



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

**ANÁLISIS DE SISMICIDAD INDUCIDA POR TRONADURAS DE INCORPORACIÓN
DE ÁREA EN MINA EL TENIENTE, CODELCO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

VICENTE JAVIER ORTEGA CONTRERAS

**PROFESOR GUÍA:
JAVIER VALLEJOS MASSA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
DIANA COMTE SELMAN
JAVIER CORNEJO GONZALEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2014**

RESUMEN

La minería del caving constituye un gran número de procesos, dentro de los cuales se encuentran los relacionados a las tareas de corte basal o socavación, es decir, generar una excavación suficiente para inducir el hundimiento del sistema. Por su parte las tronaduras de batea producen cambios en las condiciones del macizo rocoso similares a las de hundimiento, debido a la eliminación directa en fases de material rocoso. La etapa siguiente se basa en la extracción del material fragmentado contenido en las bateas para mantener los planes de producción en un periodo de tiempo dado. El ciclo anterior puede verse interrumpido ya sea por problemas: técnico-mineros, económicos, geomecánicos y/o sísmicos. El impacto que generan los incidentes relacionados con la sismicidad inducida por la minería, no sólo tienen una arista económica por pérdida de la capacidad productiva sino también sobre los recursos humanos expuestos a fenómenos de eventos de gran magnitud y estallidos de roca.

El entendimiento de los fenómenos sísmicos debido a la actividad minera en procesos de caving, es limitado por la complejidad de los problemas que se suscitan. Se ha observado que las tronaduras de incorporación de área en mina El Teniente, pueden aumentar el peligro sísmico y junto con esto interrumpir la capacidad productiva del ciclo minero. El objetivo de este estudio se basa en la comprensión y caracterización de las tronaduras de incorporación de área y su relación con los mecanismos mediante los cuales se genera sismicidad inducida a partir de estas.

Para caracterizar la sismicidad generada por los diversos tipos de tronaduras de incorporación de área se usan formulismos ampliamente utilizados en el análisis de la sismicidad tectónica, como la ley de Gutenberg-Richter y la ley de Omori modificada. Adicionalmente, para el reconocimiento y clasificación de tronaduras con respecto a eventos sísmicos se utiliza modelamiento estadístico mediante regresión logística a partir de los parámetros sísmicos registrados por el sistema de monitoreo sísmico.

Los resultados obtenidos indican que la sismicidad inducida por tronaduras de incorporación de área, se debe principalmente a cambios en los esfuerzos en el sistema debido a los cambios geométricos por la excavación realizada. Las tronaduras de socavación tienen un comportamiento sísmico distinto a las de tronaduras de batea. Ambos tipos de tronaduras generan agrupamiento de sismicidad en espacio y tiempo, con magnitudes altas, en un sector cercano a éstas. En un espacio y tiempo de 200 m y 24 hrs el 100% de los eventos de magnitud relevante (momento magnitud mayor a 0,7) se encuentran a menos de 180 m y 2,5 hrs desde el origen para el caso de tronaduras de incorporación de área, mientras que se encuentran a menos de 150 m y 2,5 hrs desde el origen para el caso de tronaduras de socavación.

Los parámetros sísmicos permiten clasificar con alta exactitud y eficiencia si el tipo de registro corresponde a una tronadura o a un evento sísmico. De esta forma, es posible disminuir el error asociado en la clasificación de eventos sísmicos que en realidad son tronaduras en mina RENO.

ABSTRACT

Caving mining considers a series of processes, including those related to the activities of undercutting, in other words generating a sufficient excavation to induce the collapse of the system. Meanwhile the draw bell blasting cause changes in conditions similar to those of rock mass collapse, because of the direct elimination in steps/phases of rock material. The next stage is related to the extraction of broken material in order to maintain a production schedule. The above cycle may be interrupted, either due to problems such as mining/technical, economic, geomechanical and/or seismic. The impact of the incidents generated by mining induced seismicity, have not only an economic edge for losing production, but also on human resources exposed to the phenomena of large magnitude events and rockbursts.

Understanding seismic events due to mining activity in caving processes is limited by the complexity of the problems generated. It has been observed that area incorporation blasting in the El Teniente mine, may increase the seismic hazard and disrupt the functioning of the mining cycle. The purpose of this study is based on the understanding and characterization of the area incorporation blasting and its relation to the mechanisms that generate induced seismicity from these.

For characterization of the seismic generated by different types of blasting area incorporation methodologies widely used in the analysis of seismic tectonics are the Gutenberg-Richter law and the modified Omori's law. Additionally, for the recognition and classification of blasting related to seismic events. The use of statistical modeling with logistic regression from the seismic parameters is recorded by the seismic monitoring system. The application of the above modeling provides a contribution to the area specifically for the statistical processing of seismic data with different methodologies in RENO mine.

The results show that the seismicity generated by area incorporation blasting, is caused by the increase of stress in the system due to geometric changes by the excavation. The undercutting blasting generate a different seismic behavior from those of draw bell blasting. Both types of blasting create clustering of seismicity with high magnitudes space and time in surrounding areas. For draw bell blasting in space near 200 m and time of 24 hrs, the 100% of the relevant magnitude events (moment magnitude greater than 0.7) are less than 180 m and 2.5 hrs from the source blasting. For undercutting blasting in the same space and time, the 100% of the events relevant magnitude are less than 150 m and 2.5 hrs from the origin of the blast.

Seismic parameters allow to classify with high accuracy and efficiency if the record type corresponds to a blast or a seismic event. Thus, it is possible to minimize the associated error in the classification of seismic events that are actually mine blasting in RENO.

AGRADECIMIENTOS

A toda la gente que hizo posible y que en alguna medida colaboró con la generación del presente estudio.

A los profesionales a cargo de geomecánica en mina El Teniente, que permitieron la recopilación de información, aportando con su disposición y tiempo.

A mi familia, amigos, pareja, profesores y en especial a Jehová que me encausó en este camino, para cumplir así con uno de los objetivos en mi vida.

El presente trabajo de memoria se realizó en el marco del proyecto con Mina El Teniente, Codelco, Chile: “Estudio de sismicidad inducida: indicadores sísmicos y tronaduras de socavación. Contrato N° 4501263304”, desarrollándose por el Departamento de Ingeniería de Minas y el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo general.....	2
1.1.2.	Objetivos específicos.....	2
1.2.	Alcances.....	2
2.	ANTECEDENTES.....	3
2.1.	Mina El Teniente.....	3
2.1.1.	Ubicación.....	3
2.1.2.	Situación actual.....	3
2.1.3.	Mina RENO.....	4
2.2.	Conceptos teóricos referenciales.....	6
2.2.1.	Evento sísmico.....	6
2.2.2.	Estallido de roca y evento de magnitud relevante.....	6
2.2.3.	Monitoreo sísmico.....	6
2.2.4.	Fuente y mecanismo sísmico.....	7
2.2.5.	Peligro y riesgo sísmico.....	7
2.2.6.	Agrupamiento de eventos sísmicos.....	8
2.3.	Sismicidad en mina El Teniente.....	9
2.4.	Sistema de monitoreo sísmico.....	10
2.5.	Parámetros sísmicos.....	12
2.5.1.	Energía radiada (E).....	12
2.5.2.	Momento sísmico (M_0).....	12
2.5.3.	Magnitud momento (M_W).....	12
2.5.4.	Frecuencia esquina (f_0).....	12
2.5.5.	Razón de energía S y P (E_s/E_p).....	13
2.5.6.	Esfuerzo aparente (σA).....	13
2.5.7.	Radio de ruptura (r).....	13
2.5.8.	Caída de esfuerzo estático ($\Delta\sigma$).....	14
2.5.9.	Volumen aparente (VA).....	14
2.6.	Tronaduras de incorporación de área en RENO.....	14
2.6.1.	Tronaduras de socavación.....	14
2.6.2.	Tronaduras de batea normal y alta.....	17

