltiples poli líneas para las layer de las fallas estructurales. Manteniendo una layer por falla a modo de poder identificar fácilmente las fallas en el análisis.

Estos requerimientos y formatos fueron establecidos a modo de facilitar el guardado, procesamiento e interpretación de los datos.

Una vez solucionado el problema de como leer y guardar la información importada de los archivos DXF se debe generar a partir del input inicial estos nuevos archivos en el formato deseado.

## **5.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN INICIAL**

A continuación se detallara el procesamiento realizado a la información inicial..

### 5.2.1 TRAZADO DE FRENTES MINEROS

Los frentes mineros como fue mencionado en la sección 4.3.1 fueron trazados manualmente, debido a la cantidad de consideraciones que se debían tener al momento de trazarlos. Por lo tanto se trazaron manualmente 396 frentes mineros los cuales fueron guardados en archivos independientes (un archivo por tipo de frente) con una sola poli línea por layer debido a que es el formato requerido para poder ser leído y procesado en Python.

Los archivos se estructuraron de la siguiente forma:

1. Archivo individual para cada tipo de frente :
  - a. Frente de Socavación o HDTO.
  - b. Frente de Extracción o EXT.
  - c. Frente de Régimen o REG.
2. Cada layer sigue el siguiente formato:
  - a. Nombre: Año\_Frente\_Mes. Ejemplo: 2000\_HDTO\_JUN, corresponde al frente de socavación para el mes de junio del año 2000.
  - b. Una única poli línea cerrada por layer.

Para trazar cada frente se siguieron las siguientes reglas:

1. El frente del periodo  $i-1$  no puede sobrepasar al frente del periodo  $i$ .
2. El frente de extracción no puede sobrepasar al frente de socavación y el de régimen no puede sobrepasar al de extracción.
3. Los frentes deben ser poli líneas cerradas que contengan al frente del periodo anterior.

Para trazar los frentes de socavación se siguió el siguiente procedimiento:

1. Trazado de frente inicial que contenga las socavaciones para diciembre de 1999.
2. Activar layers de los polvorazos para cada periodo. El archivo inicial contiene esta información en distintas layers con polígonos y fechas representando cada polvorazo de socavación realizado.

3. Trazado del nuevo frente de socavación utilizando el frente del periodo anterior como punto inicial. Para esto se realiza una copia de la poli línea contenida en la layer del periodo anterior y se insertan los puntos necesarios a modo de encerrar los polvorazos correspondientes. Este paso se repite para los tres frentes mineros.

Para trazar los frentes de extracción se siguió el siguiente procedimiento.

1. Del archivo “Catalogo de Extracción” se genera una tabla que contiene el ID del punto de extracción, Coordenada X, Coordenada Y, año, mes y Tonelaje extraído. Se incluye una columna que permitirá plotear de forma rápida un círculo de radio 10 metros en las coordenadas del punto de extracción en AutoCAD. Ejemplo: “CIRCULO 900,800 10” trazara un circulo de radio 10 en las coordenadas (900,800).
2. Se trazan todos los puntos de extracción con extracciones previos a Enero del 2000. Se construye el frente inicial que contenga todos los círculos trazados y no sobrepase al frente de socavación inicial.
3. Aplicando filtros al año y mes en la tabla generada se trazan los círculos correspondientes a los puntos de extracción activos en el periodo, copiando la columna respectiva en AutoCAD.
4. Siguiendo el formato mencionado anteriormente se copia el frente de extracción del periodo anterior y se insertan los puntos necesarios a modo de encerrar todos los círculos trazados, cuidando no sobrepasar el frente de socavación para ese periodo.

Para trazar los frentes de régimen se sigue un procedimiento similar al frente de extracción. Las diferencias son las siguientes:

1. Se incluye una nueva columna que contiene el estado del punto de extracción.
2. Se define que el punto de extracción se encuentra en régimen cuando alguno de estos casos se cumplen:
  - a. Altura extraída mayor o igual a 80 metros

- b. Altura extraída mayor o igual a un 0.3 de la columna de mineral primario.
3. En función del tonelaje extraído el área de influencia asociado a cada punto de extracción se determina la altura extraída para cada periodo y punto de extracción.
4. Se repite el procedimiento realizado para el frente de extracción incluyendo un nuevo filtro en función de si es que el punto de extracción se encuentra en régimen.

Con este procedimiento se generaron los frentes mineros necesarios para la generación de la base de datos.

### **5.2.2 PROCESAMIENTO DE UNIDADES LITOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS.**

Las unidades litológicas y geotécnicas se encuentran en el siguiente formato:

- Las Unidades Litológicas se encuentran en una única layer llamada “Litología” en formato de “Sombreado” (ver Figura 13).
- Las Unidades geotécnicas se encuentra en una unica layer llamada “Sombreados Hundibilidad” en formato de “Sombreado” (ver Figura 15).

Para obtener el formato establecido anteriormente se siguen los siguientes pasos.

1. Identificación de Unidades litológicas o geotécnicas.
2. Definir numeración y nombre a asociar a cada litología. Ejemplo: Lito1 corresponde al Pórfido Diorítico.
3. Generar Contornos de cada sombreado en AutoCAD. Esto retorna todas las poli líneas que generan el sombreado. Estas poli líneas son asociadas a la layer correspondiente.
4. Guardar archivo con las nuevas layers.

### **5.2.3 PROCESAMIENTO DE FALLAS ESTRUCTURALES**

Se tiene de la información inicial 2 layers, una contiene todas las fallas principales y la otra todas las fallas mayores (ver Figura 16). Las fallas se encuentran divididas

en un gran número de segmentos independiente. Para procesar esta información se debieron seguir los siguientes pasos:

1. Definir nombre de layers y formato a utilizar. Se define usar “f%n” donde %n es un numero entero para las fallas mayores y “fp%n” para las fallas principales. Esto debido a que los set de fallas principales son un conjunto de fallas independiente (desde el punto de vista del plano), por lo cual por ejemplo fp1-4 corresponde el sistema de fallas N2. Se genera un registro detallado del nombre de la layer y el sistema de fallas al que pertenece.
2. Se trazaron en la layer correspondiente de forma manual las fallas, empleando solamente una poli línea por falla.

Se obtiene de esta forma un archivo con 150 layers para las fallas mayores y 50 layers para las fallas principales.

#### 5.2.4 PROCESAMIENTO DE TOPOGRAFÍA

La topografía se encuentra como una triangulación (ver Figura 18). El procesamiento de este archivo fue extraer a un archivo csv las coordenadas de cada punto en la triangulación. Esto se realizó usando las herramientas existentes en AutoCAD.

#### 5.2.5 PROCESAMIENTO CATALOGO DE EXTRACCIÓN

Para emplear la información contenida en el catálogo de extracción en los algoritmos fue necesario estructurar el tonelaje extraído y altura extraída por punto de extracción con el siguiente formato:

ID punto de extracción	Coordenada X	Coordenada Y	Tonelaje/altura total extraído a Diciembre de 1999	Tonelaje/altura acumulado extraído para el periodo 1	...	Tonelaje/altura acumulado extraído para el periodo 132
------------------------	--------------	--------------	--	--	-----	--

Para generar estos dos archivos (Extraccion\_mensual.csv y Alturamen.csv) se utilizó VBA de Excel, siendo simplemente una reestructuración de la información actual.

## 5.3 OBTENCIÓN DE VARIABLES MINERAS

En esta sección se detallará el procedimiento y algoritmo utilizado para obtener cada una de las variables mineras.

### 5.3.1 CALCULO DE ÁREAS

En la sección 4.3.2 se definen las siguientes áreas:

- Área Socavada (Figura 25).
- Área Incorporada (Figura 28).
- Área en Quiebre (Figura 31).
- Área de Losa (Figura 33).

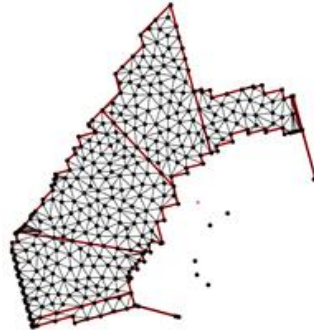
Estas áreas tienen en común que se encuentran definidas en función de los frentes mineros y las zonas de análisis (Figura 21). A continuación se detallara el procedimiento realizado para obtener el área deseada.

El primer problema a resolver es a partir de un frente minero y las zonas de análisis generar los nuevos polígonos que definirán las áreas deseadas. Por ejemplo obtener el área del frente de socavación para la zona  $j$  en el periodo  $i$ .

Para resolver este problema se definieron las zonas como planos, esto permitió calcular las distancias de los puntos del frente minero al plano. Debido a como se definieron como planos, los puntos que se encuentran en la zona 1 cumplen que se encuentran a una distancia positiva del plano 1 y una distancia negativa del plano 2. Con esto fue posible determinar los puntos contenidos en cada zona, pero aún falta determinar y agregar las intersecciones del frente con las zonas.

Para determinar las intersecciones del frente con las zonas se aprovecha el formato utilizado para los frentes mineros. Al ser poli líneas cerradas, los puntos se encuentran ordenados, por lo cual, cuando se genera el cambio de signo en la distancia con cada plano se puede identificar el par de puntos y con ellos obtener la intersección de la recta que los une con el plano, determinando así las intersecciones de las zonas con los frentes. Con estas intersecciones se calcula el ancho del frente.

Una vez obtenido los puntos contenidos en cada zona con sus respectivas intersecciones se debe calcular el área de los nuevos polígonos. Para esto se emplearon las triangulaciones de Delaunay mediante la librería “triangle” desarrollada por J. Shewchuk, Universidad de California. Obteniendo una malla como se observa en la Figura 60, el modulo retorna las coordenadas de cada triangulo con las cuales se calcula el área.



**Figura 60 Resultado Triangulación de Delaunay, Python.**

Con estos resultados se obtiene el área para cualquier polígono definido en función de los frentes mineros y las zonas de análisis. Este método posee las siguientes ventajas:

- No depende del frente minero o zona de análisis definida en este caso de estudio, por lo cual es aplicable directamente en otras faenas.
- Se pueden obtener los resultados de forma rápida al modificar los frentes o zonas.

Una vez obtenida las áreas de cada frente para cada zona se guardan los resultados en el siguiente formato: Frente Minero (Ej. 2005\_EXT\_FEB), Área Zona 1, Área Zona 2, Área Zona 3, Área Zona 4, Área Zona 5, Ancho Frente Zona 1, Ancho Frente Zona 2, Ancho Frente Zona 3, Ancho Frente Zona 4, Ancho Frente Zona 5.

Se genera un archivo por cada tipo de frente minero (HDTO, EXT, REG).

Para obtener las áreas definidas en la sección 4.3.2 se elaboró un algoritmo en VBA de Excel el cual permite definir la escala temporal a usar (mensual, trimestral, semestral) y en base a los archivos generados en Python obtener para cada periodo

y zona las áreas deseadas. Esto permitió en caso de cualquier modificación de los frentes recalcular los resultados de forma rápida y precisa.

### 5.3.2 DISCRETIZACIÓN UNIDADES LITOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

Para poder trabajar con la información que se tiene de las unidades litológicas y geotécnicas se decidió que la mejor opción es generar una discretización en puntos equi-espaciados. Esto permite obtener para cualquier polígono la proporción de cada unidad presente en este.

Para generar esta discretización se sigue el siguiente procedimiento:

1. A partir de los sombreados del archivo original se generan los contornos empleando la opción presente en AutoCAD como se muestra en la Figura 61.

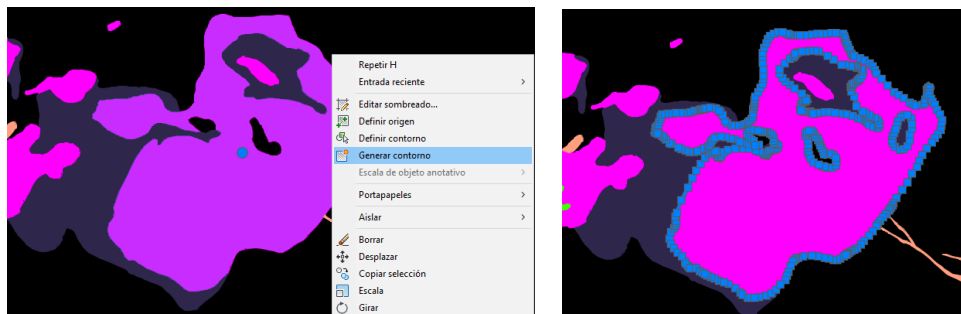


Figura 61 Generación de Contornos de unidades litológicas, AutoCAD

2. Todos los contornos generados para cada unidad litológica o geotécnica se guardan en una sola layer.

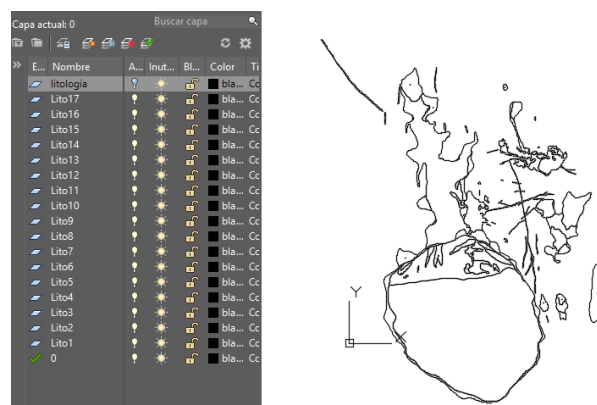
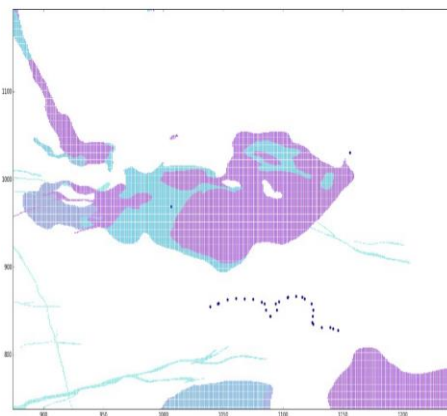


Figura 62 Contornos unidades Litológicas en formato requerido, AutoCAD



3. El archivo generado con el formato presentado en la Figura 62 es importado a Python.
4. Se debe definir la distancia entre puntos, se empleó una distancia de 1 metro entre los puntos debido a que de esta forma no se pierde precisión en la discretización de las zonas y no aumento considerablemente el tiempo de ejecución de los códigos. El algoritmo permite definir la distancia que el usuario desee utilizar.
5. Se usa la clase "path" de la librería "matplotlib" [6]. Esta clase posee una función llamada "contains\_points", a esta función se le entrega un polígono y un set de punto retornando una lista de 1/0 si el punto se encuentra contenido en el polígono.
6. Para cada litología se repite el paso anterior con todos los contornos, generando una lista con el número de veces que un punto se encuentra contenido en algún polígono. Si el número de veces es impar y mayor a 0 se define que el punto pertenece a la litología y si es par que no pertenece a esta. Esto queda más claro al observar la Figura 61, un punto que se encuentre en la zona morada habrá sido contenido por los contornos 2 veces de la litología rosada, en cambio un punto que se encuentre en la zona rosada en el centro de la zona morada habrá sido contenido 3 veces. En la Figura 63 se presenta el resultado del método.



**Figura 63 Discretización unidades litológicas cada 1 metro**

Este procedimiento se repite para las unidades geotécnicas, obteniéndose así dos archivos CSV que contienen los puntos de la discretización y la unidad a la que pertenecen.

Con este resultado es posible obtener para cualquier polígono las unidades litológicas o geotécnicas presentes y sus correspondientes proporciones. Con las proporciones de cada unidad geotécnica es posible obtener el promedio del parámetro geotécnico de interés en el área deseado.

Para el caso particular del índice ambiental la discretización de las unidades litológicas permite determinar si existen contactos litológicos en las celdas.

### **5.3.3 DISCRETIZACIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES.**

Para obtener la presencia de fallas en cualquier polígono se decidió que la mejor manera es discretizar las fallas en puntos equi-espaciados cada 0.5 metros. Para esto se siguen los siguientes pasos en función del formato definido en la sección 5.2.3:

1. Para cada polí línea contenida en cada layer se extraen las coordenadas de los puntos.
2. Los puntos que componen la recta se encuentran en orden en el listado extraído, por lo cual se recorre esta lista seleccionando de ha pares de puntos.
3. Se obtiene la ecuación de la recta que une ambos puntos y en función de ella se generan puntos equi-espaciados cada 0.5 metros recorriendo la distancia entre ellos. (ver Figura 16 y Figura 17)
4. Se genera un listado que contiene el ID de la falla y los puntos de la discretización realizada.
5. Se genera un archivo CSV que contiene todas las fallas con los puntos correspondientes.

El resultado de este método permite poder usar la función “contains\_points” con cualquier polígono y así obtener las fallas que se encuentran presentes en este.

### **5.3.4 OBTENCIÓN DE VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN, ALTURA EXTRAÍDA, TONELAJE EXTRAÍDO Y ÁNGULO DE EXTRACCIÓN.**

Como se explica en la sección 494.3.4 para obtener estas variables se consideran los puntos que se encuentren contenidos en el área en Quiebre. Para esto se siguen los siguientes pasos:

1. Definir para cada periodo  $i$  y zona  $j$  el contorno del área en Quiebre. Para esto se utilizan los puntos del frente de extracción y de régimen del periodo y zona correspondiente.
2. Empleando la función “contains\_points” de la clase “path” de la librería “matplotlib” [6], se obtiene en función del catálogo de extracción y el contorno del área en quiebre, los puntos de extracción que se encuentran contenido en este.
3. Debido al formato que se definió para los catálogos de extracción se extrae de forma rápida el tonelaje extraído, altura extraída para cada punto de extracción contenido en el polígono. La velocidad extracción se calcula en función del tonelaje extraído y el área de influencia del punto de extracción.
4. Para el ángulo de extracción se obtener la distancia del punto de extracción con el frente. Para esto se siguen los siguientes pasos:
  1. Se define una recta que pase por el punto de extracción y sea paralela a la recta bisectriz entre las rectas que definen la zona de análisis.
  2. Se recorre el frente de extracción evaluando si la línea entre cada par de puntos es intersectada con la recta definida en el paso anterior.
  3. Encontrada la intersección se calcula la distancia con el punto de extracción.
  4. Con la distancia al frente de extracción y altura total extraída a la fecha se calcula el ángulo de extracción para cada punto de extracción.

De esta forma para cada periodo  $i$  y zona  $j$  se tiene la siguiente información:

- Tonelaje extraído en cada punto de extracción.
- Tonelaje total extraído de la zona.

- Velocidad de extracción por punto de extracción.
- Velocidad de extracción promedio de la zona.
- Altura total extraída por punto de extracción.
- Ángulo de extracción por punto de extracción.
- Ángulo de extracción promedio de la zona.

### 5.3.5 PROFUNDIDAD Y CONDICIÓN DE ESFUERZOS

Se busca obtener la profundidad de cualquier punto en función de la topografía. Se debe primero comentar el formato en el cual se encuentra la topografía. En la Figura 64 se observa la topografía en su formato original. De esta se extraen todas las coordenadas de los nodos que la componen.

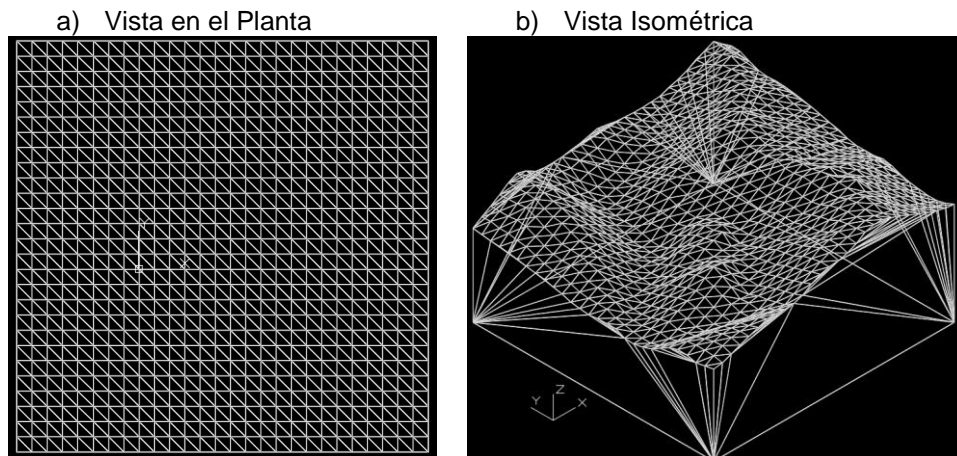
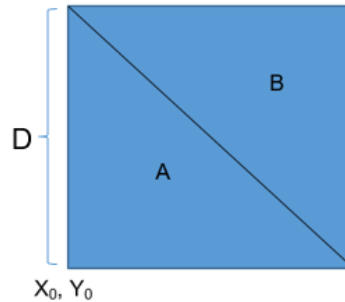


Figura 64 Topografía, Formato original, a) vista en Planta, b) vista isométrica

Cada celda en la topografía es de 200x200 metros.

Para obtener la profundidad de cualquier punto se siguen los siguientes pasos:

1. Importar en Python en CSV que contiene la coordenadas (X,Y,Z) de los nodos de la topografía.
2. Dado un punto cualquiera se determina en primer lugar a que celda pertenece. Esto se realiza en función de las coordenadas X e Y.
3. Se debe determinar en qué triangulo se encuentra el punto dentro de la celda. En la Figura 65 se esquematiza este punto.



**Figura 65 Celda de la triangulación de la Topografía**

Dado el punto  $X, Y$ , se tiene que si  $(Y - Y_0) + (X - X_0) < D$ ; el punto pertenece al triángulo A y en caso contrario pertenece al triángulo B.

4. Determinado el triángulo al que pertenece el punto se calcula la ecuación del plano determinado por las coordenadas  $(X, Y, Z)$  del triángulo.
5. Se evalúa el punto  $X, Y$  en la ecuación del plano para obtener la coordenada  $Z$ , luego la profundidad será la diferencia entre el valor de  $Z$  y la cota en la cual se encuentre el punto (por ejemplo cota del Nivel de Hundimiento).

Con este método se obtiene el resultado que se observa en la Figura 19 para el sector de RENO.

Para determinar la condición de esfuerzo se aplica el modelo de AKL (Figura 20) para el esfuerzo in-situ en función de la profundidad.

## **5.4 EXTRACCIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS**

En función del catálogo de eventos sísmicos se desea filtrar los eventos que pertenecen al periodo y zona de interés dado un polígono o contorno sísmicos.

Al importar el catálogo de eventos sísmicos se extrae la ubicación, fecha, momento sísmico y energía de cada evento sísmico registrado. A continuación se detalla el procedimiento realizado para extraer los eventos sísmicos para un polígono determinado.

Se siguen los siguientes pasos:

1. Dado el año del periodo de interés se selecciona el archivo correspondiente a importar (EVP).
2. Se realiza un primer filtro en función de la mina RENO.
3. Se filtra en función del mes del periodo de interés.
4. Se utiliza la función “contains\_points” de la clase “path” de la librería “matplotlib” para obtener los eventos sísmicos que se encuentran contenidos en la zona determinada (ver sección 4.4).
5. Se calcula para todos los eventos extraídos el momento magnitud.
6. Se genera el registro de eventos sísmicos por periodo i y zona j.
7. En función del archivo generado se compila un resumen que posee el evento de momento magnitud mayor, sumatoria de momento sísmico y numero de eventos para cada caso de estudio.

## **5.5 CALCULO DE PARÁMETROS DEL ÍNDICE AMBIENTAL**

Para obtener los parámetros de cada celda del índice ambiental se construyó un algoritmo que a partir de los resultados de los otros códigos genera la base de datos deseada.

A continuación se comentara los pasos realizados para calcular los parámetros del índice ambiental.

1. Definir zona de estudio.
2. Definir malla de análisis, en este trabajo se utilizaron celdas de 10x10 metros.
3. Importar discretización de unidades litológicas, geotécnicas y fallas estructurales.
4. Importar topografía.
5. Obtención de parámetros:
  - a. Contactos litológicos: empleando la discretización de unidades litológicas se filtran los puntos en función de cada celda a modo de determinar el número de litologías diferentes existentes en cada una.

- b. Parámetros Geotécnicos: en función de la discretización se determina la proporción de cada unidad geotécnica en cada celda y se calcula el promedio ponderados de los parámetros de interés.
  - c. Fallas estructurales: en función de la discretización de las fallas se registra para cada celda el ID de la falla que la cruza.
  - d. Profundidad y condición de esfuerzos: empleando el método explicado en la sección 5.3.5 y empleando el centroide de la celda se calcula la profundidad de cada una y con esta se calcula el estado de esfuerzos in-situ aplicando el modelo de AKL.
6. Se genera un archivo CSV que contiene el detalle de todos los parámetros para cada celda.
7. Empleando VBA de Excel se construyó un algoritmo que permite construir los mapas que se observan en la sección 6.3, simplemente definiendo la columna que se desea utilizar de la base de datos. Esto permitió visualizar de forma rápida cualquier cambio que se realizara.

## **CAPITULO 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **6.1 HISTORIALES DE VARIABLES GEO-MINERAS**

En esta sección se analizan individualmente los historiales de cada variable geominera y la correlación que pueda existir con los eventos sísmicos relevantes obtenidos en la sección 4.4.

El análisis que se presenta a continuación busca determinar si existe alguna correlación visual con la evolución temporal de cada una de las variables individualmente y los eventos sísmicos. Es importante notar que, debido a la complejidad del proceso por el cual se generan los eventos sísmicos, resultada difícil poder concluir sobre cuál variable es la más relevante en la ocurrencia de la sismicidad.

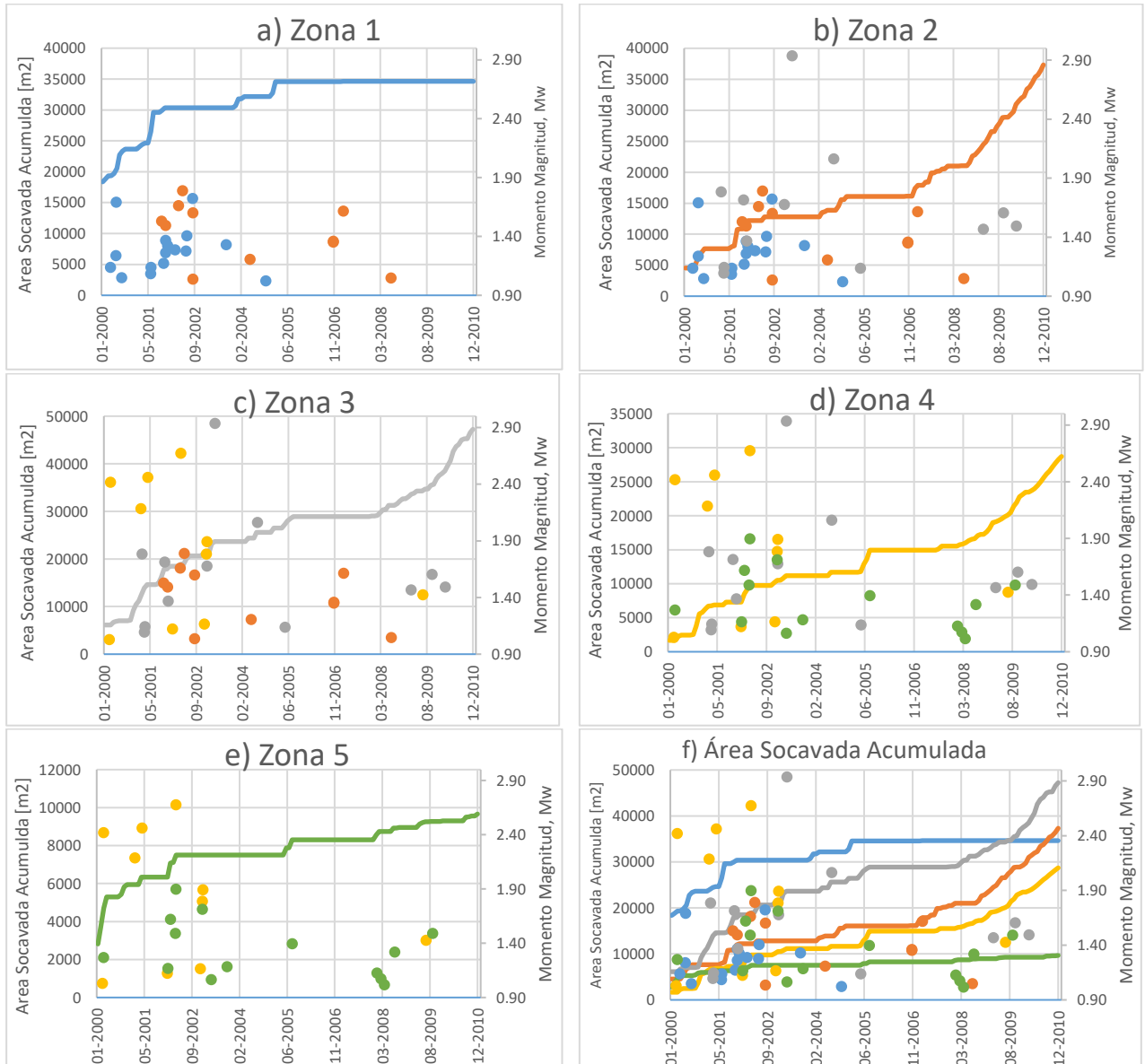
Se debe notar que la respuesta del macizo rocoso al proceso minero no es inmediata por lo cual se espera un cierto desfase temporal entre el proceso minero y la sismicidad inducida. Esto genera inconvenientes para el modelo, debido que al definir periodos mensuales para las variables mineras ocurre que para un periodo con un evento sísmico relevante no se tiene, por ejemplo, socavación ni incorporación de área pero si en el periodo anterior. Con esto en mente se analiza uno a uno los eventos sísmicos relevantes a modo de determinar si es necesario asociar el evento relevante al periodo anterior de manera de mejorar el ajuste del modelo. Además, ocurre una situación similar con los eventos sísmicos que se encuentran cerca del límite de cada zona, por lo cual, se analizara la ubicación del evento sísmico a modo de determinar si es necesario asociarlo a la zona contigua.

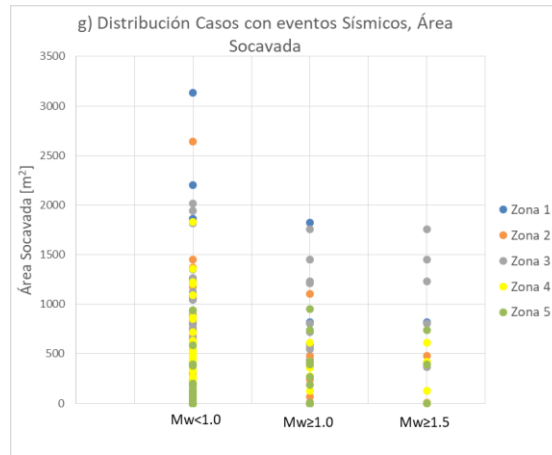
Debido a que nos encontramos con una base de datos desbalanceada como se aprecia en la Figura 52 , este proceso ayudará a reducir el efecto en el ajuste, al aumentar el número de casos con eventos sísmicos relevantes.



## 6.1.1 ÁREA SOCAVADA

En la Figura 66 se presentan los gráficos para cada zona por separado, con los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15. Se presenta el área socava acumulada con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes.





**Figura 66 Gráficos Área socavada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

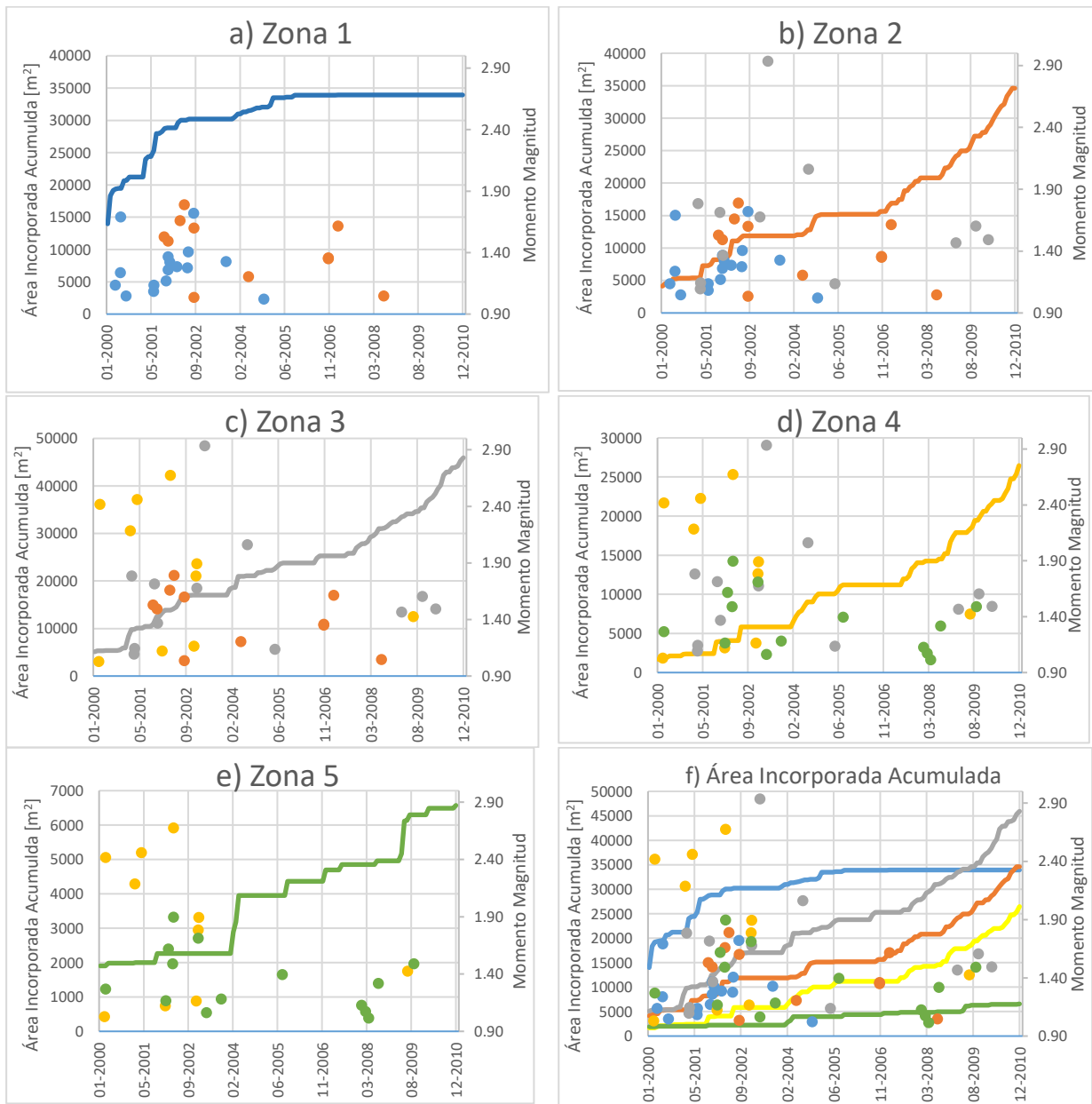
Al analizar la Figura 66 se observa que a priori se podría asociar una correlación de las socavaciones (incrementos en la curva) con los eventos sísmicos. Se sabe que la socavación produce una redistribución de los esfuerzos, lo cual desestabiliza el macizo rocoso y aumenta las probabilidades de gatillar eventos sísmicos. El problema que se observa al analizar los datos corresponde al desfase temporal que ocurre entre el periodo que se realiza la socavación y el evento sísmico.