3.	METODOLOGÍA.....	18
3.1.	Parámetros sísmicos de tronaduras	19
3.2.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras	23
3.3.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos	24
3.4.	Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras.....	25
3.5.	Modelos utilizados.....	26
3.5.1.	Distribución frecuencia magnitud	26
3.5.2.	Ley de Omori Modificada	28
3.6.	Clasificación de registros sísmicos	32
3.6.1.	Regresión logística	32
3.6.2.	Desempeño del estimador-Análisis ROC.....	34
4.	Resultados.....	36
4.1.	Parámetros sísmicos de tronaduras	36
4.1.1.	Análisis de señales de ondas de tronaduras	36
4.1.2.	Estadísticas generales del análisis de ondas	39
4.2.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras	41
4.3.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos	42
4.3.1.	Tronaduras de Socavación.....	43
4.3.2.	Tronaduras de Batea Normal.....	44
4.3.3.	Tronaduras Batea Alta	45
4.3.4.	Distribución de eventos sísmicos en el espacio.....	46
4.4.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos de magnitud relevante.....	47
4.4.1.	Tronaduras de Socavación.....	48
4.4.2.	Tronaduras de Batea Normal.....	49
4.4.3.	Tronaduras de Batea Alta	50
4.5.	Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras.....	51
4.5.1.	Magnitud versus tiempo	51
4.5.2.	Frecuencia de Eventos	53
4.5.2.1.	Tronadura Socavación	53
4.5.2.2.	Tronadura Batea Normal	55
4.5.2.3.	Tronadura Batea Alta.....	57
4.6.	Distribución frecuencia magnitud.....	59
4.6.1.	Tronaduras de Socavación.....	59
4.6.2.	Tronaduras de Batea Normal.....	61
4.6.3.	Tronaduras de Batea Alta	63

4.6.4.	Resumen	65
4.7.	Ley de Omori modificada	66
4.7.1.	Tronaduras de Socavación.....	66
4.7.2.	Tronaduras de Batea Normal.....	69
4.7.3.	Tronaduras de Batea Alta	72
4.7.4.	Resumen	75
4.8.	Clasificación de registros sísmicos	79
4.8.1.	Consistencia temporal de parámetros sísmicos	79
4.8.2.	Análisis exploratorio de datos	85
4.8.3.	Filtro	87
4.8.4.	Independencia.....	90
4.8.5.	Regresión logística	90
4.8.5.1.	Estabilización del modelo.....	91
4.8.5.2.	Calibración.....	92
4.8.5.3.	Verificación	93
5.	Discusión	94
5.1.	Parámetros sísmicos de tronaduras	94
5.2.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras	94
5.3.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos.	94
5.3.1.	Distribución de eventos sísmicos en el espacio.....	95
5.4.	Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos de magnitud relevante.....	95
5.5.	Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras.....	95
5.6.	Frecuencia de eventos	96
5.7.	Distribución frecuencia magnitud.....	97
5.8.	Ley de Omori modificada	98
5.9.	Clasificación de registros sísmicos	100
5.9.1.	Consistencia temporal de parámetros sísmicos	100
5.9.2.	Análisis exploratorio de datos	100
5.9.3.	Filtro	100
5.9.4.	Independencia.....	100
5.9.5.	Regresión logística	101
5.9.5.1.	Estabilización del modelo.....	101
5.9.5.2.	Calibración.....	101
5.9.5.3.	Verificación	101
6.	Conclusiones.....	102

7. Referencias	106
ANEXO	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sectores productivos mina El Teniente (Constanzo et.al., 2013).	4
Figura 2. Producción (t/d) estimada para los sectores productivos de mina El Teniente (Constanzo et.al., 2013).	4
Figura 3. Esquema de sistema de manejo de mineral mina RENO.	5
Figura 4. Seis Mecanismos básicos de sismicidad inducida (Hasegawa et al.,1989).	7
Figura 5. Sistema macrosísmico 1992 (Dunlop & Gaete, 1995).	9
Figura 6. Polígono de selección de eventos sísmicos mina RENO.	11
Figura 7. Frentes de crecimiento sector RENO 2009-2011 [25].	15
Figura 8. Disposición general panel caving variante hundimiento avanzado, a) desarrollo de UCL, b) socavación, c) desarrollo, d) apertura de bateas, e) extracción [25].	15
Figura 9. Generación de batea hundimiento avanzado, a) distintas fases con sus días de tronadura. b) diseño de zanja hundimiento avanzado RENO.	17
Figura 10. Diagrama ilustrativo de la metodología utilizada para caracterizar la sismicidad asociada a las tronaduras.	18
Figura 11. Diagrama ilustrativo de la metodología empleada para la clasificación de registros sísmicos.	19
Figura 12. Sismograma genérico representativo (Joughin, 2007).	20
Figura 13. Despliegue de información en JMTS.	21
Figura 14. Las estaciones 117, 147, 5, 113, 114, 133, etc., las más cercanas a un polvorazo (Tron i) con ciertas coordenadas X (Este), Y (Norte) en mina RENO.	21
Figura 15. Forma típica de onda generada por una tronadura y captada por un geófono uniaxial (RN 98).	22
Figura 16. Histograma genérico expandido, rotación de las formas de ondas; x, y, y z (recuadro en rojo).	22
Figura 17. Esquema para el cálculo del tiempo entre tronaduras.	23
Figura 18. Esquema explicativo en 2D del cálculo de distancia entre tronaduras.	24
Figura 19. Estadísticas espacio-tiempo entre tronadura y eventos de magnitud relevante. Definición de un espacio-tiempo, junto con los parámetros sísmicos relevantes de las tronaduras y los eventos sísmicos.	24
Figura 20. Esquema explicativo de aislamiento de tronaduras y eventos sísmicos, a cierto R y Δt	25
Figura 21. Secuencias aisladas superpuestas por tipo de tronadura.	25
Figura 22. Esquema de metodología para la estimación de parámetros a y b antes y después de t_0 para cada tipo de tronadura.	26
Figura 23. Ejemplo de gráfico frecuencia acumulada-magnitud momento observado y calculado para una secuencia sísmica.	27
Figura 24. Representación del procedimiento de ajuste de un modelo constante y Omori.	31
Figura 25. Representación de la respuesta de un modelo de regresión logística.	33
Figura 26. Sismograma típico de una Tronadura de incorporación de área, identificación de ondas P y S. La componente de la onda P es de color rojo y las componentes verticales y horizontales de la onda S son de color verde y azul, respectivamente	37
Figura 27. Polarización; a) onda P, b) onda S.	37
Figura 28. Ejemplo de procedimiento utilizado, coordenadas de la tronadura marcadas con color rojo coinciden.	38

Figura 29. a) Distribución acumulada de tronaduras versus momento sísmico, b) distribución acumulada de tronaduras versus momento magnitud de las tronaduras, años 2009-2010.	40
Figura 30. Distribución acumulada de tronaduras versus energía radiada, años 2009-2010.	40
Figura 31. Dispersión de distancia y tiempo entre tronaduras (380).	41
Figura 32. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras consecutivas, a) año 2009, b) año 2010.	42
Figura 33. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de socavación para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos año 2009.	43
Figura 34. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de socavación para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos año 2010.	43
Figura 35. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea normal para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos año 2009.	44
Figura 36. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea normal para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos año 2010.	44
Figura 37. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea alta para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos año 2009.	45
Figura 38. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea alta para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos año 2010.	45
Figura 39. Dispersión de eventos sísmicos de tronaduras de incorporación de área, para distintas M_w de corte, 2009.	46
Figura 40. Dispersión de eventos sísmicos de tronaduras de incorporación de área, para distintas M_w de corte, 2010.	46
Figura 41. Histogramas de la sismicidad en función de la altura.	47
Figura 42. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante, 2009.	48
Figura 43. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante, 2010.	48
Figura 44. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2009.	49
Figura 45. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2010.	49
Figura 46. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2009.	50
Figura 47. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea alta y eventos de magnitud relevante, 2010.	50
Figura 48. Momento magnitud en función del tiempo para cada tipo de tronaduras, año 2009. ..	51
Figura 49. Momento magnitud en función del tiempo para cada tipo de tronaduras, año 2010. ..	52
Figura 50. Frecuencia de eventos para distintos M_w , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de socavación, año 2009.	53