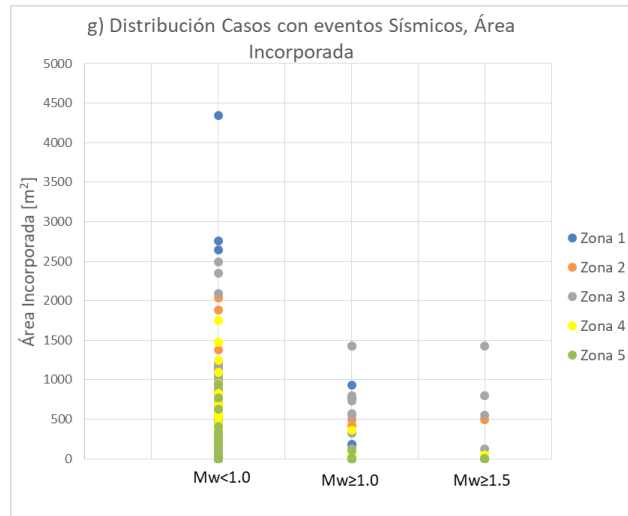
De los gráficos en la Figura 66 se observa:

- Se observa que los eventos sísmicos ocurren en general luego de periodos de socavaciones. Debido al desfase temporal esperado con respecto a la respuesta del macizo rocoso a la redistribución de esfuerzos producto de la socavación, se genera lo que se observa en el gráfico g) en el cual, casos con eventos sísmicos relevantes no se encuentran asociados a periodos de alta socavación.
- En las zonas 2, 3 y 4 se observa que desde el 2007 existe un aumento importante en la tasa de socavación, lo cual, se encuentra asociado a la aplicación de fracturamiento hidráulico en el sector.

## 6.1.2 ÁREA INCORPORADA

En la Figura 67 se presentan los gráficos para cada zona por separado, con los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15. Se presenta el área incorporada acumulada con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes.





**Figura 67 Gráficos Área incorporada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

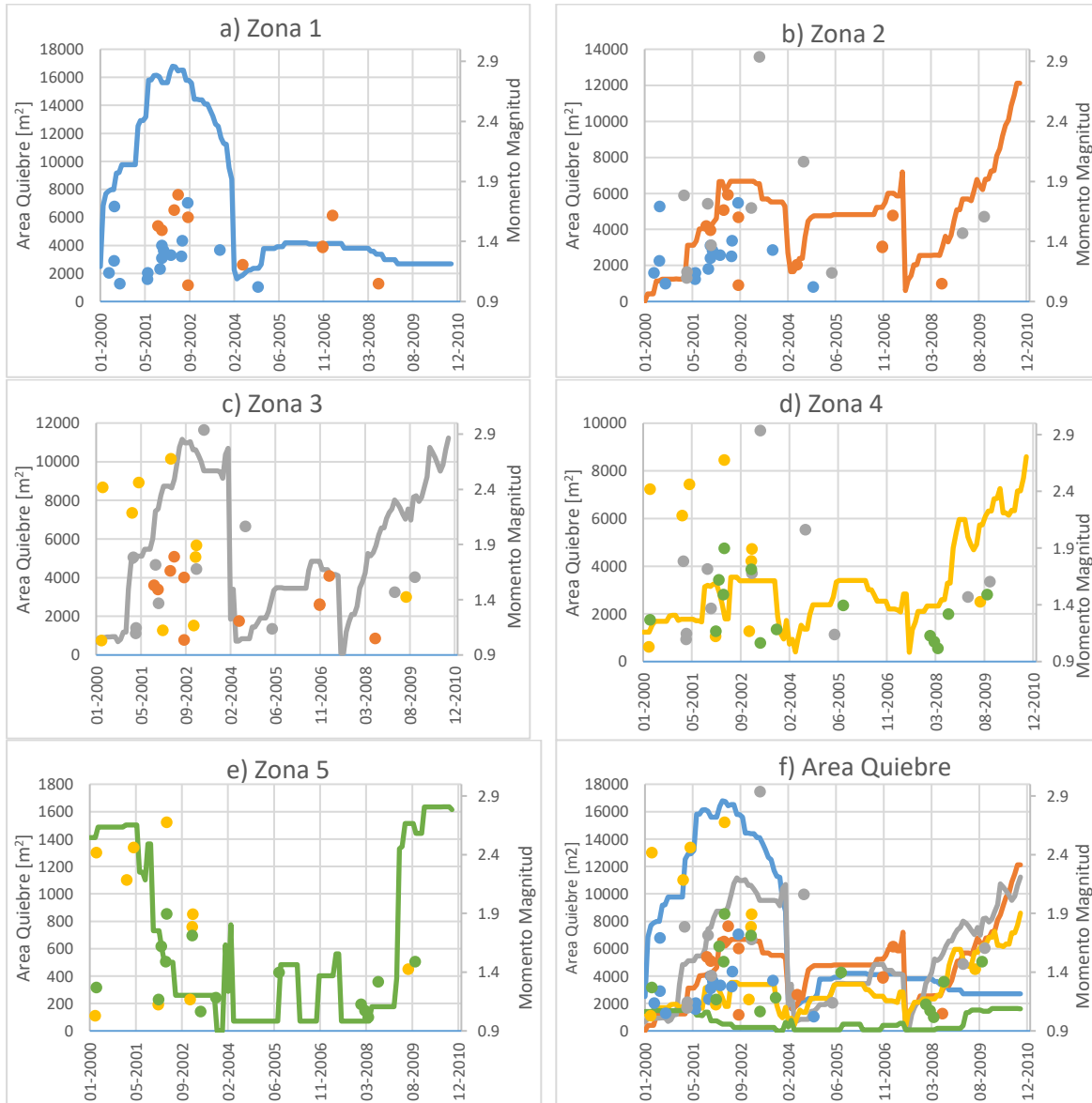
La incorporación de área está definida por la incorporación de la batea. Debido al proceso de propagación del Caving se esperaría que la sismicidad inducida por la incorporación de área se generara sobre el nivel del hundimiento (Efecto de la propagación del Caving).

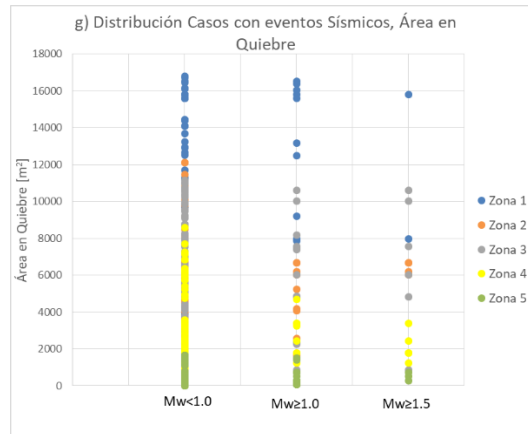
En la Figura 67 se observa lo siguiente:

- La zona 1 pareciera presentar una correlación entre los eventos sísmicos y la incorporación de área.
- Para la zona 2, 3 y 4 se observa que en el periodo previo al 2007 (introducción del FH) se podría asociar los eventos sísmicos a periodos de incorporación de área. Pero para el periodo posterior al 2007 con la incorporación del fracturamiento hidráulico al sector se observa una incorporación constante de área, pero no se generan eventos sísmicos relevantes, lo cual es lo esperado con la presencia de FH, pero esto implicará en el modelo que tendremos periodos con alta área incorporada, pero sin eventos sísmicos. Esto se observa en el gráfico g), en el cual el área incorporada en los periodos con eventos sísmicos relevantes es baja.

### 6.1.3 ÁREA EN QUIEBRE

En la Figura 68 se presentan los gráficos para cada zona por separado, con los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15. Se presenta el área en quiebre con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes.





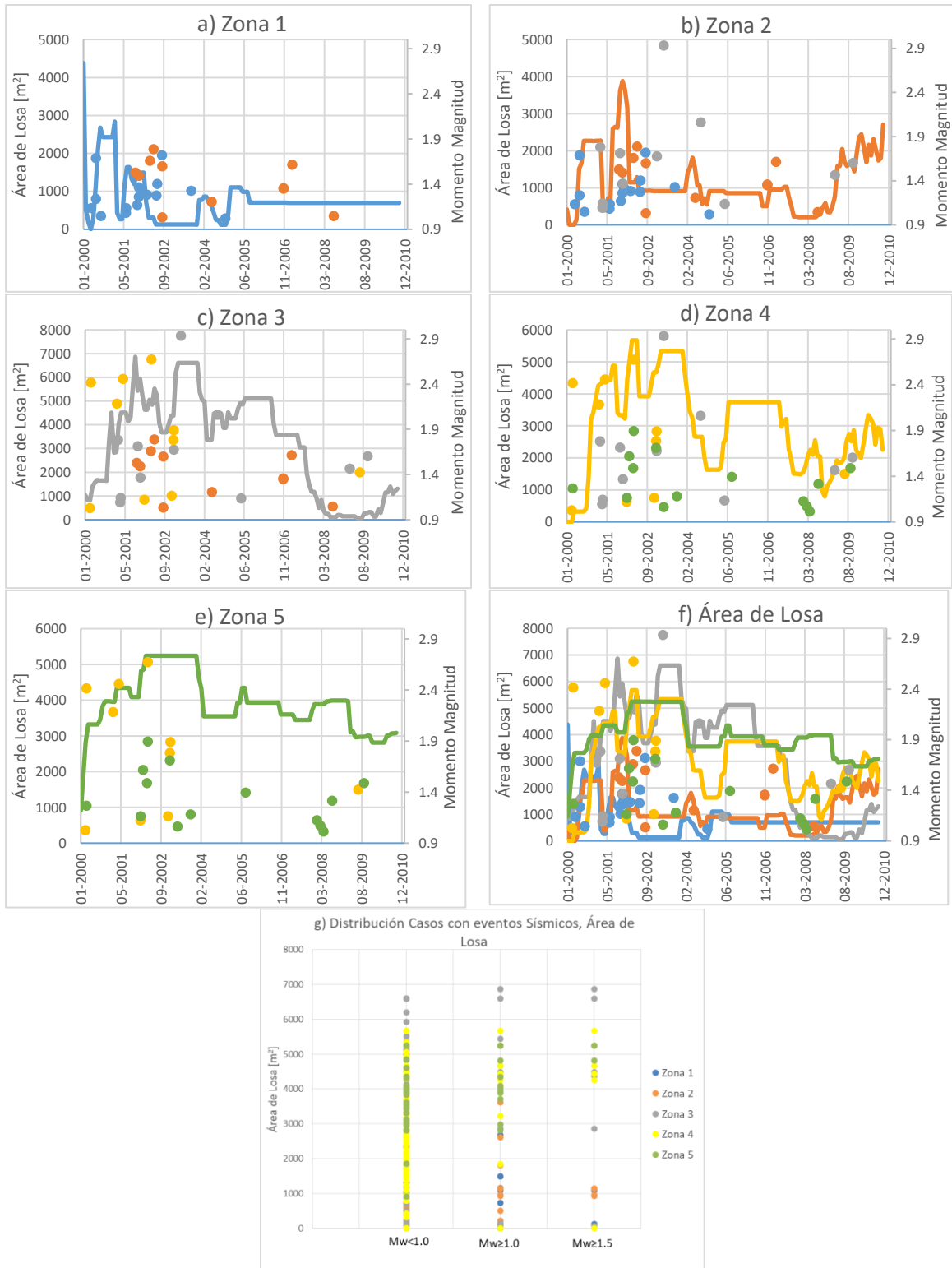
**Figura 68 Gráficos Área en Quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

De los gráficos en la Figura 68 se observa lo siguiente:

- En la zona 1 se aprecia que en el periodo del 2000 al 2004 los eventos sísmicos se encuentran asociados a un alta área en quiebre.
- En la zona 3 se observa una tendencia similar, produciéndose el evento sísmico de mayor momento magnitud con una alta área en quiebre, a su vez se observa que ocurre un evento relevante a comienzos del 2004 cuando se tiene una baja área en quiebre.
- En las zonas 2, 3, 4 y 5 se observa una tendencia al alza en el área en quiebre desde el año 2007, pero nuevamente este aumento no se condice con un aumento de los eventos sísmicos (Efecto del FH).
- En el gráfico g) se observa que los casos con eventos sísmicos relevantes se encuentran en general asociados a periodos de alta área en quiebre para cada zona, particularmente para la zona 1 se observa una mayor relación.

#### **6.1.4 ÁREA DE LOSA**

En la Figura 69 se presentan los gráficos para cada zona por separado, con los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15. Se presenta el área de losa con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes.



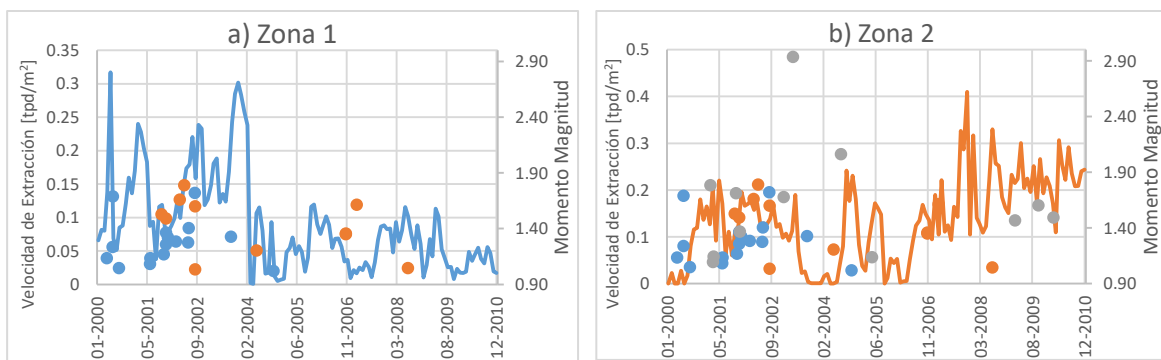
**Figura 69 Gráficos Área de Losa por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

De los gráficos de la Figura 69 se observa:

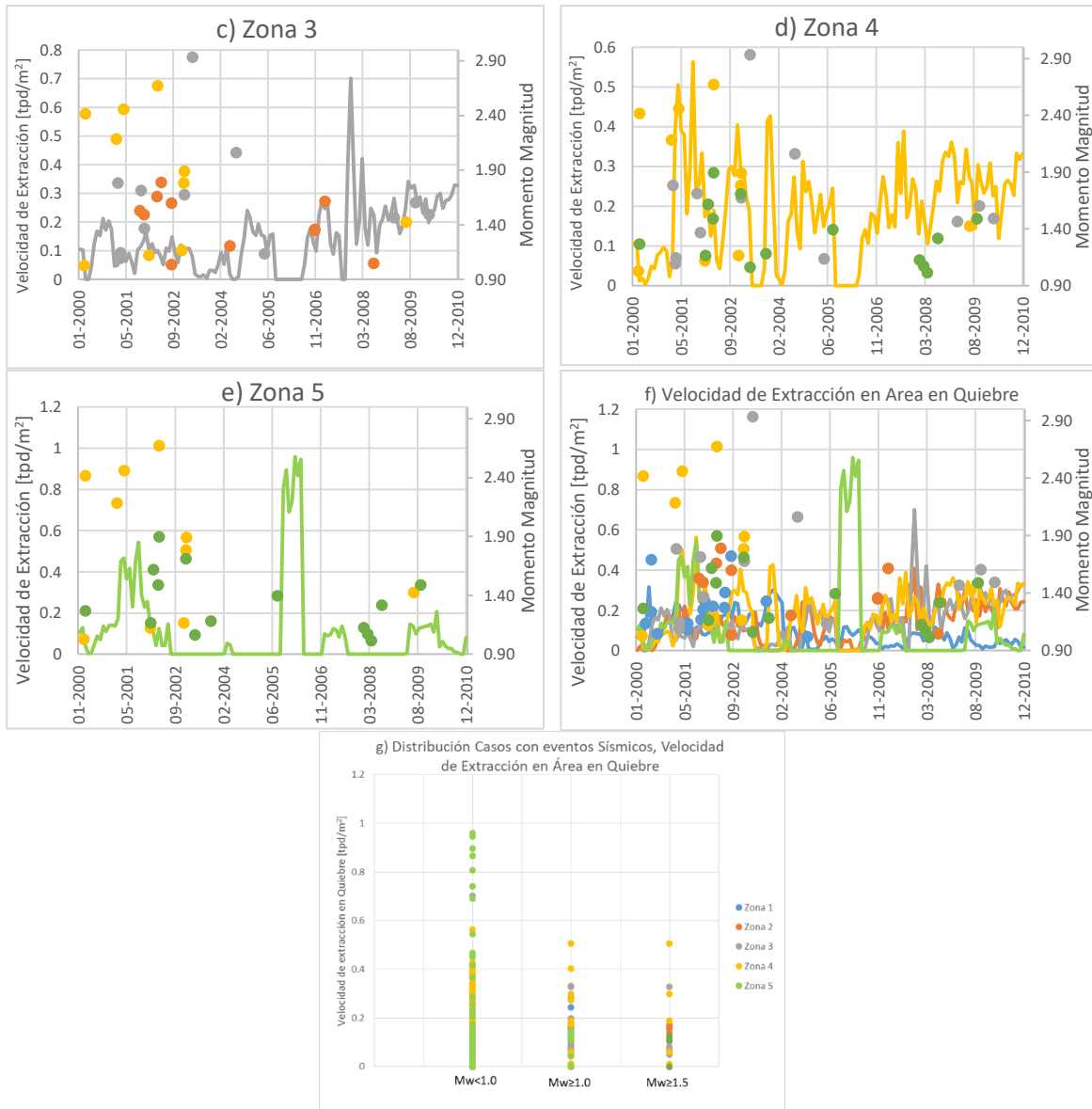
- Se puede apreciar que los eventos sísmicos se encuentran en general asociados a periodos de una alta área de losa para el periodo 2000-2007. Esto se evidencia en el gráfico g) en el cual se nota que los casos con eventos sísmicos relevantes tienden a tener una alta área de losa.
- En cambio para la zona 3 se observan eventos sísmicos en el 2009 con área de losa cercana a 0 (frente de extracción junto al frente de socavación, Panel Caving Convencional).
- En el gráfico g) se observa que en general los casos con eventos sísmicos relevantes se encuentran asociados a periodos con una alta área de losa pero a su vez existe un gran número de periodos con una alta área de losa que no presentaron eventos sísmicos relevantes.