Figura 51. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de socavación, año 2010.....	54
Figura 52. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea normal, año 2009.....	55
Figura 53. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea normal, año 2010.....	56
Figura 54. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea alta, año 2009.....	57
Figura 55. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea alta, año 2010.....	58
Figura 56. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{WC}=-1$, b) después de t_0 con $M_{WC}=-1$, c) antes de t_0 con $M_{WC}=0,2$, d) después de t_0 con $M_{WC}=0,2$, para tronaduras de socavación.....	59
Figura 57. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto antes y después, para tronaduras de socavación.....	60
Figura 58. a) Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{WC}=-1$, b) después de t_0 con $M_{WC}=-1$, c) antes de t_0 con $M_{WC}=0,2$, d) después de t_0 con $M_{WC}=0,2$, para tronaduras de batea normal.....	61
Figura 59. Gráfico frecuencia-magnitud superpuesto antes y después, para tronaduras de batea normal.....	62
Figura 60. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{WC}=-1$, b) después de t_0 con $M_{WC}=-1$, c) antes de t_0 con $M_{WC}=0,2$, d) después de t_0 con $M_{WC}=0,2$, para tronaduras de batea alta.	63
Figura 61. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto después de t_0 , para tronaduras de batea alta.....	64
Figura 62. a) Valores de a^- y a^+ en función de M_{WC} , b) Valores de b^- y b^+ en función de M_{WC} , c) Valores de Δb^- y Δb^+ en función de M_{WC} , d) Valores de R^- y R^+ en función de M_{WC}	65
Figura 63. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de socavación.	66
Figura 64. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de socavación.....	67
Figura 65. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC} =-1,2$, b) $M_{WC} =-0,8$, c) $M_{WC} =-0,6$, d) $M_{WC} =-0,4$, tronaduras de socavación.	68
Figura 66. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de batea normal.	69
Figura 67. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de batea normal.....	70
Figura 68. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC} =-1,2$, b) $M_{WC} =-0,8$, c) $M_{WC} =-0,6$, d) $M_{WC} =-0,4$, tronaduras de batea normal.	71
Figura 69. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de batea alta.....	72
Figura 70. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de batea alta.	73
Figura 71. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC} =-1,2$, b) $M_{WC} =-0,8$, c) $M_{WC} =-0,6$, d) $M_{WC} =-0,4$, tronaduras de batea alta.....	74
Figura 72. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de T_B para distintos tipos de tronaduras.	75
Figura 73. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de R para distintos tipos de tronaduras.....	76
Figura 74. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de M_{WC} para distintos tipos de tronaduras...	76

Figura 75. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de socavación.	77
Figura 76. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de batea normal.	78
Figura 77. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de batea alta. .	78
Figura 78. M_W en el tiempo (2009-2010), consistencia de parámetros sísmicos.....	80
Figura 79. Consistencia de M_W en una escala de tiempo ampliada.	80
Figura 80. E en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.....	81
Figura 81. f_0 en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.	81
Figura 82. E_s/E_p en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.	82
Figura 83. σA en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.....	82
Figura 84. r en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.....	83
Figura 85. $\Delta\sigma$ en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.....	83
Figura 86. VA en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.	84
Figura 87. Dispersión de datos, E_s/E_p versus M_0 en escala logarítmica.	85
Figura 88. Dispersión de datos, E versus M_0 en escala logarítmica.	86
Figura 89. Dispersión de datos, E versus f_0 en escala logarítmica.....	86
Figura 90. Dispersión de datos, E versus S/P en escala logarítmica.	87
Figura 91. Distribución acumulada de: E_s/E_p y E_p	89
Figura 92. Parámetros Beta del modelo de regresión logística en función del porcentaje de datos utilizados en el ajuste.....	91
Figura 93. Gráfico ROC, calibración con el 70% de los datos.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseños de perforación y tronaduras utilizados en sector RENO 2009-2011 [25].	16
Tabla 2. Matriz de contingencia y métricas comunes de desempeño (Fawcett, 2005).	34
Tabla 3. Parámetros sísmicos obtenidos del análisis de onda de tronaduras.....	39
Tabla 4. Estadísticas generales de parámetros sísmicos de tronaduras de incorporación de área, 2009-2010.....	40
Tabla 5. Distribución de tipos de tronaduras de incorporación de área.	41
Tabla 6. Parámetros Sísmicos utilizados para la generación del modelo de clasificación.	79
Tabla 7. Cantidad de datos según categoría	89
Tabla 8. Matriz de correlación luego de la aplicación del filtro propuesto.	90
Tabla 9. Valores Prob>Chi2, test de significancia de variables.	91
Tabla 10. Estadísticas básicas de variables consideradas en el modelo, 40% de los datos.....	91
Tabla 11. Valores Prob>Chi2, test de significancia de variables.	92
Tabla 12. Valores Beta del modelo propuesto.....	92
Tabla 13. Matriz de Contingencia y Métricas de desempeño del modelo para calibración y verificación.	93
Tabla 14. Parámetros p, c y K, correspondiente al mejor ajuste de las secuencias superpuestas..	99

1. INTRODUCCIÓN

El control del peligro sísmico es un tema de relevancia en el negocio minero, las empresas mineras invierten una cantidad importante de recursos en su prevención y control. La minería del caving comprende una gran cantidad de factores y procesos necesarios para su funcionamiento, entonces se hace fundamental cuantificar las variables que generan un aumento del peligro sísmico, es decir de la probabilidad de generar un evento de magnitud sísmica relevante.

Particularmente para mina El Teniente, el paso de explotación de mineral secundario a primario a inicios de los años 80, ha concebido cambios en la estructura del material rocoso que a su vez ha generado cambios en la liberación de energía del sistema a la minería aplicada. Las tronaduras de hundimiento en mineral primario han provocado a partir de entonces que la actividad sísmica se eleve a niveles críticos.

La sismicidad inducida debido a tronaduras de incorporación de área, inherentes al ciclo minero, ha elevado los índices de peligro sísmico en mina Reservas Norte (sector productivo de mina El Teniente), siendo éste el primer sector completo explotado en roca primaria. El peligro asociado a este tipo de acontecimientos, no sólo puede disminuir el valor económico del negocio sino también representa una amenaza latente a la integridad física de las personas y/o trabajadores en la faena minera. Resulta entonces fundamental comprender, analizar y caracterizar, la sismicidad inducida por los tipos de tronaduras de incorporación de área.

Utilizando una metodología consistente que permita modelar la sismicidad posterior a la perturbación es posible caracterizar la respuesta del sistema y de paso comprender qué tipo de tronadura tiene una mayor tendencia a elevar el peligro sísmico junto con exponer las diferencias de cada una bajo un contexto estadístico y técnico.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general es desarrollar una metodología de análisis que permita identificar, interpretar y caracterizar las tronaduras de incorporación de área, con respecto a eventos sísmicos en mina Reservas Norte.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Reconocer las características de las formas de las ondas sísmicas y parámetros sísmicos generados por las tronaduras.
2. Desarrollar una metodología que permita aislar en espacio y tiempo la sismicidad generada por las tronaduras.
3. Identificar parámetros estadísticos distintivos de la sismicidad antes y después de las tronaduras.
4. Aplicar métodos estadísticos para la clasificación de registros sísmicos.

1.2. Alcances

Dentro de los alcances de la presente memoria, se encuentra la caracterización y conocimiento técnico de la sismicidad inducida por las tronaduras de incorporación de área en mina RENO. Con el uso de parámetros sísmicos se pretende conocer las cualidades estadísticas de la sismicidad en un campo cercano a cada tronadura. Se consideran para el análisis los registros sísmicos para los años 2009 y 2010.

Este catálogo está compuesto por parámetros sísmicos estimados a partir del procesamiento de señales de ondas sísmicas. Para el análisis, sólo se re-procesan las señales de ondas asociadas a tronaduras de manera de asegurar su localización y parámetros sísmicos.

La sismicidad se analizará a nivel interpretativo y teórico; apoyado de gráficos, generación de un estudio exploratorio de datos y del cálculo de parámetros que mejor ajustan modelos ampliamente utilizados en la literatura. No se consideran modelos de predicción de eventos de magnitud sísmica relevante.

2. ANTECEDENTES

2.1. Mina El Teniente

En esta sección se considerará información relevante de mina El Teniente, resumiendo temáticas tales como: ubicación, situación actual y principales sectores productivos entre los cuales se encuentra mina RENO.

2.1.1. Ubicación

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. La ciudad más cercana es Rancagua que está ubicada a 44 km al Noroeste de la mina, donde es posible acceder a las instalaciones de Colón Alto a través de la Carretera del Cobre Presidente Eduardo Frei Montalva.

La mayor parte de la División se encuentra a una elevación entre los 2.000 y los 2.700 m.s.n.m, con sus instalaciones industriales ubicadas en: Sewell, Colón, Caletones, Coya, y en la misma Ciudad de Rancagua.

2.1.2. Situación actual

División El Teniente es uno de los complejos minero-metalúrgicos de CODELCO y considera entre sus activos principales a la mina subterránea El Teniente, además de instalaciones productivas e infraestructuras necesarias para la concentración y fundición de minerales de cobre y molibdeno que comercializa. Actualmente se extraen y benefician 135 kt/día de mineral que producen aproximadamente 409 kt/año cobre y 5,2 kt/año de molibdeno [1].

La actuales operaciones de la mina (Figura 1) se encuentran conformadas por: la explotación de distintos sectores a través de métodos de hundimiento (Block Caving: roca secundaria/Panel Caving: roca primaria), operaciones mecanizadas con equipos LHD, traspaso gravitacional y el transporte mediante ferrocarriles que alimentan las plantas de chancado-molienda en Sewell y chancado-molienda-flotación en Colón [2].