### 6.1.5 VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN

Se analizarán las velocidades de extracción promedio en el área en quiebre (Figura 70) y la velocidad de extracción máxima para puntos de extracción en el área en quiebre (Figura 71). Se debe notar que tanto la velocidad de extracción como el tonelaje extraído consideran solamente los puntos de extracción que se encuentran en quiebre.



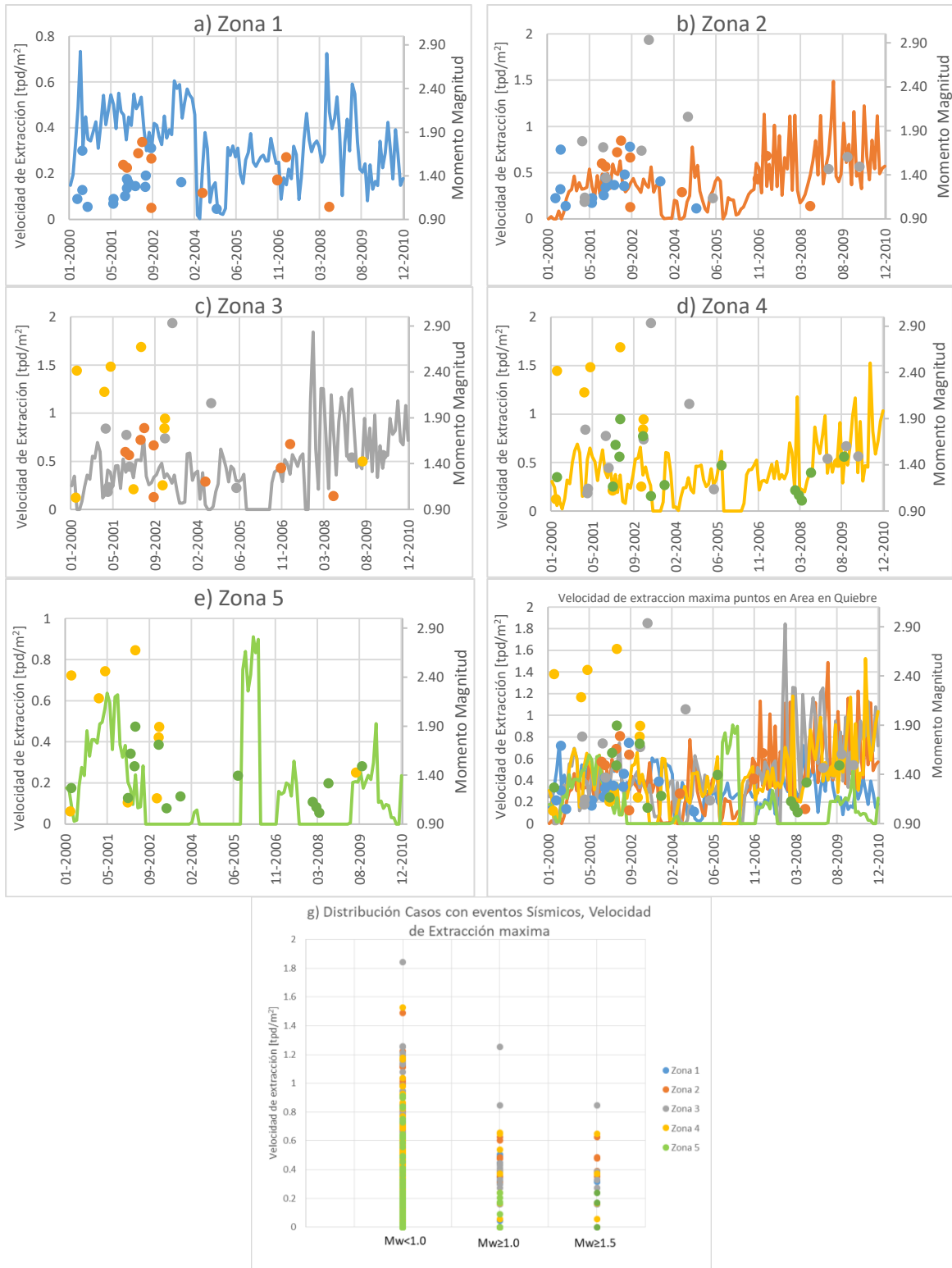




**Figura 70 Gráficos Velocidad de Extracción en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

De los gráficos de la Figura 70 se observa lo siguiente:

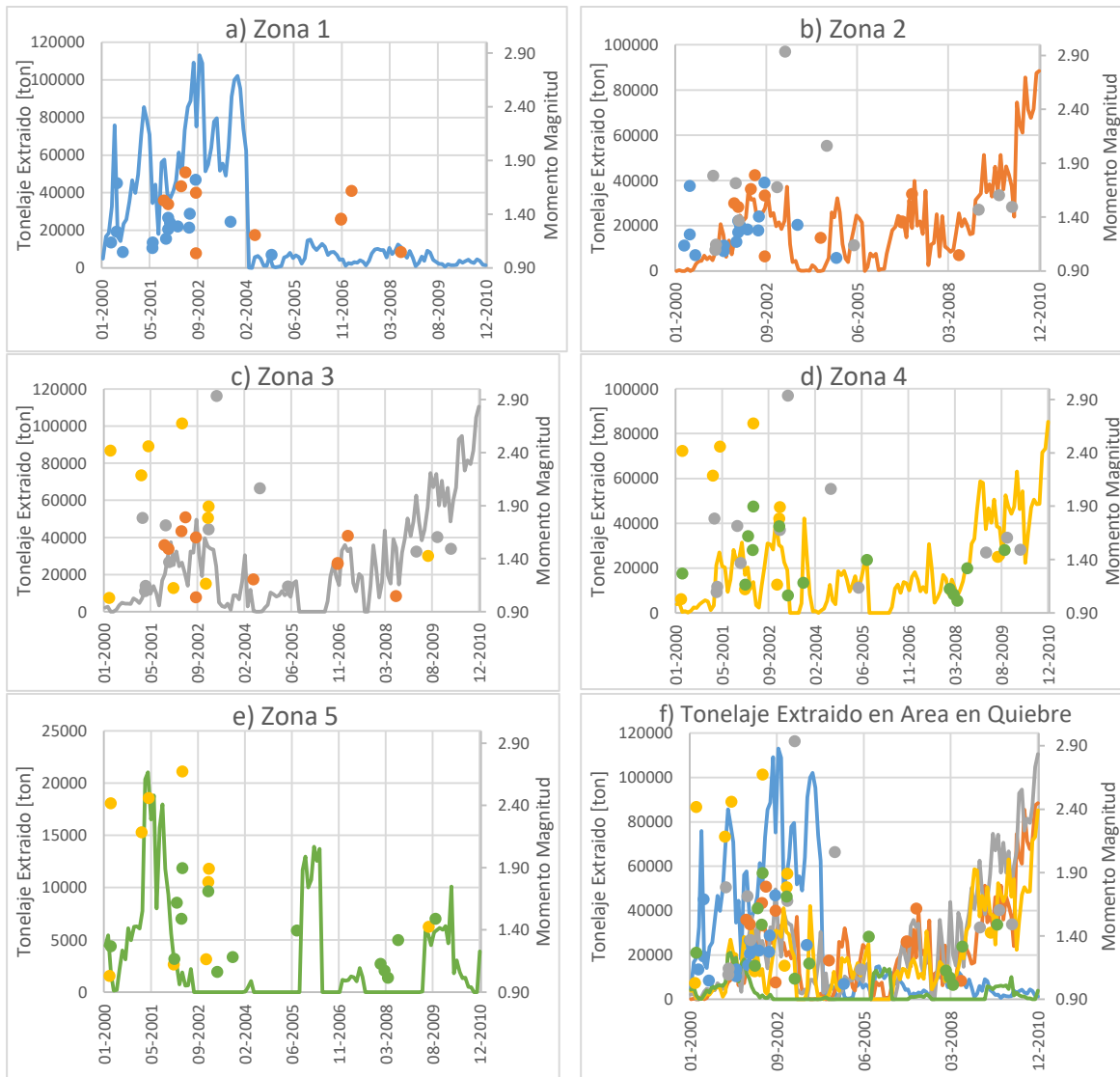
- Para las zonas 2,3 y 4 en el periodo posterior al 2007 se observa una tendencia al alza de la velocidad de extracción.
- Al analizar los gráficos por zona no se observa una correlación directa de una alta velocidad de extracción con los eventos sísmicos, esto se evidencia en el gráfico g).

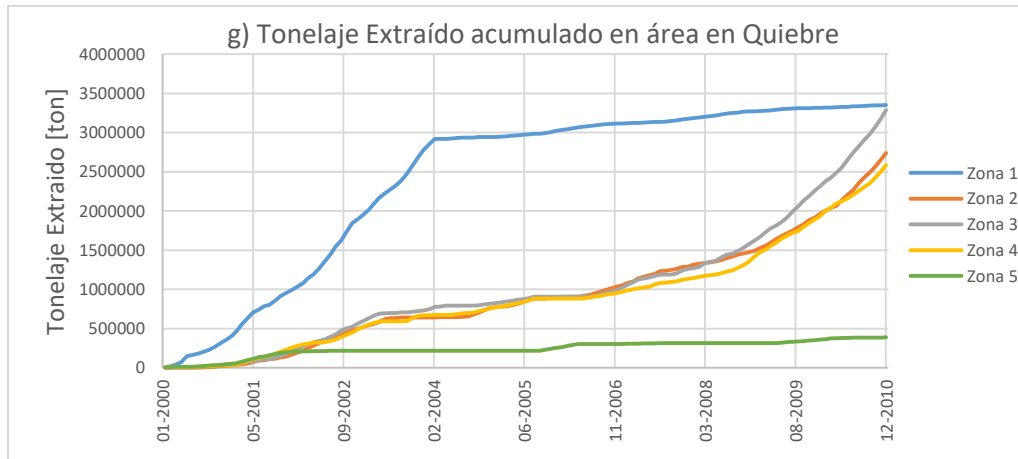


**Figura 71 Gráficos Velocidad de extracción máxima por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

De los gráficos en la Figura 71 se concluye lo siguiente:

- Para las zonas 2,3 y 4 en el periodo posterior al 2007 se observa una tendencia al alza de la velocidad de extracción esto debido a la incorporación de Fracturamiento hidráulico en el sector.
- Al analizar los gráficos por zona no se observa una correlación directa de una alta velocidad de extracción con los eventos sísmicos, esto se evidencia en el grafico g).





**Figura 72 Gráficos Tonelaje extraído en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Tonelaje Extraído acumulado en área en quiebre.**

Se debe notar que en la Figura 72 el tonelaje en cada periodo corresponde al extraído de puntos de extracción en quiebre y no representa la extracción total del sector. De los gráficos se concluye lo siguiente:

- La zona 1 en el periodo 2000-2004 presenta la mayor extracción pero a su vez como se observa en los gráficos a) de las Figura 68 y Figura 70 esta zona es la que presenta la mayor área en quiebre para el periodo, por lo cual no se observa una velocidad de extracción mayor a las otras zonas.
- El aumento de la pendiente para las zonas 2,3 y 4 desde comienzo del 2007 se condice con lo que se observa con respecto a la velocidad de extracción (Figura 70) y área en quiebre (Figura 68).

### 6.1.6 ÁNGULO DE EXTRACCIÓN PROMEDIO

Se analizará el ángulo de extracción promedio para los puntos que se encuentran en la zona en quiebre para cada periodo y zona. Se presenta el ángulo de extracción promedio con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes



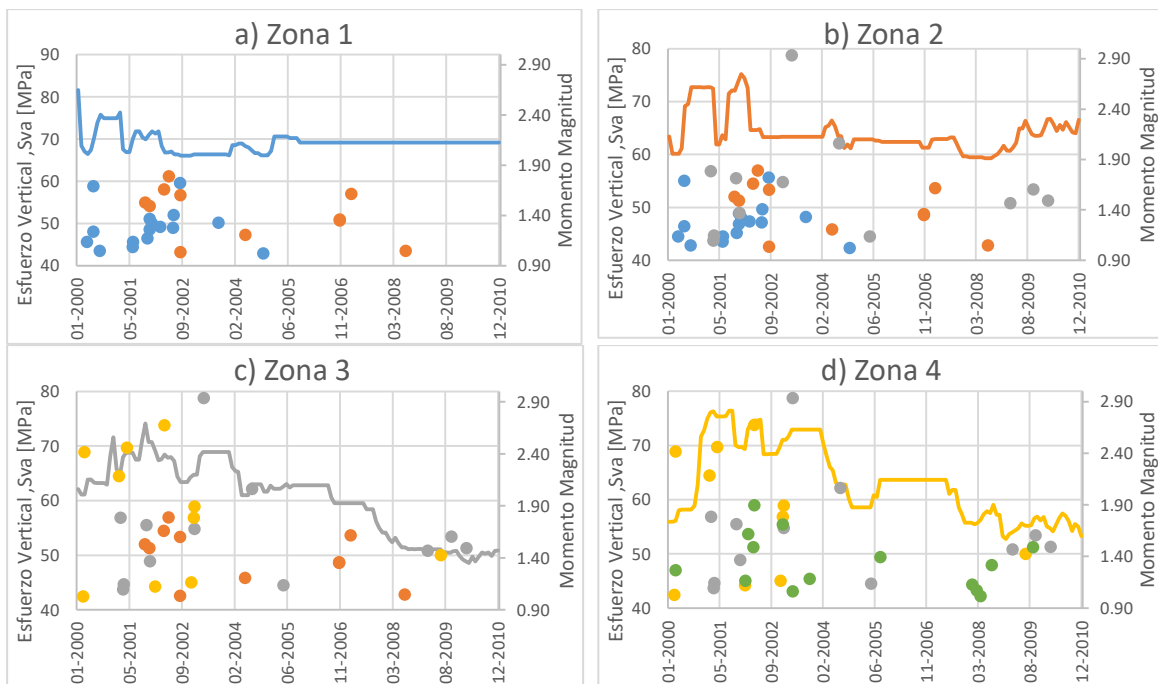
**Figura 73 Gráficos Ángulo de Extracción promedio en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.**

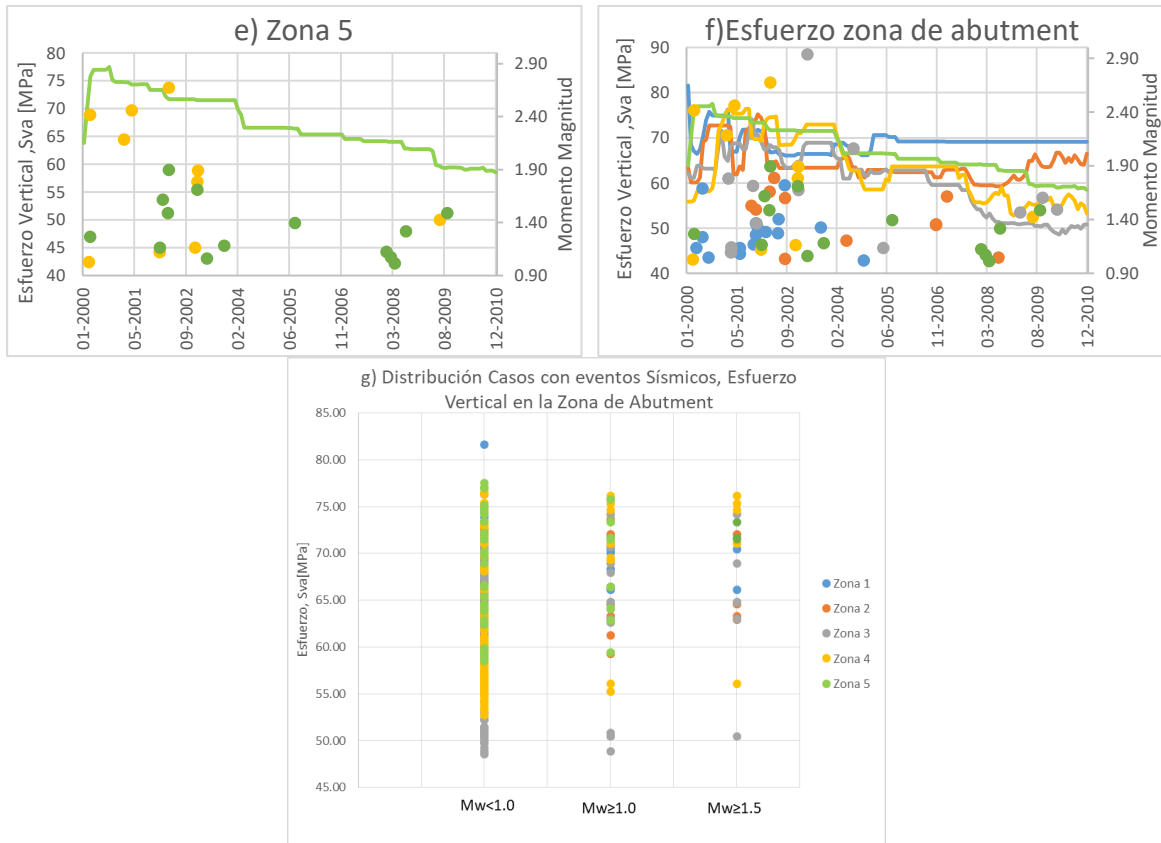
En la Figura 73 se aprecia que los eventos sísmicos relevantes se encuentran en general relacionados a bajos ángulos de extracción. Lo anterior resulta ser lo esperado debido a que un bajo ángulo implica que el punto se encuentra en quiebre por lo cual es esperable que se gatillen eventos sísmicos asociados al proceso de Caving. A pesar de esto existe un gran número de casos con bajos ángulos de extracción promedio pero sin eventos sísmicos relevantes.