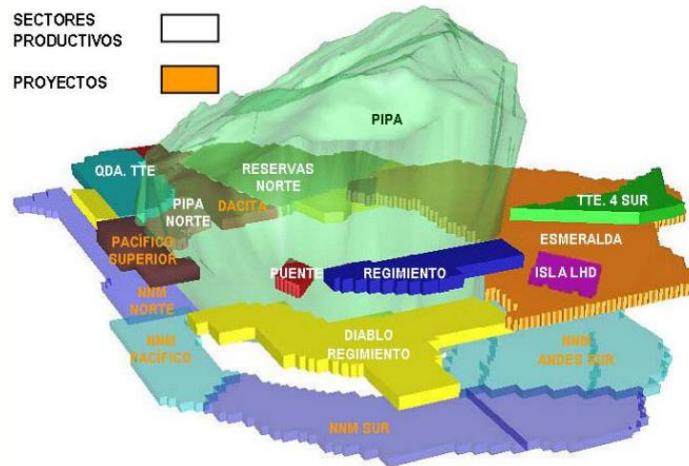


Figura 1. Sectores productivos mina El Teniente (Constanzo et.al., 2013).

2.1.3. Mina RENO

Corresponde a un sector en operación y etapa de crecimiento, con secuencia de avance en frentes escalonados. Tiene planificado alcanzar una capacidad de régimen de 39.000 t/d para el año 2014 y el fin de la mina se proyecta hasta el año 2022 condicionada por la entrada en producción del Proyecto Nuevo Nivel Mina (Figura 2), sus reservas se estiman mayores a 171 Mt. Durante el año 2011 se inició la incorporación del sector denominado Corbata en la dirección SW, alcanzando una producción máxima de 4.000 tpd el año 2013 [3].

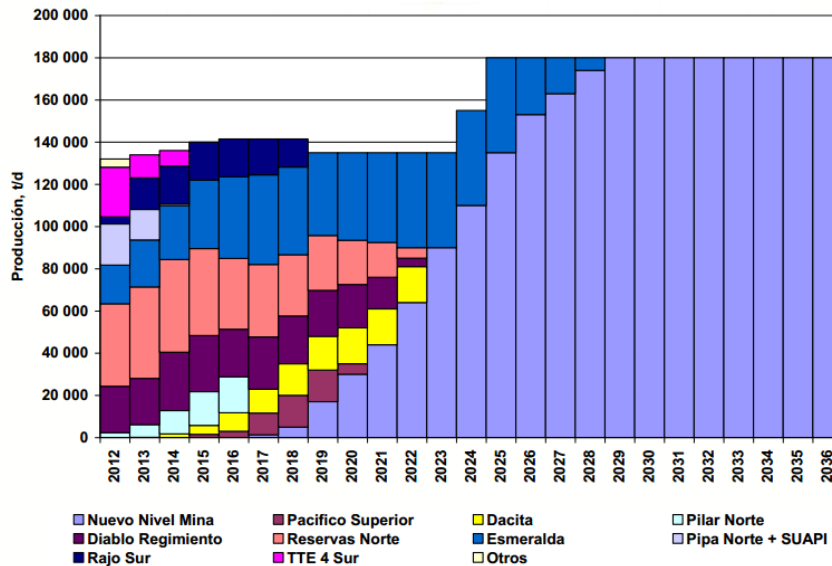


Figura 2. Producción (t/d) estimada para los sectores productivos de mina El Teniente (Constanzo et.al., 2013).

Mina RENO se ubica en el sector nororiente del yacimiento bajo los niveles Teniente 4 Norte y Teniente 5 Pilares. La explotación del sector se ha realizado mediante el método panel caving en su variante con hundimiento avanzado hasta el cruzado Xc-5N del nivel de hundimiento, desde este cruzado hacia el norte la explotación se lleva a cabo mediante panel caving convencional. En el nivel de producción del área andesita operan equipos LHD de 7 yd³ que transportan y vacían el

mineral en piques de traspaso, los cuales conducen el mineral hasta el nivel de acarreo. Desde ahí, camiones de 80 t son cargados con buzones (alimentadores plate feeder), los que conducen el mineral a los piques tolva que tienen incorporado un sistema de reducción, en donde se traspasa el mineral a través de los OPs 25/26/27/28 hacia el nivel de transporte principal donde finalmente se carga al FF.CC Teniente 8. En el caso del área invariante los equipos LHD de 7 yd³ transportan y vacían el mineral en piques de traspaso que conducen al nivel de reducción, llegando finalmente al FF.CC Teniente 8. De esta forma ambas áreas alimentan la Planta Colón [4]. La Figura 3, presenta una vista esquemática de los sectores operativos:

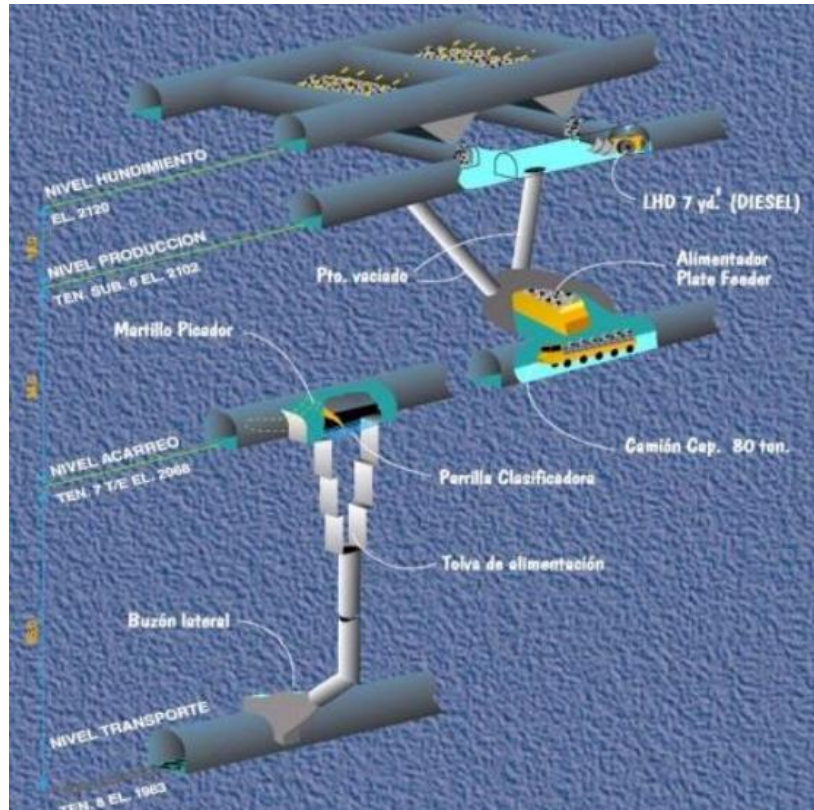


Figura 3. Esquema de sistema de manejo de mineral mina RENO.

2.2. Conceptos teóricos referenciales

A continuación se describen conceptos teóricos de importancia para el presente estudio, de manera de contextualizar e introducir al lector a los tecnicismos comúnmente utilizados en la literatura.

2.2.1. Evento sísmico

Un evento sísmico es una onda de esfuerzo dinámico transitorio causado por falla o fractura en el macizo rocoso. De esta forma un evento sísmico es la vibración del deslizamiento o rotura del macizo ante lo cual, los sismos son una respuesta normal del macizo a los cambios de esfuerzo causados por la creación de excavaciones mineras (Hudyma, 2004) [5]. Particularmente para mina El Teniente, Dunlop & Gaete (1999) definen este concepto como una deformación brusca de un medio sólido, con liberación de energía en forma de ondas mecánicas [6].

2.2.2. Estallido de roca y evento de magnitud relevante

Técnicamente a partir de las definiciones anteriores, un estallido de roca es un evento sísmico que tiene como resultados un daño visible sobre el macizo rocoso. Sin embargo, para mina El Teniente, la definición incorpora además los impactos económicos ya que lo consideran como la pérdida de continuidad del proceso productivo o de la operación minera provocada por la ruptura y proyección del macizo al interior de excavaciones asociados a un evento sísmico (Dunlop & Gaete, 1999).

En la Mina RENO los eventos sísmicos con un momento magnitud mayor igual a 0,7, son clasificados como eventos de magnitud relevante. Por lo general eventos de esta magnitud tienen mayor probabilidad en la generación de estallidos de roca.