Se debe notar para la zona 5 que el ángulo de extracción es 0 en los periodos que no se encuentran puntos de extracción activos en el área en quiebre.

### 6.1.7 ESFUERZO VERTICAL EN LA ZONA DE ABUTMENT

En la Figura 74 se presenta los gráficos para cada zona por separado, con los eventos sísmicos detallados en la Tabla 15. Se presenta el Esfuerzo Vertical en la zona de abutment,  $S_{va}$  (Ecuación 6), con los eventos sísmicos asociados a la zona respectiva y zonas adyacentes. En la Figura 43 (sección 4.3.5) se tiene la profundidad representativa para cada periodo y zona. Con la profundidad y la distancia entre los frentes de socavación y extracción,  $L_2$ , se obtuvo el esfuerzo vertical en la zona de abutment (sección 4.3.5).





**Figura 74 Gráficos Esfuerzo vertical en la zona de Abutment por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes**

De la Figura 74 se concluye:

- El esfuerzo sigue la tendencia observada en la Figura 43. Para las zonas 3, 4 y 5 se observa una disminución del esfuerzo vertical principalmente explicado por la variación de la profundidad, aunque no se debe olvidar el efecto que tiene el coeficiente de amplificación,  $C_{sv}$  de Karzulovic [14], en función de la losa (L2), como se observa en la Figura 44 .
- Se observa en el gráfico g) que los casos con eventos sísmicos relevantes tienen asociado un esfuerzo vertical alto, pero a su vez se tienen varios casos con esfuerzos altos pero sin eventos sísmicos.

### **6.1.8 OBSERVACIONES**

Luego de analizar cada una de las variables geo-mineras con los eventos sísmicos relevantes se observa que debido a que la base de datos se encuentra desbalanceada, es decir, solamente 7.8% de los casos presentan eventos de momento magnitud mayor a 1.0 y en función de los observado en los gráficos (especialmente gráficos g)) se complica encontrar un modelo de una sola variable que sea capaz de predecir los casos en función de la base de datos sin generar un número considerable de falsas alarmas.

Además, el desfase temporal que se genera con la respuesta del macizo rocoso a la actividad minera afecta los casos generados, al asociarle el evento sísmico a un periodo en el cual por ejemplo no se realiza socavación pero sí ocurrió una importante en el periodo anterior. En el estudio realizado por Potvin [35] se concluye que, para el sector RENO, una vez realizada la tronadura de pilares en el nivel de hundimiento cercano a las fallas G, F, C y N1 es probable que ocurran eventos sísmicos importantes. Además determinaron que el riesgo sísmicos decrece en aproximadamente 10 días luego de la tronadura y se disipa totalmente dentro de 50 días.

Con lo anterior en mente y a modo de disminuir el efecto del desbalance en la base de datos se analizarán uno a uno los eventos sísmicos relevantes a modo de buscar si existe relación con los datos del periodo anterior y/o zonas vecinas. Esto permitirá aumentar el número de casos con eventos significativos y mejorar el ajuste del modelo.

## **6.2 MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA**

Con la base de datos construida y explicada en el CAPITULO 4 se procede a plantear un modelo categórico de regresión logística.

Según lo observado en la sección 4.4, de los 660 casos solamente 52 casos presentan un evento sísmico con Mw mayor a 1.0, lo cual se traduce que solo un 7.8% de nuestros casos representaran la clase que se busca predecir. Al aumentar



el  $M_{wc}$  se llega que para un valor de 1.5 solamente un 3.2% de los casos representan la clase de interés. Debido a esto nos enfrentamos a una base de datos altamente desbalanceada, se buscaron técnicas para poder solucionar el problema que esto genera.

Se presentaran los siguientes escenarios.

- Escenario Base: se empleará la base de datos con los 52 casos con  $M_w^* > 1.0$ .
- Escenario con nuevos casos producto del análisis de cada evento sísmico.

Para realizar la Regresión Logística se utilizará el software SPSS Statistics [8]. En la Tabla 22 se presenta las variables tentativas a utilizar en el modelo inicial.

**Tabla 22 Variables tentativas a Utilizar en Modelo de Regresión**

Variables a utilizar	
Área socavada, Asoc	m <sup>2</sup>
Área incorporada, Ainc (Excluida)	m <sup>2</sup>
Velocidad Avance frente de extracción, Ainc/Bext	m/mes
Área en Quiebre, Aquiebre	m <sup>2</sup>
Área de Losa, Alosa	m <sup>2</sup>
Vext en Area en Quiebre	tpd/m <sup>2</sup>
Velocidad Maxima (Excluida)	tpd/m <sup>2</sup>
Angulo de extracción Promedio	°
Sva	MPa
P10	m <sup>-1</sup>
FH	1/0

Se presenta la tabla de correlación de estas variables. Larose [36] entrega ciertas reglas básicas para determinar de forma rápida si existen correlaciones entre diferentes variables.

Si el valor del coeficiente de correlación es:

- Mayor a 0.7, las variables están correlacionadas positivamente.
- Entre 0.33 y 0.7, las variables están medianamente correlacionadas positivamente.
- Entre -0.33 y 0.33, las variables no están correlacionadas.
- Entre -0.7 y -0.33, las variables están medianamente correlacionadas negativamente.
- Menor a -0.7, las variables están correlacionadas negativamente.

Con este criterio en mente de la Tabla 23 se obtiene lo siguiente:

- El área incorporada y la velocidad de avance del frente de extracción se encuentran correlacionadas positivamente. Debido a esto se decidió incluir en el modelo la velocidad de avance del frente de extracción.
- Además como es de esperar las variables de velocidad de extracción promedio en el área en quiebre y velocidad de extracción máxima se encuentran correlacionadas. Debido a esto se decidió excluir del modelo la velocidad de extracción máxima por punto de extracción en el área en quiebre.
- El resto de las variables no se encuentran correlacionadas o se encuentran relacionadas medianamente, por lo cual se incluirán de todas formas en el modelo.

**Tabla 23 Correlación de Variables.**

			Correlaciones									
			Asoc	Ainc	Ainc/Bext	Aquiebre	Alosa	Vext en Area en Quiebre	Velocidad Maxima	Angulo Promedio	Sva	P10
Rho de Spearman	Asoc	Coefficiente de correlación	1,000	,558**	,552**	,254**	-,039	,348**	,360**	,166**	-,171**	-,047
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000	,000	,318	,000	,000	,000	,000	,230
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Ainc	Coefficiente de correlación	,558**	1,000	,996**	,263**	-,134**	,346**	,387**	-,004	-,252**	,003
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000	,000	,001	,000	,000	,925	,000	,947
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Ainc/Bext	Coefficiente de correlación	,552**	,996**	1,000	,244**	-,130**	,337**	,376**	-,015	-,243**	,005
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.	,000	,001	,000	,000	,691	,000	,908
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Aquiebre	Coefficiente de correlación	,254**	,263**	,244**	1,000	-,359**	,355**	,521**	,302**	-,122**	,391**
		Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,002	,000
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Alosa	Coefficiente de correlación	-,039	-,134**	-,130**	-,359**	1,000	-,177**	-,259**	-,213**	,326**	-,553**
		Sig. (bilateral)	,318	,001	,001	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Vext en Area en Quiebre	Coefficiente de correlación	,348**	,346**	,337**	,355**	-,177**	1,000	,855**	,560**	-,260**	-,040
		Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000	,308
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Velocidad Maxima	Coefficiente de correlación	,360**	,387**	,376**	,521**	-,259**	,855**	1,000	,471**	-,194**	,150**
		Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Angulo Promedio	Coefficiente de correlación	,166**	-,004	-,015	,302**	-,213**	,560**	,471**	1,000	-,174**	,089*
		Sig. (bilateral)	,000	,925	,691	,000	,000	,000	,000	.	,000	,023
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	Sva	Coefficiente de correlación	-,171**	-,252**	-,243**	-,122**	,326**	-,260**	-,194**	-,174**	1,000	,346**
		Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,002	,000	,000	,000	,000	.	,000
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
	P10	Coefficiente de correlación	-,047	,003	,005	,391**	-,553**	-,040	,150**	,089*	,346**	1,000
		Sig. (bilateral)	,230	,947	,908	,000	,000	,308	,000	,023	,000	.
		N	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

### 6.2.1 ESCENARIO BASE

Este escenario consta de 660 casos de los cuales 52 presentan eventos sísmicos de momento magnitud mayor a 1.0 (ver Figura 52), esto quiere decir que un 7.8% de los casos corresponde a la clase que se busca predecir. A continuación, se presentan los resultados de cada paso en la elaboración del modelo. Se empleará el método de Backward Elimination, empleando un p-value crítico de 5-10% y la curva ROC para determinar el P\* óptimo para cada modelo. En las Tablas 24, 25 y 26 se presentan los resultados de los modelos.

Tabla 24 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 1, 2 y 3

Variables	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p
<b>Coef. intersección</b>	-5.0445	0.006	0.019	-5.0125	0.007	0.019	-4.7912	0.008	0.024
<b>A<sub>soc</sub></b>	0.0011	1.001	0.001	0.0011	1.001	0.001	0.0011	1.001	0.001
<b>A<sub>inc</sub>/B<sub>ext</sub> (m/mes)</b>	-0.1051	0.900	0.159	-0.1032	0.902	0.163	<b>-0.1011</b>	0.904	0.168
<b>A<sub>quiebre</sub></b>	0.0001	1.000	0.014	0.0001	1.000	0.012	0.0001	1.000	0.014
<b>A<sub>losa</sub></b>	-0.0001	1.000	0.596	-0.0001	1.000	<b>0.559</b>			
<b>V<sub>ext</sub> en Quiebre (tpd/m<sup>2</sup>)</b>	0.3455	1.413	<b>0.823</b>						
<b>a (°)</b>	-0.0197	0.981	0.215	-0.0177	0.982	0.174	-0.0173	0.983	0.184
<b>S<sub>va</sub> (MPa)</b>	0.0639	1.066	0.126	0.0648	1.067	0.118	0.0493	1.051	0.126
<b>P<sub>10</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>	-0.2801	0.756	0.220	-0.2937	0.745	0.182	-0.1907	0.826	0.149
<b>FH (1/0)</b>	-0.3484	0.706	0.430	-0.3479	0.706	0.431	-0.3427	0.710	<b>0.434</b>
<b>P*</b>		0.077			0.077			0.078	
<b>TPR</b>		0.654			0.654			0.615	
<b>FPR</b>		0.299			0.322			0.296	
<b>PSS</b>		0.355			0.331			0.319	
<b>ACC</b>		0.697			0.676			0.697	
<b>AUC</b>		0.715			0.716			0.712	

Tabla 25 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 4, 5 y 6

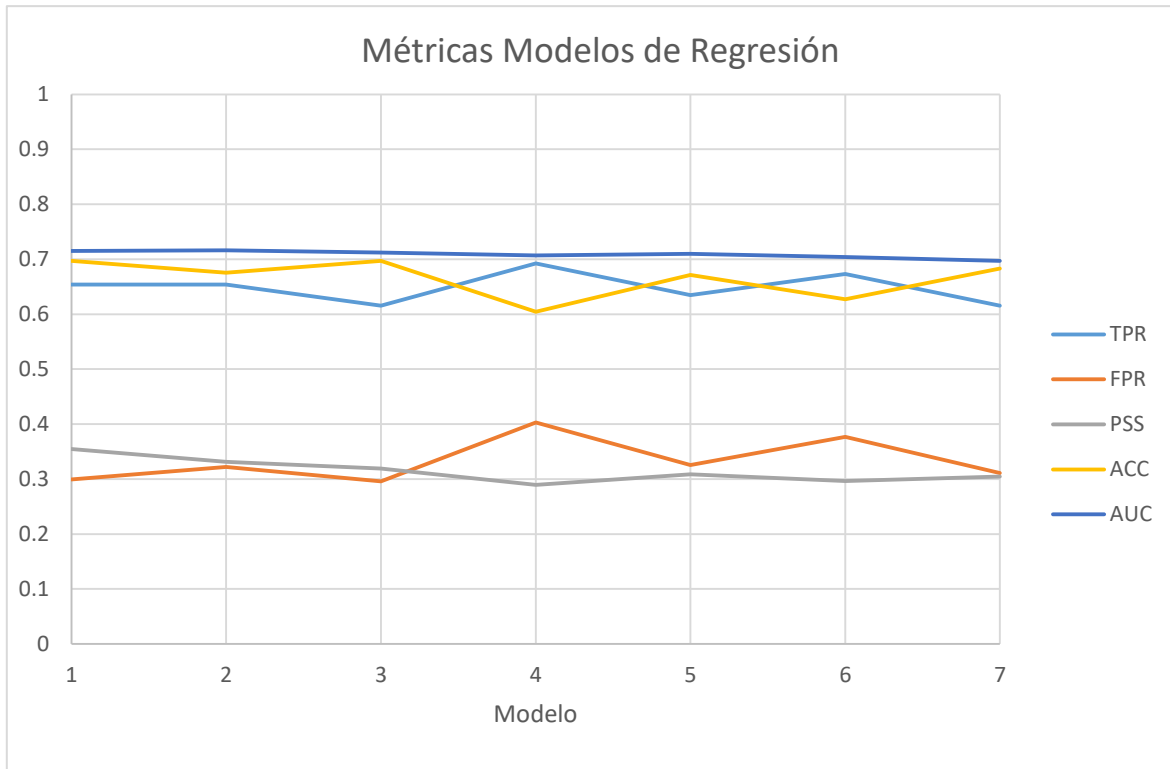
Variables	Modelo 4			Modelo 5			Modelo 6		
	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p
<b>Coef. intersección</b>	-5.4253	0.004	0.009	-5.7350	0.003	0.001	-6.3534	0.002	0.000
<b>A<sub>soc</sub></b>	0.0008	1.001	0.004	0.0011	1.001	0.002	0.0008	1.001	0.004
<b>A<sub>inc</sub>/B<sub>ext</sub> (m/mes)</b>				<b>-0.1021</b>	0.903	<b>0.170</b>			
<b>A<sub>quiebre</sub></b>	0.0001	1.000	0.021	0.0001	1.000	0.008	0.0001	1.000	0.012
<b>A<sub>losa</sub></b>									
<b>V<sub>ext</sub> en Quiebre (tpd/m<sup>2</sup>)</b>									
<b>Ang ext (°)</b>	-0.0147	0.985	0.248	-0.0191	0.981	0.140	-0.0165	0.984	<b>0.189</b>
<b>S<sub>va</sub> (MPa)</b>	0.0588	1.061	0.063	0.0637	1.066	0.018	0.0731	1.076	0.005
<b>P<sub>10</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>	-0.2056	0.814	0.118	-0.2081	0.812	0.110	-0.2235	0.800	0.083
<b>FH (1/0)</b>	-0.3359	0.715	0.445						
<b>P*</b>		0.068			0.075			0.070	
<b>TPR</b>		0.692			0.635			0.673	
<b>FPR</b>		0.403			0.326			0.377	
<b>PSS</b>		0.289			0.309			0.296	
<b>ACC</b>		0.605			0.671			0.627	
<b>AUC</b>		0.707			0.710			0.704	

Tabla 26 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 7

Variables	Modelo 7		
	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p
<b>Coef. intersección</b>	-6.8351	0.001	0.000
<b>A<sub>soc</sub></b>	0.0008	1.001	0.004
<b>A<sub>inc</sub>/B<sub>ext</sub> (m/mes)</b>			
<b>A<sub>quiebre</sub></b>	0.0001	1.000	0.016
<b>A<sub>losa</sub></b>			
<b>V<sub>ext</sub> en Quiebre (tpd/m<sup>2</sup>)</b>			
<b>Ang ext (°)</b>			
<b>S<sub>va</sub> (MPa)</b>	0.0764	1.079	0.002
<b>P<sub>10</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>	-0.2330	0.792	0.066
<b>FH (1/0)</b>			
<b>P*</b>		0.084	
<b>TPR</b>		0.615	
<b>FPR</b>		0.311	
<b>PSS</b>		0.305	
<b>ACC</b>		0.683	
<b>AUC</b>		0.697	

Se observa desde el primer modelo que la velocidad de incorporación de área presenta un coeficiente  $\beta$  negativo lo que se traduce en que un aumento de esta variable reduce la probabilidad de gatillar un evento sísmico, lo cual se sabe que no es lo que ocurre en la realidad. Con esto en mente se decide que el modelo final no debe incluir esta variable.