2.2.3. Monitoreo sísmico

Según McCreary et. al. (1991), el monitoreo sísmico es una técnica que utiliza monitores de vibración para detectar y analizar las ondas de esfuerzo dinámicas generadas por la falla del macizo rocoso, comúnmente llamado eventos sísmicos. El monitoreo sísmico fue desarrollado originalmente para comprender los fenómenos de estallidos de roca en las minas, pero en ocasiones se aplica para entender los mecanismos de falla o fractura de la masa rocosa [7].

Potvin et. al. (2007), sugiere que los mecanismos de falla que intervienen en los procesos de caving no se conocen bien y son inherentemente difíciles de controlar con las observaciones visuales y la instrumentación convencional tales como: extensómetros y celdas de medición de esfuerzo. Si bien la minería de caving ha sido utilizada durante décadas, sólo en la última los

sistemas de monitoreo sísmico se han instalado para estudiar las distintas fuentes sísmicas relacionadas con el caving. A esto se agrega que existe sólo un número limitado de minas en el mundo en el que se han recolectado registros sísmicos adecuados y de calidad asociados con el proceso de hundimiento [8].

2.2.4. Fuente y mecanismo sísmico

Según Hudyma (2008) [9], la fuente sísmica es la ubicación en el macizo rocoso, en la que alguna combinación de: esfuerzos, estructura geológica e influencias mineras causan que el macizo se deforme o falle, resultando en eventos sísmicos.

El mecanismo de fuente sísmica es el modo de deformación o falla del macizo rocoso que provoca la onda de esfuerzo dinámico. Algunos de los mecanismos típicos de origen sísmico en las minas incluyen (Figura 4):

- Deslizamiento en fallas geológicas existentes.
- Creación de nuevas fracturas en el macizo debido a altos esfuerzos, deformación y corte.
- Fallas de tracción de la roca intacta o macizo rocoso.

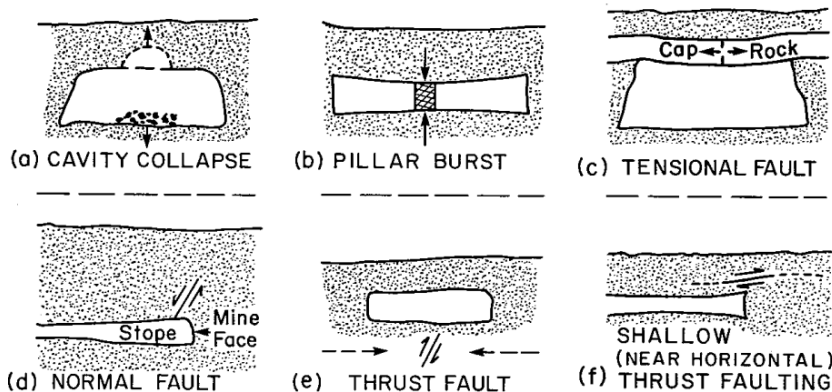


Figura 4. Seis Mecanismos básicos de sismicidad inducida (Hasegawa et al.,1989).

2.2.5. Peligro y riesgo sísmico

El peligro sísmico se define comúnmente por diversos investigadores en general, como la probabilidad de que ocurra un evento de gran magnitud. Hudyma (2004), señala que:

Generalmente se define como la probabilidad de ocurrencia de eventos de cierta magnitud. No existe una medida ampliamente aceptada para cuantificar el peligro sísmico. Si la probabilidad de eventos sísmicos grandes es alta, el peligro sísmico se considera alto. Si la probabilidad de eventos sísmicos grandes es baja, el peligro sísmico se considera bajo.

Otra definición comúnmente referenciada es la desarrollada por Gibowicz & Kijko (1994), desde la cual se asevera que el peligro sísmico es una estimación de la probabilidad media (en el espacio y el tiempo) de la ocurrencia de un evento sísmico con una cierta magnitud dentro de un intervalo de tiempo dado [10].

Es importante destacar frente a lo anterior, que efectivamente el peligro sísmico varía en el tiempo, por ejemplo: en muchas faenas mineras los cambios de esfuerzo relacionados con tronaduras es un mecanismo dominante. Sin embargo, con influencia discontinua en el medio. Otro aspecto es la variación del peligro en el espacio, es decir eventos de gran magnitud pueden ser resultado de fallas a gran escala en el macizo, tal que generalmente estos ocurren en áreas de alto esfuerzo inducido y de alta extracción minera [11].

Por su parte el riesgo sísmico es una interacción entre el peligro sísmico y la vulnerabilidad (trabajadores e instalaciones), y tiene que ver con los impactos económicos producidos por un evento sísmico de gran magnitud [12]. Dunlop & Gaete (1999), afirman que el riesgo sísmico está asociado con las características espaciales, dimensión geométrica y duración temporal del sismo.

2.2.6. Agrupamiento de eventos sísmicos

En este estudio es necesario introducir el concepto denominado agrupamiento el cual es ampliamente utilizado en la literatura con respecto al análisis de la sismicidad. Las interacciones espaciales de variables como: estructuras geológicas (locales y/o estructurales), contactos litológicos y cambios de esfuerzos inducidos por las prácticas mineras necesarias en la extracción de las reservas, generan un ambiente propicio para la generación de sismicidad inducida. La acumulación espacio-tiempo de eventos sísmicos evidencia la fuente en la cual el macizo rocoso se deforma o falla, lo cual puede entregar información sobre los mecanismos que generan las ondas de esfuerzo sísmico propagadas en el espacio.

El concepto de agrupamiento espacial de eventos, o también denominados clusterización de eventos sísmicos considera dos componentes principales, la clusterización temporal y espacial: la primera generalmente es mecánicamente más simple ya que es manejada por las perturbaciones del equilibrio del macizo debidos a que corresponden a reajustes de esfuerzo debido a cambios geométricos por tronaduras, en ocasiones las perturbaciones pueden ser debido a grandes eventos sísmicos. La segunda es más compleja que la anterior debido a que para interpretar la agrupación espacial, a menudo es útil tener una buena comprensión del método minero, la secuencia minera y el medio ambiente geológico y geomecánico de la mina (Hudyma, 2008).

2.3. Sismicidad en mina El Teniente

El monitoreo sísmico comienza en 1982, en el primer sector de minería principalmente de mineral primario. Para los años de 1992, la sismicidad inducida es monitoreada en dos niveles: un monitoreo local que se logra mediante dos equipamientos de micro sismicidad en dos sectores productivos y un monitoreo global que cubre la totalidad de la mina, llevado a cabo por un sistema macro sísmico.

Con respecto a la red de micro sismicidad se disponía de dos sistemas de monitoreo local de sismicidad análogo electrolab MP 250 en los sectores Tte.-Sub/6 y Tte.-4 Sur. Los tiempos de llegada de los datos del sistema eran estructurados por una red de 30 acelerómetros uniaxiales en Tte.-Sub/6 y una red de 25 acelerómetros uniaxiales en Tte.-4 Sur. Todos los sensores eran instalados en la superficie de las galerías. Tal que las redes eran instaladas en el entorno del frente del caving de cada sector.

La red macro sísmica contaba con un completo sistema digital instalado en 1992 lo que permitía una cobertura total en la mina (Figura 5). Con el tiempo, durante el periodo de 1992-1998, dicho sistema denominado ISS, incluía 23 estaciones sísmicas remotas, cada estación con un geófono triaxial SM-6. Dichos sensores eran instalados a 7-8 metros desde la superficie hacia la profundidad de las perforaciones, completamente lechados.

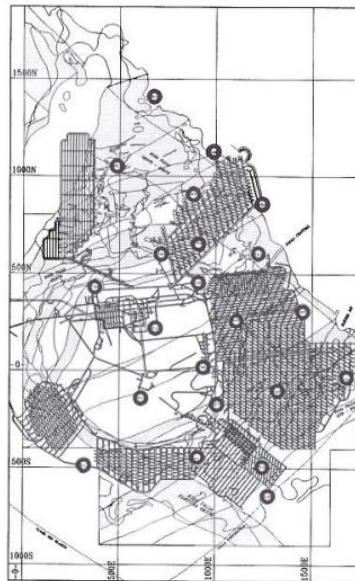


Figura 5. Sistema macrosísmico 1992 (Dunlop & Gaete, 1995).

Las señales desde los sensores eran procesados por una unidad electrónica localizada lo más cercana posible al sensor (10 m). Las señales del sensor se mandaban en forma digital a un centro de recepción en Tte.-Sub 6, nivel en donde un computador las procesaba automáticamente almacenando dicha información, además, de una estación de trabajo usada para chequear y procesar los datos [13].

El monitoreo sísmico desde aquel entonces ha proporcionado al área encargada del procesamiento y posterior interpretación, la información básica para construir un marco conceptual con el fin de entender la generación de mecanismos de actividad sísmica en términos del proceso minero.

Uno de los casos emblemáticos con respecto al control de la sismicidad inducida en los periodos antes mencionados, corresponde a Tte. Sub6. Las tronaduras de UCL y la producción de sector comenzó en el mes Julio de 1989. Durante los primeros meses pocos eventos inducidos fueron registrados. Sin embargo, a mediados de enero de 1990, la sismicidad comenzó a incrementarse. En ese momento, el área incorporada por tronaduras en el UCL eran casi de 10.000 m² y la producción acumulada era cercana a 384.000 ton. El 18 de Enero del mismo año, un gran estallido de roca dañó el área de producción.

Luego de ese evento, la producción fue restaurada pero fue repetidamente interrumpida por una gran cantidad de estallidos en el periodo 1990-1992, dañando principalmente los niveles de producción, ventilación y el nivel del martillo pica rocas. El sector fue temporalmente cerrado luego de un gran estallido de roca asociado a un evento de momento magnitud 2, en marzo de 1992. En esta misma fecha, las tronaduras del UCL cubrían un área de 20.000 m² y la producción acumulada fue de 825.000 ton, sin incluir el mineral de los desarrollos.

A partir de la hipótesis de que la sismicidad inducida es asociada a un proceso minero global es decir, corresponde al resultado del uso de parámetros mineros en un macizo rocoso dado, fue posible que el grupo de ingenieros a cargo modificara las características de la sismicidad inducida cambiando dichos parámetros, principalmente los parámetros de producción; minimizando la altura de columna de roca intacta y limitando la tasa de producción. Lo anterior correspondía efectivamente a una propagación uniforme del caving. Desde la aplicación de dichos conceptos se ha tenido una disminución del daño a la infraestructura, minimizándose las interferencias en el proceso minero en el sector Tte. Sub6 [14].

2.4. Sistema de monitoreo sísmico

Actualmente el sistema de monitoreo sísmico instalado en El Teniente cuenta con alrededor de 65 sensores distribuidos en los distintos sectores en producción. Estos sensores incluyen; 37 geófonos triaxiales de frecuencia propia 4,5 hz y 14 Hz, 20 geófonos uniaxiales de 15 Hz y 8 acelerómetros triaxiales de 2,3 Hz. Este sistema opera las 24 hrs, los 365 días del año. Los parámetros principales que entrega el sistema para cada evento son estimaciones del momento sísmico escalar y la energía irradiada, además de la localización del hipocentro sísmico. En el periodo de operación del sistema comprendido entre los años 1992 y el 2007, se han registrado más de 550.000 eventos sísmicos en un rango de magnitudes desde -2 a 3.

El análisis de la información apunta fundamentalmente a estimar de la mejor forma la respuesta del macizo a la minería y el peligro sísmico asociado. Con este objetivo, se analiza la evolución espacial y temporal de la sismicidad, su localización, magnitudes y otros parámetros sísmicos. Se emiten recomendaciones a la operación de la mina de manera de ajustar los parámetros (geometrías y tasas) mineros en desarrollo disminuyendo el peligro de eventos mayores [15].

Actualmente se trabaja con la extensión de la red sísmica de la mina, realizando una mejora en los modelos de respuesta del macizo rocoso para una mejor estimación de los niveles del peligro sísmico presentes en la explotación.

La red sísmica procesa y almacena en el historial sísmico toda la información recopilada de las señales en toda la mina El Teniente.

Para el presente estudio sólo se consideró la información correspondiente a mina RENO, ante lo cual con el objeto de seleccionar una cantidad de información representativa, se propone la selección de datos dentro de un polígono, el cual se presenta en la Figura 6.

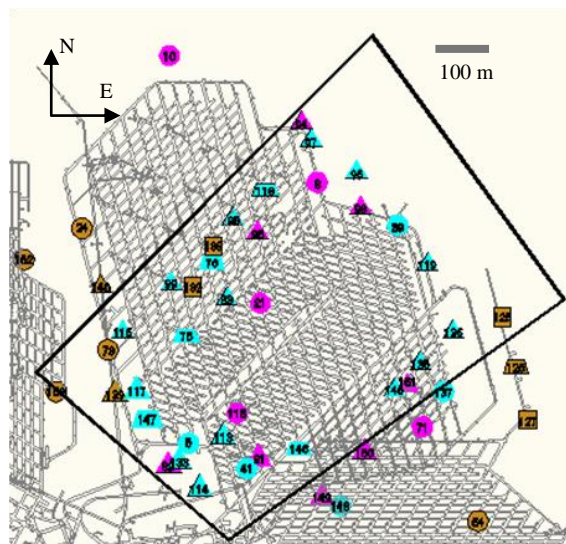


Figura 6. Polígono de selección de eventos sísmicos mina RENO.

2.5. Parámetros sísmicos

A continuación se describen los parámetros sísmicos que es posible calcular a través del sistema de monitoreo sísmico.

2.5.1. Energía radiada (E)

Se define como la porción de energía liberada o trabajo realizado en la fuente que es irradiada en forma de ondas sísmicas [16]. De esta manera comúnmente se utiliza como una medida del tamaño de los eventos sísmicos en las minas [17]. Particularmente la energía sísmica es proporcional a la integral del espectro de velocidad al cuadrado en el campo lejano.

2.5.2. Momento sísmico (M_o)

Es un escalar que mide la deformación inelástica co-sísmica en la fuente y la medida más fiable de la fuerza de un evento sísmico (Gibowicz & Kijko, 1994). Se define en términos de los parámetros de la doble-copla de desplazamientos de corte del modelo de la fuente y es expresada como sigue:

$$M_o = GDA \quad (1)$$

Donde G es el módulo de corte de la fuente, D es el desplazamiento medio de corte y A es el área sobre la cual se produce deslizamiento. A pesar de que se puede calcular con la ecuación anterior usando los datos de campo, comúnmente es estimada a partir de los registros sísmicos mediante cálculos un poco más elaborados [18].

2.5.3. Magnitud momento (M_w)

Es una relación que escala el momento sísmico en magnitud de un evento sísmico. Momento magnitud fue introducida por Hanks & Kanamari (1979) [19]:

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_o) - 6.1 \quad (2)$$

2.5.4. Frecuencia esquina (f_o)

La frecuencia esquina de un evento sísmico es la frecuencia radiada predominante desde el origen, estando relacionado con el momento sísmico y la caída de esfuerzo [20]. Es la frecuencia en la cual una fuente irradia la mayor energía observada como el máximo del espectro de velocidad de la fuente. La relación para la onda S en roca dura es:

$$f_o = 1915^3 \sqrt{\Delta\sigma/M_o} \quad (3)$$

2.5.5. Razón de energía S y P (E_s/E_p)

La razón entre la energía de onda S y la energía de onda P es un indicador del tipo de mecanismo focal del evento. Por ejemplo, para sismos naturales la relación E_s/E_p se encuentra entre 10 y 30. Si un gran porcentaje de la energía total se encuentra contenida en la onda S el mecanismo de fuente más probable es mediante falla por corte (Hedley, 1992) [21].

Para pequeños eventos sísmicos en las minas la relación puede variar entre 1,5 y 30. La baja cantidad de energía en las ondas S puede ser explicada por que estos sismos son causados por otros mecanismos de falla.

2.5.6. Esfuerzo aparente (σ_A)

El esfuerzo aparente es un modelo de medida independiente de la liberación de esfuerzo dinámico en la región de origen y se calcula como sigue:

$$\sigma_A = G \frac{E}{M_0} \quad (4)$$

Donde G es el módulo de rigidez, E es la energía sísmica y M_0 es el momento sísmico. Esfuerzo aparente da una indicación del estado de estrés. Muchos de los eventos sísmicos de alto esfuerzo aparente en un área indicarían los esfuerzos son altos en esa área. Minas más profundas tendrán eventos de mayor esfuerzo aparente que minas poco profundas.

2.5.7. Radio de ruptura (r)

El radio de la ruptura para el modelo de Brune¹ [22], puede ser estimado por la expresión:

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_0} \quad (5)$$

Donde V_s es la velocidad de ondas S y f_0 es la frecuencia esquina.

¹ **Modelo de Brune:** Modelo de fuente sísmica usado por el sistema sísmico ISS, para la estimación de los parámetros de la fuente.