Según lo comentado en la sección 3.2.1 el desempeño del modelo se puede evaluar en función de distintas métricas de desempeño. En la Figura 75 se presentan para cada modelo las métricas obtenidas.



**Figura 75 Gráfico Indicadores de calidad de los Modelos de Regresión**

Se decide que el mejor modelo para este caso corresponde al modelo 6 (Tabla 25) ya que este presenta un alto TPR con un mayor ACC que el modelo 4, además el AUC (área bajo la curva ROC) se encuentra sobre 0.7 por lo cual se considera que es un ajuste significativo [29].

El resultado del modelo 6 se traducen en término de la probabilidad de gatillar un evento de momento magnitud mayor a 1.0, como:

$$P(M_w \geq 1.0) = \frac{\exp(-6.353 + 0.0008A_{soc} + 0.0001A_{quiebre} - 0.2235P_{10} - 0.0165Ang_{ext} + 0.0731S_{va})}{1 + \exp(-6.353 + 0.0008A_{soc} + 0.0001A_{quiebre} - 0.2235P_{10} - 0.0165Ang_{ext} + 0.0731S_{va})}$$

**Ecuación 7 Modelo de Regresión Logística, Escenario Base**

Si  $P(M_w \geq 1.0) > 0.07$  se asume que se gatilla un evento sísmico mayor a 1.0. En la Tabla 27 se observa la matriz de confusión para el modelo 6 utilizando un umbral de  $P^* = 0.07$ .

**Tabla 27 Matriz de Confusión, modelo 6, Escenario Base**

<b>Matriz de Confusión</b>				
Observado		Pronosticado		
		Mw>1.0		Porcentaje correcto
		0	1	
Mw>1.0	0	379	229	62.3
	1	17	35	67.3
Porcentaje global				62.7
El valor de corte es 0.070				

Al analizar cada una de las variables en el modelo se concluye lo siguientes:

- Variables que aumentan el peligro sísmico a medida que aumentan:
  - Esfuerzo vertical en la zona de abutment,  $S_{va}$  (MPa).
  - Área en Quiebre,  $A_{quiebre}$  (m<sup>2</sup>).
  - Área Socavada,  $A_{soc}$  (m<sup>2</sup>).
- Variables que disminuyen el peligro sísmico a medida que aumentan:
  - Frecuencia de vetillas blandas de espesor  $\geq 1$ mm,  $P_{10}$  (m<sup>-1</sup>).
  - Angulo de extracción promedio en área en Quiebre.

### **6.2.2 ESCENARIO CON NUEVOS CASOS**

Luego de analizar uno a uno los eventos sísmicos con Momento magnitud mayor a 1, se logra aumentar a 72 el número de casos con eventos sísmicos relevantes en el modelo. Con los nuevos casos se procederá a repetir el procedimiento anterior (Escenario Base) a modo de buscar el mejor ajuste. Los resultados del nuevo ajuste se presentan en las Tablas 28 y 29.



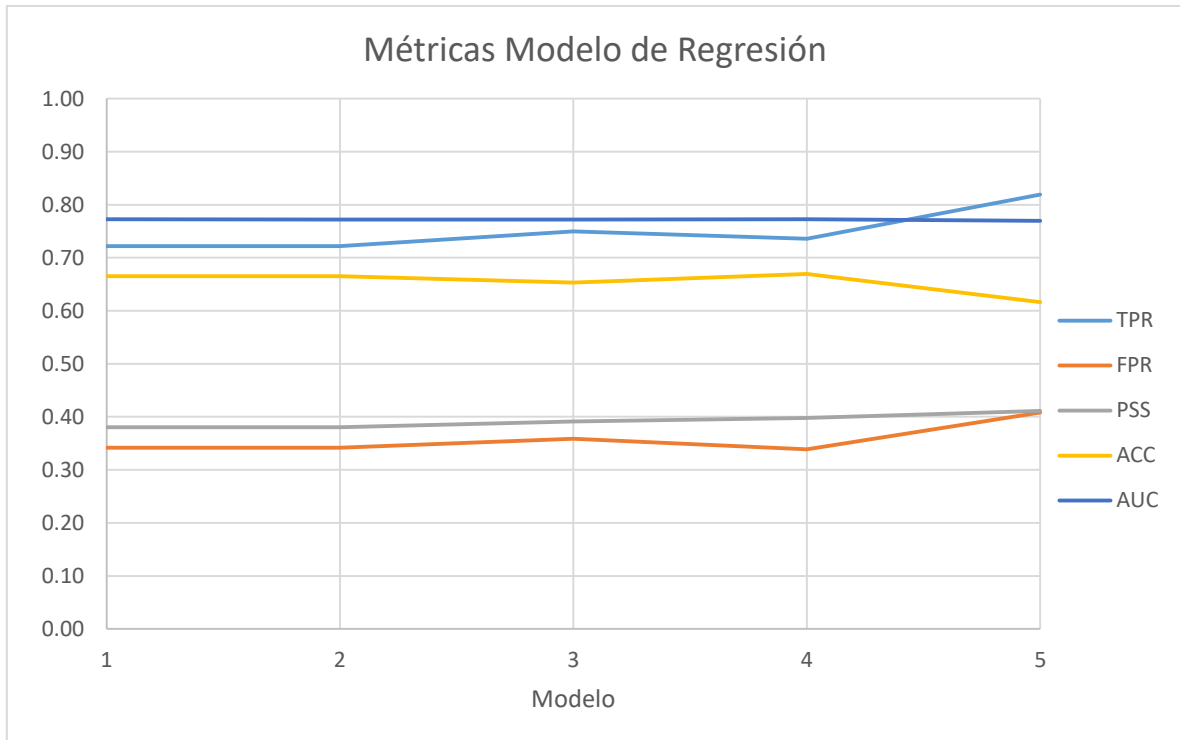
Tabla 28 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 1, 2 y 3

Variables	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p
<b>Coef. intersección</b>	-5.6115	0.004	0.004	-5.5198	0.004	0.004	-5.6488	0.004	0.003
<b>A<sub>soc</sub></b>	0.0016	1.002	0.000	0.0016	1.002	0.000	0.0016	1.002	0.000
<b>A<sub>inc</sub>/B<sub>ext</sub> (m/mes)</b>	-0.0158	0.984	0.716	<b>-0.0158</b>	0.984	<b>0.717</b>			
<b>A<sub>quiebre</sub></b>	0.0001	1.000	0.006	0.0001	1.000	0.006	0.0001	1.000	0.006
<b>A<sub>losa</sub></b>	-0.00003	1.000	<b>0.813</b>						
<b>V<sub>ext en Quiebre</sub> (tpd/m<sup>2</sup>)</b>	0.4413	1.555	0.759	0.5048	1.657	0.719	0.4296	1.537	<b>0.758</b>
<b>Ang ext (°)</b>	-0.0262	0.974	0.077	-0.0265	0.974	0.074	-0.0254	0.975	0.079
<b>S<sub>va</sub> (MPa)</b>	0.0668	1.069	0.081	0.0610	1.063	0.037	0.0629	1.065	0.029
<b>P<sub>10</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>	-0.1954	0.822	0.333	-0.1573	0.854	0.194	-0.1623	0.850	0.177
<b>FH (1/0)</b>	-0.5006	0.606	0.215	-0.5032	0.605	0.211	-0.4985	0.607	0.216
<b>P*</b>		0.090			0.090			0.087	
<b>TPR</b>		0.722			0.722			0.750	
<b>FPR</b>		0.342			0.342			0.359	
<b>PSS</b>		0.380			0.380			0.391	
<b>ACC</b>		0.665			0.665			0.653	
<b>AUC</b>		0.773			0.772			0.772	

Tabla 29 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 4 y 5.

Variables	Modelo 4			Modelo 5		
	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p	$\beta_k$	$\exp(\beta_k)$	valor-p
<b>Coef. intersección</b>	-5.5733	0.004	0.003	-6.8925	0.001	0.000
$A_{soc}$	0.0016	1.002	0.000	0.0016	1.002	0.000
$A_{inc}/B_{ext}$ (m/mes)						
$A_{quiebre}$	0.0001	1.000	0.005	0.0001	1.000	0.002
$A_{losa}$						
$V_{ext}$ en Quiebre (tpd/m <sup>2</sup> )						
Ang ext (°)	-0.0231	0.977	0.059	-0.0263	0.974	0.029
$S_{va}$ (MPa)	0.0623	1.064	0.030	0.0829	1.086	0.001
$P_{10}$ (m <sup>-1</sup> )	-0.1686	0.845	0.154	-0.1947	0.823	0.093
<b>FH (1/0)</b>	-0.4938	0.610	<b>0.219</b>			
<b><math>P^*</math></b>		0.090			0.078	
<b>TPR</b>		0.736			0.819	
<b>FPR</b>		0.338			0.408	
<b>PSS</b>		0.398			0.411	
<b>ACC</b>		0.670			0.617	
<b>AUC</b>		0.773			0.770	

Según lo comentado en la sección 3.2.1 el desempeño del modelo se puede evaluar en función de distintas métricas de desempeño. En la Figura 76 se presentan para cada modelo las métricas obtenidas.



**Figura 76 Grafico métricas de los Modelos de Regresión Logística, Nuevo Escenario.**

El modelo seleccionado es el 4 debido a que este incluye el FH, el cual, disminuye considerablemente el peligro sísmico (una de las principales razones por la cual se utiliza) y posee una mejor exactitud que el modelo 5. A pesar que el modelo 5 es el que obtiene la mayor TPR, este aumenta considerablemente el número de falsas alarmas.

Al comparar los resultados del nuevo escenario con el escenario base lo primero que se nota es que existe un aumento considerable en la calidad del ajuste (expresado como AUC) de un 0.70 a 0.77. Además se logra aumentar de un TPR de 0.67 a 0.74. Estos aumentos en las métricas del modelo implican que se logró mejorar el ajuste al analizar en detalle cada evento sísmico y considerar el tiempo de respuesta del macizo rocoso a la actividad minera.

El resultado del modelo 4 se traduce en términos de la probabilidad de gatillar un evento de momento magnitud mayor a 1.0, como:

$$P(M_w \geq 1.0) = \frac{\exp(-5.573 + 0.0016A_{soc} + 0.0001A_{quiebre} - 0.1686P_{10} - 0.0231Ang_{ext} + 0.0623S_{va} - 0.4938FH)}{1 + \exp(-5.573 + 0.0016A_{soc} + 0.0001A_{quiebre} - 0.1686P_{10} - 0.0231Ang_{ext} + 0.0623S_{va} - 0.4938FH)}$$

**Ecuación 8 Modelo de Regresión Logística, Nuevo Escenario**

Si  $P(M_w \geq 1.0) > 0.09$  se asume que se gatilla un evento sísmico mayor a 1.0. En la Tabla 30 se observa la matriz de confusión para el modelo 4 utilizando un umbral de  $P^* = 0.09$ .

**Tabla 30 Matriz de Confusión, Modelo 4, Nuevo Escenario**

<b>Matriz de Confusión</b>				
Observado		Pronosticado		
		Mw>1.0		Porcentaje correcto
		0	1	
Mw>1.0	0	389	199	66.2
	1	19	53	73.6
Porcentaje global				67.0
El valor de corte es 0.09				

Al analizar cada una de las variables en el modelo se concluye lo siguientes:

- Variables que aumentan el peligro sísmico a medida que aumentan:
  - Esfuerzo vertical en la zona de abutment,  $S_{va}$  (MPa).
  - Área en Quiebre,  $A_{quiebre}$  (m<sup>2</sup>).
  - Área Socavada,  $A_{soc}$  (m<sup>2</sup>).
- Variables que disminuyen el peligro sísmico a medida que aumentan:
  - Fracturamiento Hidráulico, FH.
  - Frecuencia de vetillas blandas de espesor  $\geq 1$ mm,  $P_{10}$  (m<sup>-1</sup>).
  - Angulo de extracción promedio en área en Quiebre,  $Ang_{ext}$ .

Un mayor ángulo de extracción se podría interpretar como la cercanía a alcanzar el régimen de los puntos de extracción, por lo cual es esperable que disminuya el peligro sísmico.

Los signos de los coeficientes del modelo representan adecuada lo que se espera en la realidad. Con esto en mente se considera que el modelo obtenido es adecuado para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos relevantes, se debe notar que el modelo se encuentra limitado a la base de datos generada por lo cual no debe ser utilizado en otro sector.

### **6.3 ÍNDICE AMBIENTAL**

El índice ambiental corresponde a un método de clasificación que en función de los parámetros definidos en la sección 3.1 y busca zonificar la estimación del peligro sísmico. Estos parámetros deben ser calibrados a modo de que se logre correlacionar de forma directa las zonas con mayor concentración de eventos sísmicos relevantes con un mayor índice.

Empleando la curva de Gutenberg-Richter se evaluará la correlación entre la sismicidad inducida y el Índice ambiental.

#### **6.3.1 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE MOMENTO MAGNITUD**

Para analizar la distribución de momento magnitud de la sismicidad inducida se establecieron cuatro casos. En cada uno de estos se obtienen los eventos sísmicos que se encuentren en un volumen de control determinado. Los casos son desde la cota  $2100 \pm 25$ , 50, 75 y 100 metros. La Figura 77 presenta los resultados.

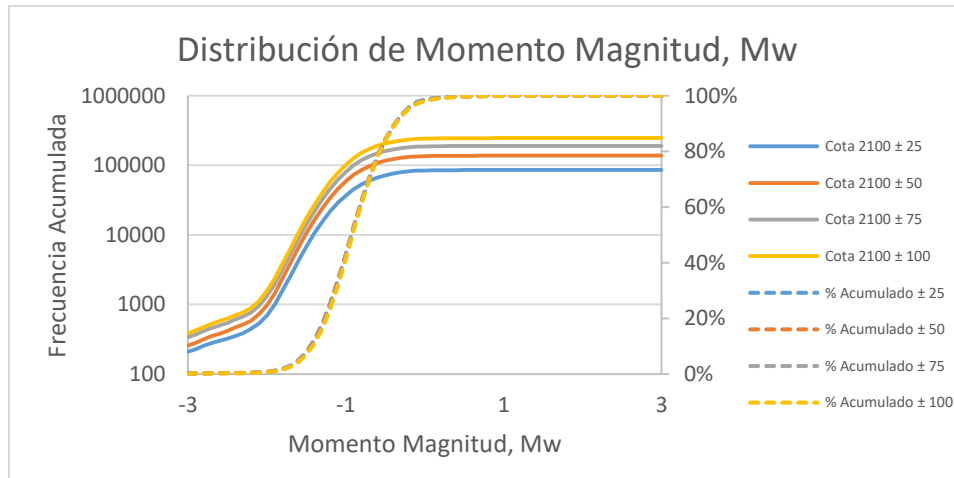


Figura 77 Distribución de Momento magnitud, Casos cota 2100 ± 25, 50, 75, 100.

Se aprecia de estos resultados que, al aumentar el volumen de aislación, aumentan el número de eventos sísmicos pero la distribución de estos no sufre mayores cambios.

### 6.3.2 RESULTADOS MODELO, CASO BASE

Como caso base de análisis se emplearán los parámetros presentados por Espinoza et al [37], presentados en la Tabla 31. Dichos autores realizaron el ajuste para evaluar la constructibilidad de túneles en distintas condiciones geomecánicas. Luego de analizar los resultados obtenidos en el caso base, se realiza un ajuste local de los parámetros a modo de buscar una mejor representación y ajuste en función de la base de datos para el sector RENO.