2.5.8. Caída de esfuerzo estático ($\Delta\sigma$)

Shearer (1999) [23], define caída de la tensión como la diferencia promedio de esfuerzo a través de la falla antes y después de un evento sísmico. La caída de esfuerzo es la estimación de la tensión que mejor representa el cambio estrés (Gibowicz & Kijko, 1994).

$$\Delta\sigma = cM_0f_0^3 \quad (6)$$

Donde $c = 1,8 \cdot 10^{-10}$ para una estimación basada en las ondas S en un macizo competente, M_0 es el momento sísmico escalar y f_0 es la frecuencia de borde del espectro en la frecuencia de los sismogramas.

2.5.9. Volumen aparente (VA)

El volumen aparente es una medida del volumen de deformación inelástica co-sísmica y se calcula de la siguiente manera:

$$VA = \frac{M_0^2}{2GE} \quad (7)$$

Donde M_0 es el momento sísmico, G el módulo de rigidez y E es la energía radiada.

2.6. Tronaduras de incorporación de área en RENO.

2.6.1. Tronaduras de socavación

Las tronaduras de socavación tienen el objeto de generar la cara libre suficiente como para generar la iniciación del hundimiento. Butcher (2003) señala que la iniciación del caving ocurre durante e inmediatamente después de las tronaduras de socavación (proceso de undercutting) y se caracteriza por tasas relativamente bajas de hundimiento, típicamente menos del 0,5 a 1 metro por día [24].

En particular para mina Reservas Norte, por definición de la Superintendencia de planificación minero metalúrgica (SPL) [25], debe explotarse mediante método de explotación Panel Caving con Hundimiento Avanzado con desarrollo de armada de zanja y construcción de punto de extracción (sin conectar la zanja) y fracturamiento hidráulico hasta el Xc5N. El tipo de socavación definida y utilizada para el sector corresponde a una socavación tipo baja mediante la tronadura de pilares en sus diferentes frentes de crecimiento hasta el Xc5N (lugar donde se realiza cambio de variante de explotación).

El sector Reservas Norte ha tenido desde el año 2009 hasta el año 2011 tres frentes de crecimiento en el nivel de hundimiento (Figura 7):

- Frente de crecimiento Fw Norte.
- Frente de crecimiento Hw Centro.
- Frente de crecimiento Hw Sur.

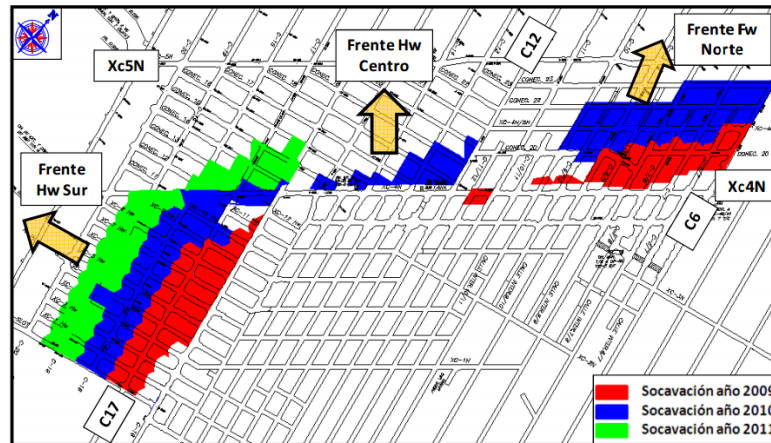


Figura 7. Frentes de crecimiento sector RENO 2009-2011 [25].

El método de explotación mencionado anteriormente se caracteriza por desarrollar la socavación adelantada respecto al desarrollo de las zanjas. Este método de explotación presenta la siguiente secuencia operacional (Figura 7):

- a) Se desarrollan las labores del nivel de hundimiento y sólo algunas labores de los niveles inferiores (calles en el nivel de producción) a una distancia de 30m.
- b) Se socava el nivel de hundimiento avanzando con el frente de socavación, hasta que éste se ubica a una distancia de 55m por delante del futuro frente de extracción.
- c) Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector que ahora se ubica bajo área socavada.
- d) Se realiza la apertura de bateas de extracción bajo área socavada.
- e) Se inician las actividades de extracción de mineral a una distancia de 55m del frente de socavación y a 25m del frente de preparación.

En la Figura 8 se muestra un esquema con la secuencia operacional del Panel Caving con Hundimiento Avanzado.

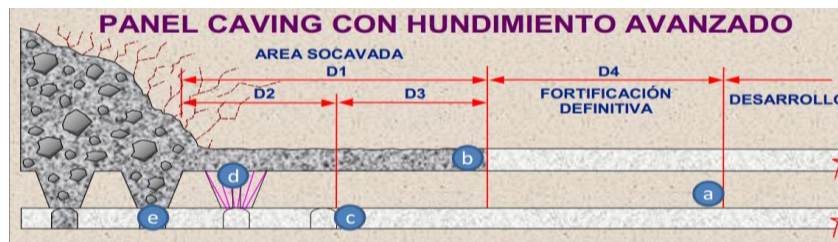


Figura 8. Disposición general panel caving variante hundimiento avanzado, a) desarrollo de UCL, b) socavación, c) desarrollo, d) apertura de bateas, e) extracción [25].

Los diseños de perforación y tronadura para las actividades de socavación e incorporación son realizados y emitidos por la Superintendencia de Ingeniería de Mina (SIM) a través de su unidad de Perforación y Tronadura.

Los diseños utilizados durante el periodo mencionado para los tres sectores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseños de perforación y tronaduras utilizados en sector RENO 2009-2011 [25].

Sector	Sector Imagen del diseño (Vista Planta esquemática)
Sector Fw Norte	
Sector Hw Centro	
Sector Hw sur	

En general se evidencia que la socavación de pilares contempla tronaduras con diseño de perforación (Tabla 1): tronaduras de 1/2 Pilar, mediante tiros paralelos (sector Fw Norte), mixto (paralelos y en abanico, sector Hw Centro) y John Wayne (sector Hw sur).

2.6.2. Tronaduras de batea normal y alta

Una zanja o batea colectora corresponde a una labor minera que tiene como objetivo recolectar el mineral fragmentado producto del proceso de caving. La geometría y el procedimiento de confección de las zanjas quedan determinados por la variante del método Panel Caving utilizada, y su diseño está sujeto a criterios del tipo geomecánico y operacionales, entre otras variables implicadas.

Si bien es imperante la continuación del método Panel Caving mediante bateas normales, esto no siempre fue posible durante el periodo de 2009-2011 debido a problemas técnicos generados por pérdida parcial o total del nivel de hundimiento, por consiguiente se contempló además la utilización de bateas altas. Una tronadura de batea alta a diferencia de una tronadura de batea normal, considera la detonación de la zanja y además del pilar para la socavación en el UCL.

La incorporación de zanjas se realiza en 2, 3 o 4 fases (Figura 9), dependiendo si se trata de media batea o batea completa, en general el diámetro de la chimenea piloto es de 0.7 a 1.5 m. El secuenciamiento es el siguiente:

1. Desquinche de chimenea piloto.
2. Apertura de canalón.
3. Penúltima fase
4. Última fase.

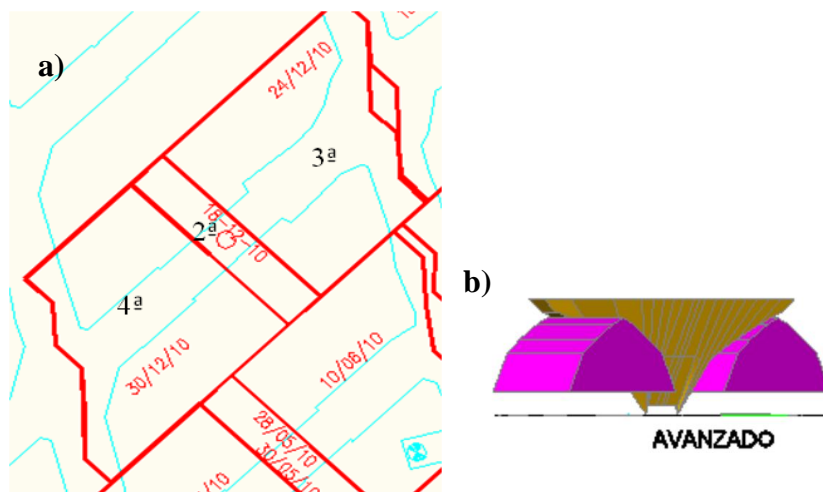


Figura 9. Generación de batea hundimiento avanzado, a) distintas fases con sus días de tronadura. b) diseño de zanja hundimiento avanzado RENO.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se expondrá y analizará la metodología propuesta de tal manera de lograr los objetivos propuestos del presente estudio.