Tabla 31 Parámetros y Ponderadores Índice Ambiental [37]

Parámetro	Condición de Esfuerzos				Geotecnia		Geología	
Indicador	Anisotropía ( $\sigma_1/\sigma_3$ )		Esfuerzo principal mayor, $\sigma_1$ (MPa)		$U_i$ (Pa)		Falla/Contacto	
Clasificación	>2.8	1	>68.5	1	>0.25	1	Falla	1
	2.0 a 2.8	0.5	50 a 68.5	0.7	0.15 a 0.25	0.7	Falla/Contacto	0.3
	<=2.0	0.1	35 a 50	0.5	<=0.15	0.1	Contacto	0.1
			<=35	0.1			N/A	0
Ponderador $\beta_j$	0.31		0.69		-		-	
Ponderador $\alpha_i$	0.59				0.36		0.05	

Con estos parámetros se obtienen los siguientes resultados (detalle base de datos en sección 4.6).

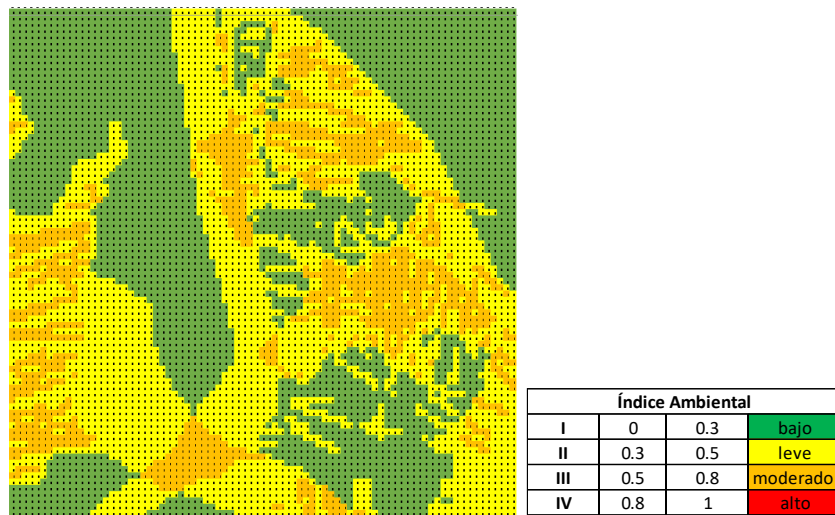


Figura 78 Mapa Índice Ambiental

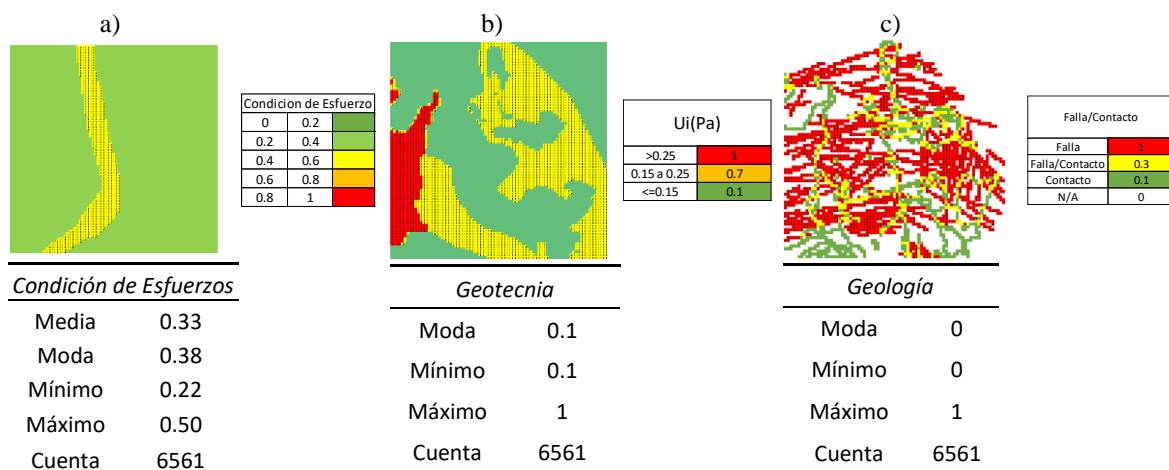
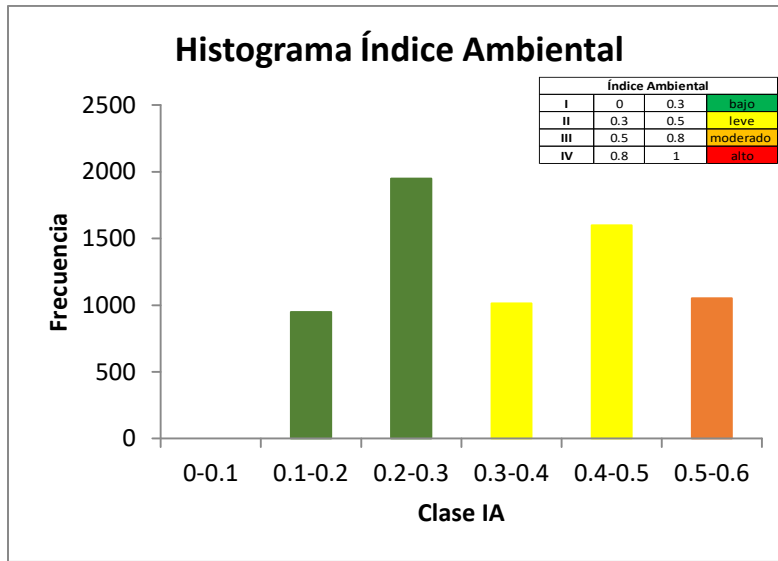


Figura 79 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Base

En la Figura 78 se muestra los resultados obtenidos para el índice ambiental empleando los valores de la Tabla 31. En la Figura 79 se muestra el desglose de cada uno de los parámetros, empleando los ponderadores correspondientes.

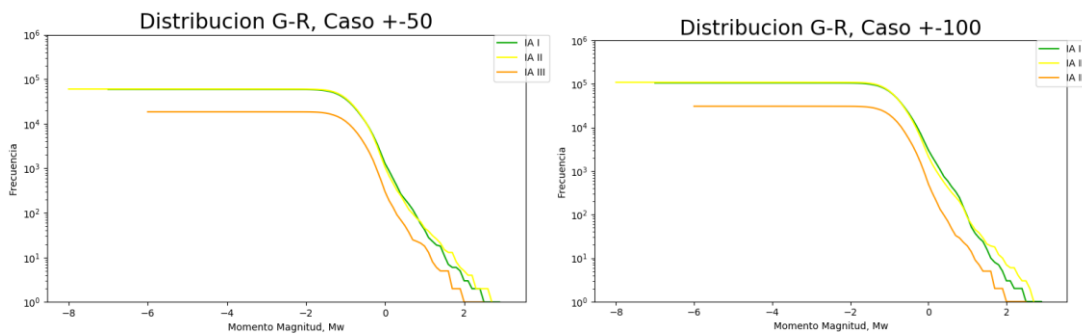


**Figura 80 Histograma Índice Ambiental, caso base**

En la Figura 80 se presenta el histograma con los resultados del Índice Ambiental. La clase I representa un 44% y la clase II un 40% de las celdas.

En la Figura 81 se muestra el ajuste Gutenberg-Richter para los casos  $\pm 100$  y 50 metros. Se observa que las distintas clases de IA no se ordenan según lo esperado.

La curva de clase III debiese contener la mayor cantidad de eventos importantes, pero esto no es lo que ocurre con este modelo. Por otro lado la clase I y II se ordenan según lo esperado pero sin tener una marcada diferencia como se desearía.



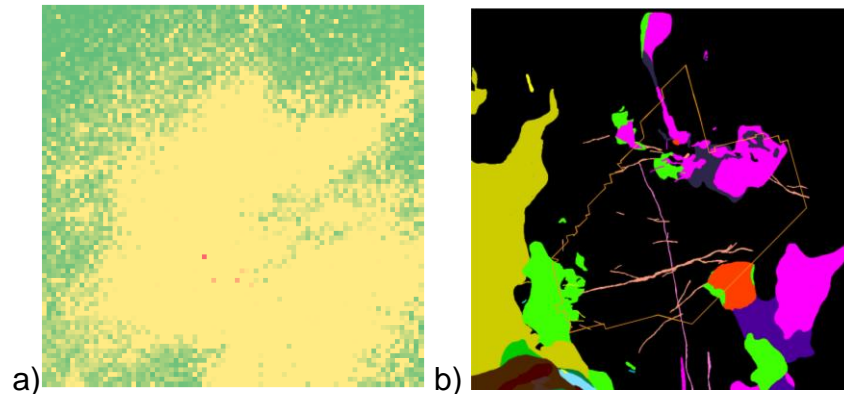
**Figura 81 Curvas Gutenberg-Richter, Índice Ambiental Base**

Se debe notar que este índice no considera el proceso minero, por lo cual se genera un sesgo ya que la sismicidad inducida se encuentra fuertemente relacionada a la actividad minera. En la Figura 82 se presenta la sumatoria de momento sísmico



para cada celda para el caso  $\pm 100$  metros, junto al frente de socavación de Diciembre 2010, sector RENO. Se observa que existe una relación con la concentración de eventos sísmicos y la forma del frente minero. Además en la zona inferior derecha se nota influencia del sector Esmeralda.

Debido a que se desea que el indicador sea pre-minería no se incluirán variables mineras asociadas al proceso minero.



**Figura 82 a) Mapa Sumatoria de Momento caso  $\pm 100$ , b) Frente de Socavación Diciembre 2010.**

El modelo no resulta ser representativo del sector de interés, esto se debe a las siguientes razones:

- Esfuerzo principal mayor varia de 28.6 a 47.7 MPa, al comparar este rango con el utilizado en la Tabla 31, este no representa adecuadamente al sector.
- El modelo base le otorga un 5% de relevancia a la presencia de fallas y/o contactos litológicos. Del estudio de Potvin [35] se concluye que la sismicidad en el sector RENO se encuentra principalmente asociada a las fallas G, F, C y N1. Por lo anterior se incluirá en el modelo si estas fallas se encuentran presentes en las celdas. En la sección 6.3.3 se presentan los resultados del modelo local.

A continuación y con lo anterior en mente se buscará un ajuste que permita mejorar el desempeño del indicador para el caso particular del sector RENO.

### 6.3.3 RESULTADO MODELO, AJUSTE LOCAL

Se incluye en el modelo un nuevo parámetro en función si se encuentran presentes una de las fallas principales presentadas en la Figura 83. Esta nueva variable solamente considerará las fallas N1, G, F y C en función de las conclusiones del estudio realizado por Potvin [35]. Debido a la importancia de estas fallas se asigna el valor 1 a las celdas que contienen las fallas o son contiguas a las anteriores, como se observa en la Figura 84.

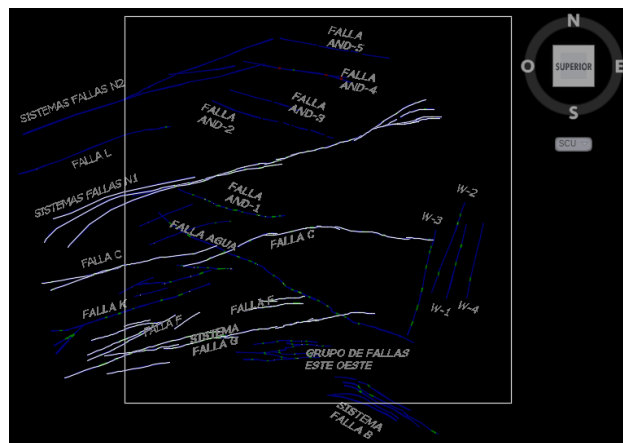


Figura 83 Sistema de Falla N1, G, F y C.

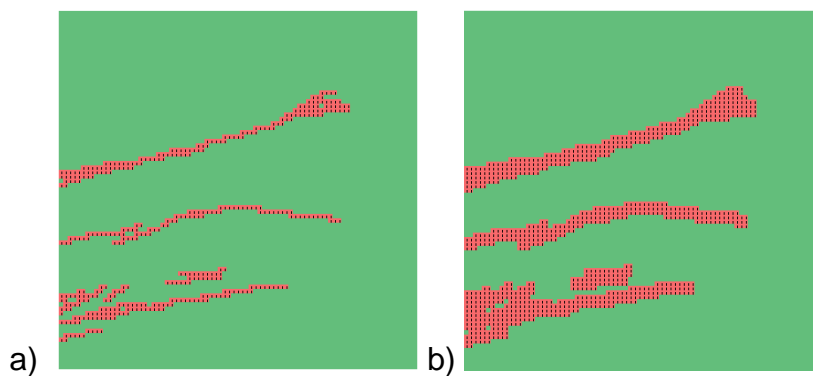


Figura 84 Mapa Parámetro presencia de Fallas Principales

Considerando el nuevo parámetro se propone el modelo presentado en la Tabla 32.

Tabla 32 Parámetros Índice Ambiental, Ajuste Local

Parámetro	Condición de Esfuerzos				Geotecnia		Geología			
Indicador	Anisotropía ( $\sigma_1/\sigma_3$ )		Esfuerzo principal mayor, $\sigma_1$ (MPa)		$U_i$ (Pa)		Falla/Contacto		Fallas Principales (N1, G, F y C)	
Clasificación	>2.8	1	>50	1	>0.25	1	Falla	1	Falla Principal	1
	2.0 a 2.8	0.5	40 a 50	0.7	0.15 a 0.25	0.7	Falla/Contacto	0.3	N/A	0
	<=2.0	0.1	30 a 40	0.5	<=0.15	0.1	Contacto	0.1		
			<=30	0.1			N/A	0		
Ponderador $\beta_j$	0.4		0.6		-		0.2		0.8	
Ponderador $\alpha_i$	0.45				0.3		0.25			

Se decide conservar los rangos empleados por Espinoza et al [37] para la anisotropía, geotecnia y geología (Falla/Contacto). Los rangos para el indicador del esfuerzo principal mayor se ajustan a la base de datos del sector (Tabla 20).

Con los ponderadores de la Tabla 32 se obtiene el mapa de la Figura 85. Además en la Figura 86 se presenta el desglose cada parámetro

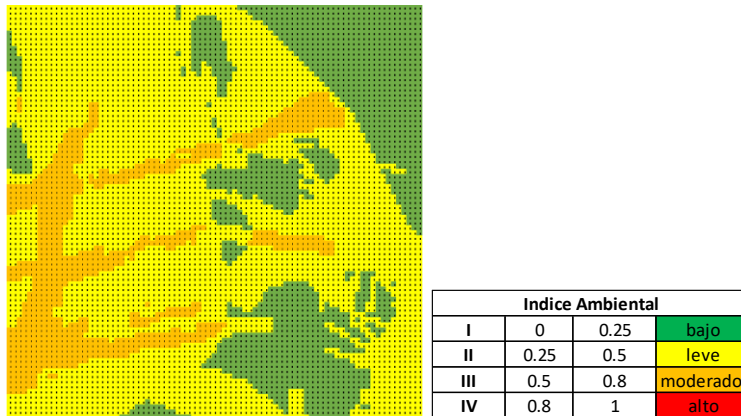
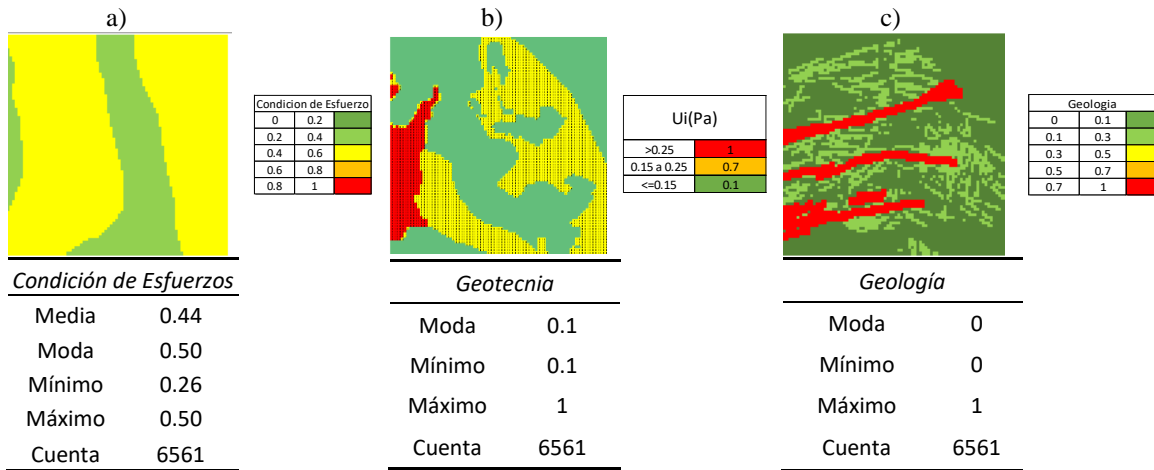
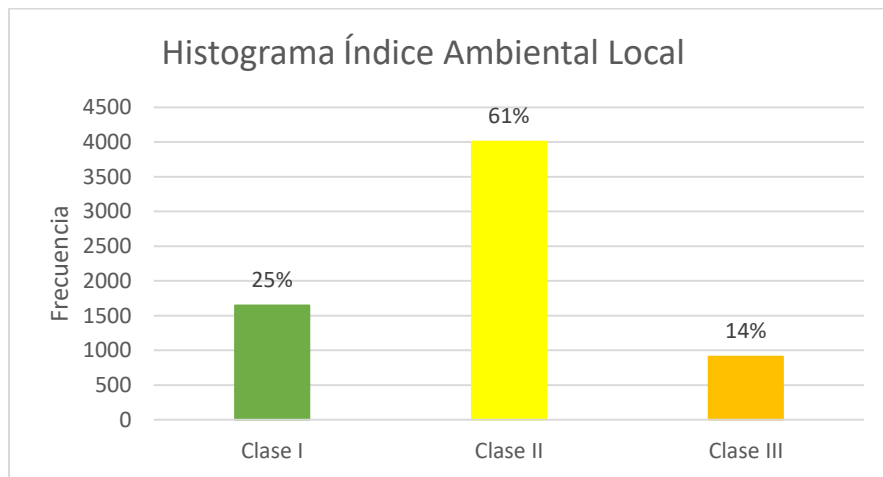


Figura 85 Mapa Índice ambiental local



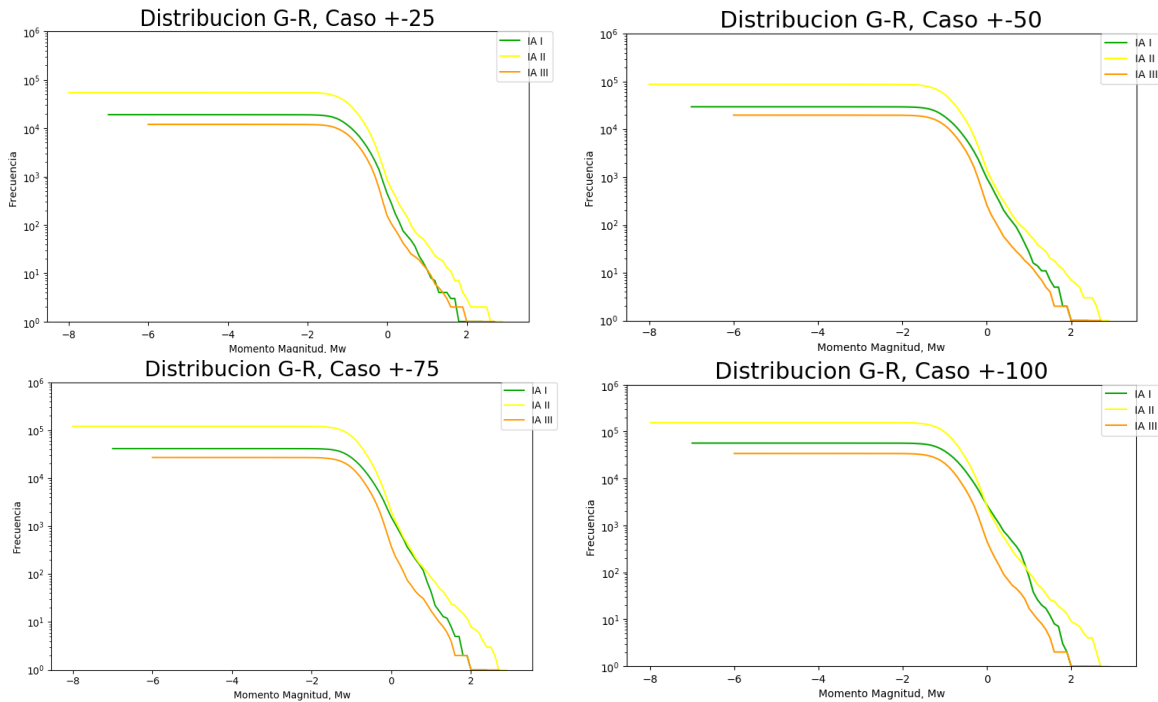
**Figura 86 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Local**

En la Figura 87 se presenta el histograma del índice ambiental local, en este se observa que la clase predominante es la II con un 61% de las celdas, seguida de la clase I con un 25% y la clase III con un 14%. Se debe notar que la clase III se encuentra fuertemente ligada al sistema de fallas principales y al sector Dacita.



**Figura 87 Histograma Índice ambiental local**

Se realiza la distribución de Gutenberg-Richter para los casos  $\pm 25$ , 50, 75 y 100 metros, obteniendo los resultados presentados en la Figura 88.



**Figura 88 Curvas Gutenberg-Richter casos +- 25, 50, 75 y 100 m. Índice ambiental**

Al observar las curvas en la Figura 88 se nota que se obtiene una clara distinción entre la clase I y II. La clase II concentra el 61% de las celdas, por lo cual es esperable que esta concentre un mayor número de eventos sísmicos, además esta clase contiene los eventos sísmicos de mayor momento magnitud.

La clase III al ser solamente un 14% de las celdas ocurre lo esperado con respecto a la cantidad de eventos sísmicos, pero a su vez ésta no concentra los eventos de mayor momento magnitud como se desearía. Esto se debe a que, como fue explicado con la Figura 82, los eventos sísmicos se encuentran relacionados a la actividad minera la cual en el periodo de estudio del 2000-2010 aún no alcanza la zona de mayor sismicidad (sector dacita).

Además se debe notar que debido a los alcances del trabajo, tanto para el modelo base como el local se utilizó la geología, geotecnia y fallas para la cota 2100 por lo cual al asociar eventos sísmicos en cotas diferentes a la misma celda se incurre en un error considerable, en la sección de recomendaciones se propone cómo solucionar este error y mejorar el modelo.

## **CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A continuación se presentan las conclusiones de cada una de las etapas realizadas en el presente trabajo, además se entregan recomendaciones para futuros trabajos. Estas estarán centradas en la metodología, proceso de obtención de resultados.

El capítulo se estructurará en los siguientes tópicos:

- Generación y obtención de Base de datos:
  - Automatización del proceso de generación y filtrado de datos.
  - Base de datos obtenida.
- Análisis eventos sísmicos.
- Elaboración y calibración de modelos:
  - Modelo de Regresión Logística.
  - Índice Ambiental.
- Conclusiones del trabajo.

### **7.1 GENERACIÓN Y OBTENCIÓN DE BASE DE DATOS**

Es fundamental ser capaz de construir una base de datos robusta en función de los input en cualquier proceso de análisis. En el presente trabajo esto fue uno de los principales desafíos que se debieron superar, con respecto al input utilizado y el resultado esperado.

Para solucionar este desafío se debió construir herramientas computacionales que pudieran procesar la información entregada de manera estandarizada.

#### **7.1.1 AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN Y FILTRADO DE DATOS**

La automatización del proceso de generación y filtrado de datos permitió que en cada iteración a realizar el proceso fuera expedito y confiable, disminuyendo la probabilidad de incurrir en errores.

Las herramientas utilizadas para este proceso fueron Python y VBA en Excel. Se programaron planillas que fueran capaces de procesar la información generada en Python y entregar los resultados deseados en el formato necesario, incluyendo los mapas del índice ambiental. La sinergia producida entre las herramientas utilizadas permitió ser capaz de obtener nuevos resultados de forma rápida al realizarse modificaciones en el input (variaciones en los frentes mineros).

Debido a lo anterior en caso de ser necesario, la metodología y herramientas desarrolladas son utilizables en otra operación minera sin grandes modificaciones, disminuyendo considerablemente el tiempo necesario para replicar el trabajo presentado.

### **7.1.2 BASE DE DATOS OBTENIDA**

La base de datos obtenida se encuentra condicionada por:

- Periodo de estudio, 2000 al 2010.
- Sector de interés, sector RENO, El Teniente.
- Variables obtenidas en función de zonas fijas.
- Análisis mensual de las variables.
- Unidades litológicas, geotécnicas y fallas geológicas para la cota 2120. No se consideró dentro de los alcances del trabajo ver cómo estas varían a diferentes cotas (modelo tridimensional).

Con respecto al último punto se propone para futuros trabajos incluir las variaciones de las unidades litológicas, geotécnicas y fallas geológicas. Además incluir la opción de cambiar la dirección de las zonas de estudio para cada año.

## **7.2 ANÁLISIS EVENTOS SÍSMICOS**

El estudio de la sismicidad inducida en minería subterránea ha sido abordado por renombrados investigadores, siendo aún un tema complejo de analizar.

En el presente estudio se analizaron los eventos sísmicos relevantes en función de las variables mineras, pero debido a los alcances del trabajo solamente se consideró la información geológica para una cota determinada. Mediante la implementación de modelos tridimensionales de las estructuras geológicas y modelamiento numérico sería posible mejorar el análisis de los eventos sísmicos.

Se propone que es necesario analizar en detalle los eventos sísmicos para determinar si se incluyen o no en el modelo final. Esto es para lograr diferenciar los diferentes mecanismos asociados a la sismicidad inducida.

### **7.3 ELABORACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS**

A continuación se comentará sobre cada modelo empleado y se propondrán formas de mejorar los resultados.

#### **7.3.1 MODELO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA**

En función de los alcances definidos en el trabajo se utilizó solamente el modelo categórico de regresión logística, el cual es ampliamente utilizado en problemáticas similares (J. Vallejos 2013 [38], I. Navia 2014 [39], V. Ortega 2015 [40]).

Este modelo demuestra ser adecuado (no necesariamente el mejor) para la problemática propuesta, obteniendo resultados aceptables en función de la base de datos generada.

En función de los escenarios analizados en la sección 6.2 se demuestra la importancia que tiene realizar el análisis de los casos de interés, logrando mejorar la calidad del modelo de forma significativa.

A pesar de lo anterior la forma de seleccionar el modelo óptimo será en función del objetivo final de este. En este trabajo se buscó maximizar la tasa de acierto (TPR) pero a costo de generar un número mayor de falsas alarmas (Tabla 30). Además, al observar la relación que existe entre las distintas variables y los casos con eventos sísmicos relevantes en la sección 6.1 se nota que, debido a la variabilidad



de los procesos, no se detecta para ninguna variable una correlación significativa con los eventos sísmicos.

Además se debe notar que el periodo analizado (2000-2010) fue un periodo irregular con respecto a la variante del método de explotación utilizado, incluyendo una detención en el avance del frente a mediados del 2005 hasta fines del 2006. A partir del 2007 se nota una regularización del avance de los frentes y extracción. Se propone para un futuro trabajo evaluar la metodología propuesta en otros sectores productivos y en periodos sin cambios significativos en la variante del método de explotación.

### **7.3.2 ÍNDICE AMBIENTAL**

El índice ambiental obtenido resultó ser un indicador adecuado que permite zonificar sectores en función de parámetros geotécnicos ambientales.

A pesar de lograr un resultado adecuado con respecto a la categorización de las distintas clases se nota que la metodología planteada puede ser mejorada. Debido a que no se considera las variaciones a distintas cotas de las unidades litológicas y fallas estructurales, lo cual generó que eventos sísmicos asociados a fallas geológicas en distintas cotas no fueran considerados correctamente. Se concluye que no es óptimo realizar un análisis para una cota en específico. Por lo cual se propone lo siguiente:

- Construir un índice ambiental tridimensional en forma de un modelo de bloques.

Este nuevo índice se podría incluir en el proceso de planificación y diseño minero a modo de detectar zonas de mayor riesgo y tomar las medidas pertinentes.

## **7.4 CONCLUSIONES DEL TRABAJO**

Se cumplen los objetivos propuestos al inicio del trabajo, logrando desarrollar una metodología que permite evaluar el peligro sísmico en función de variables geomineras utilizando herramientas estadísticas.

La definición del criterio de calibración de los modelos construidos dependerá de la finalidad que se busque de este.

La metodología propuesta resuelve la problemática inicial permitiendo generar una base de datos robusta con un modelo que es capaz de predecir de forma aceptable la ocurrencia de eventos sísmicos relevantes.

Se propone para futuros trabajos incluir en los modelos estadísticos las unidades litológicas, zonas geotécnicas, fallas estructurales y modelamiento numérico en tres dimensiones, esto facilitará y mejorará el análisis e interpretación de la sismicidad inducida, lo cual se considera un paso fundamental en la elaboración de un modelo más robusto y confiable. Además se propone replicar el trabajo realizado en otros sectores productivos a modo de validar la metodología y aprovechar las herramientas desarrolladas.

## CAPITULO 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Larsson (2004), "Seismicity in Mines", Lulea University of Technology, Technical Report.
- [2] J.A. Vallejos & S.D. McKinnon, (2011). Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48, 616-625.
- [3] O.A. Araneda & R.F Morales (2007), Rock Preconditioning application in virgin caving condition in a panel caving mina, CODELCO Chile El Teniente Division, DeepMining 2007.
- [4] Python Core Team (2015). Python: A dynamic, open source programming language. Python Software Foundation. URL <https://www.python.org/>.
- [5] Stéfan van der Walt, S. Chris Colbert and Gaël Varoquaux (2011). The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation, Computing in Science & Engineering, 13, 22-30.
- [6] John D. Hunter. (2007) Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, 9, 90-95.
- [7] Wes McKinney (2010) Data Structures for Statistical Computing in Python, Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 51-56.
- [8] IBM Corp. Released 2017. IBM SPSS Statistics for Windows.
- [9] SME- Society for Mining, Metallurgy & Exploration (2011), SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed.
- [10] H. L. Hartman y J. M. Mutmansky (2002), Introductory Mining Engineering, 2nd Edition.
- [11] E. T. Brown (2002), Block Caving Geomechanics, Chapter 5. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland.
- [12] P. Cavieres, (1999) "Evolución de los Métodos de Explotación en la Mina El Teniente".

- [13] O. Araneda & A. Sougarret (2007), Lessons Learned in cave Mining: El Teniente 1997-2007. 1st International Symposium on Block and Sub-level Caving.
- [14] A. Karzulovic, (2005). Efecto de la geometría de socavación en los pilares del UCL, sector Esmeralda. Estudio DT-CG-05-01, Codelco, Mina El Teniente.
- [15] N. Jamett & R.Q. Alegría (2014), New Growth strategy in Esmeralda Mine. Caving 2014, 3rd International symposium on block and sublevel Caving.
- [16] J. Cornejo, P. Landeros (2011). Aplicación de criterio sísmico para estimación de interferencia operacional asociada a tronadura. Minas Diablo Regimiento y Reservas Norte. Superintendencia de Geomecánica. SGM-I-034/2011.
- [17] M. Skewes, (2003). The El Teniente Megabreccia Deposit, The world's Largest Copper Deposit. Department of Geological Sciences, University of Colorado, U.S.A. and Superintendencia Geología, El Teniente, Codelco, Rancagua, Chile, p. 2-31.
- [18] J. Seguel, (2013). Caracterización Cuantitativa de Fallas Geológicas Principales en Mina El Teniente. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología y Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, p. 3-28.
- [19] M. Hudyma, (2004). Mining-Induced Seismicity in Underground, Mechanised, Hardrock Mines. Results of a World Wide Survey. Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia, Nedlands WA, p. 11-50.
- [20] R. Dunlop & S. Gaete, (1999). Sísmicidad Inducida y Estallidos de Roca en Mina El Teniente. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia General Planificación Mina.
- [21] M. Hudyma (2003) Seismic Monitoring in Mines-Old Technology-New Applications.

- [22] J. Cornejo (2013), Identificación de zonas de peligro mediante análisis de agrupamiento de eventos sísmicos, mina El Teniente. Tesis magister en Minería, Universidad de Chile.
- [23] Shearer (2009), "Introduction to Seismology (2nd Ed)". Cambridge University press 2009
- [24] A.J. Mendecki, G. van Aswegen and P. Mountford (1999), A guide to routine seismic monitoring in mines.
- [25] D. Heal (2010) , Observations and Analysis of Incidences of rockburst Damage in underground Mines, PhD Thesis, University of Western Australia.
- [26] T. Hanks & H. Kanamori, (1979). A moment magnitude scale, J. Geophys. Res., 84(B5), 2348–2350.
- [27] D.V. Hosmer, & S. Lemeshow (2000), Applied Logistic Regression, Second Edition.
- [28] T. Fawcett (2005). An introduction to ROC analysis. Elsevier, 27, no. 8, p. 861-873.
- [29] J. Swets (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems.
- [30] A. Brzovic & P. Schachter (2016), Plano Desarme Potencial Macizo Rocosó, Nivel de Hundimiento, SGL-I-059/2016, Mina El Teniente, Superintendencia de Geología.
- [31] Revisión de propiedades físico - mecánicas para la roca intacta y fallas de El Teniente, GRMD-SGL-INF-081-2014.
- [32] AKL (2006). Modelo conceptual del campo de esfuerzos en mina El Teniente. Estudio DT-CG-2006-02. División El Teniente, Codelco-Chile.
- [33] J. Cornejo & C. Pardo (2014), Management indicators for the cave geometry control, El Teniente mine, Caving 2014.
- [34] J. L. Maldonado Meza (2009), "Modelo de Planificación Integrado Mina-Transporte-Planta División El Teniente Codelco Chile".

- [35] Y. Potvin & J. Wesseloo (2008), Findings from Seismic Data Analysis at Reno.
- [36] D.T. Larose (2006), Data Mining Methods and Models.
- [37] A. Espinoza, P. Landeros, V. Ortega & P. Araya. (2017) Herramienta de análisis para dar soporte a decisiones de constructibilidad en distintas condiciones geomecánicas, SIMIN 2017.
- [38] J. Vallejos & S. Mckinnon. (2013) Logistic Regression and neural network classification of seismic records, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 62.
- [39] I. Navia, R. Castro & M. Valencia. (2014). Statistical Analysis of mud entry at Diablo Regimiento sector-El Teniente's Mine, Caving 2014.
- [40] V. Ortega. (2015) Modelo de Peligro sísmico para tronaduras de incorporación de área en el sector Reservas Norte, El Teniente, Codelco, Chile, Tesis de Magister en Minería, Universidad de Chile.