Para caracterizar la sismicidad inducida por las tronaduras de incorporación de área, es necesario seleccionar los eventos sísmicos en un espacio-tiempo cercano a cada tronadura. Los eventos sísmicos aislados deben cumplir con dos condiciones: encontrarse contenidos en un radio esférico con origen en la tronadura y en una ventana de tiempo, antes y después de ésta.

Una vez aisladas las secuencias, se procede con la superposición espacio-tiempo por tipo de tronadura y a ajustar modelos cuyos parámetros caracterizan y resumen la sismicidad inducida por el polvorazo, permitiendo concluir sobre las diferencias presentes en cada tipo de perturbación. A continuación se presenta un diagrama general de la metodología utilizada para caracterizar la sismicidad asociada a las tronaduras (Figura 10).

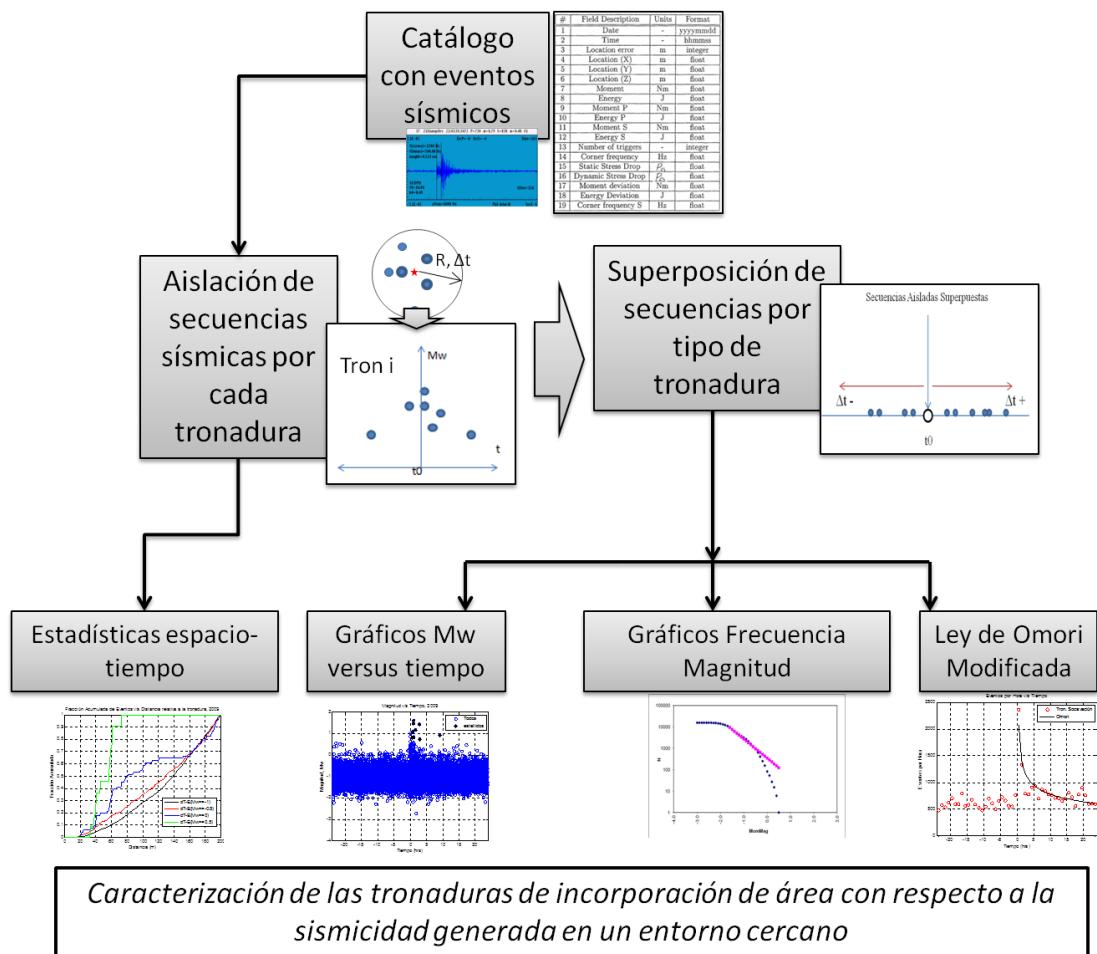


Figura 10. Diagrama ilustrativo de la metodología utilizada para caracterizar la sismicidad asociada a las tronaduras.

Adicionalmente, para clasificar los registros sísmicos es necesario realizar un análisis de ondas sísmicas de tronaduras de manera de construir un catálogo completo con los parámetros sísmicos tanto de eventos sísmicos como de tronaduras de incorporación de área. El análisis de onda no sólo es utilizado para conocer los parámetros de fuente sísmica, sino también para estimar el origen espacial y temporal de las tronaduras de incorporación de área.

Con el catálogo completo es posible ajustar un modelo de regresión logística, el cual permite distinguir tronaduras con respecto a eventos sísmicos mediante la calibración de un umbral óptimo de decisión. A continuación se presenta un diagrama de la metodología empleada para la clasificación de registros sísmicos (Figura 11).

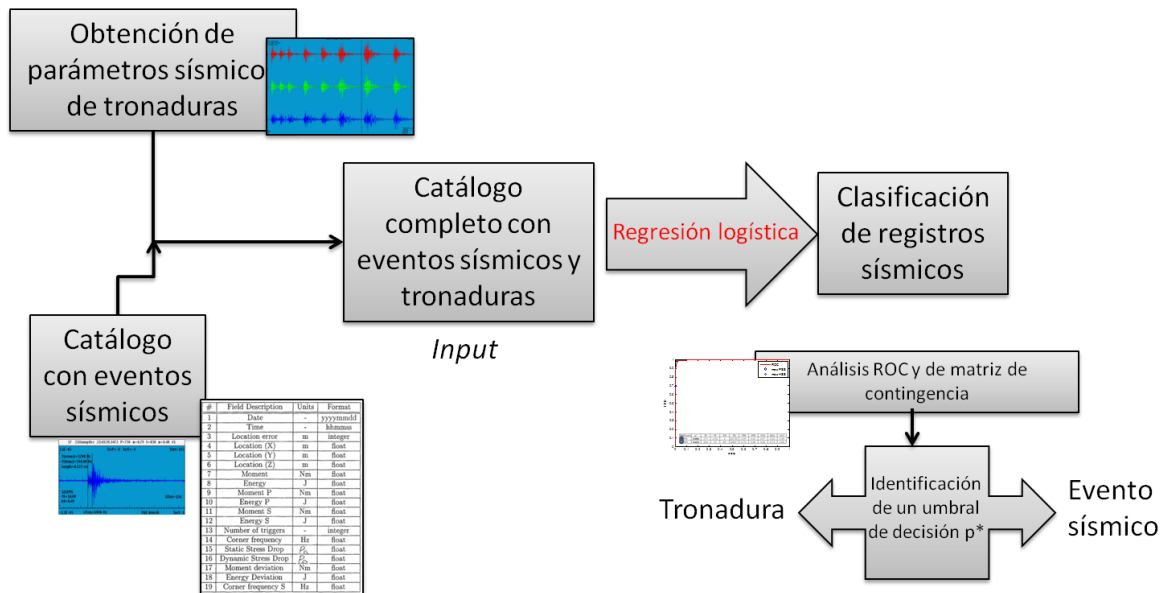


Figura 11. Diagrama ilustrativo de la metodología empleada para la clasificación de registros sísmicos.

3.1. Parámetros sísmicos de tronaduras

El sistema de monitoreo sísmico de mina RENO permite registrar los eventos sísmicos en una base de datos específica los que luego son procesados manualmente por el personal a cargo. Sin embargo, dentro del conjunto de registros existen también las ondas producto de las tronaduras de incorporación de área, las cuales son captadas por la red sísmica pero no son procesadas manualmente por los técnicos en la mina.

Mediante el uso del programa JMETS² [26] en terreno es posible procesar dichos registros y obtener los parámetros sísmicos de las tronaduras más trascendentes y con esto analizar la correlación existente entre dichos parámetros y la tronadura como evento perturbador.

² JMETS: Paquete de software para estimar la localización, deformación inelástica co-sísmica, P, y la energía radiada sísmica, E, entre otras variables, para cada uno evento sísmico.

Es importante mencionar que una de las cosas más importantes para generar el procesamiento de ondas es entender las características de las formas de las onda sísmicas que llegan a los sensores cercanos e identificar correctamente las llegadas de las ondas P y S, con el objeto de garantizar una buena ubicación y cálculo de parámetros de la fuente [27].

Para comenzar el estudio de análisis de ondas es necesario considerar que la anatomía se cualquier sismograma en JMTS presenta los siguientes rasgos (Figura 12):

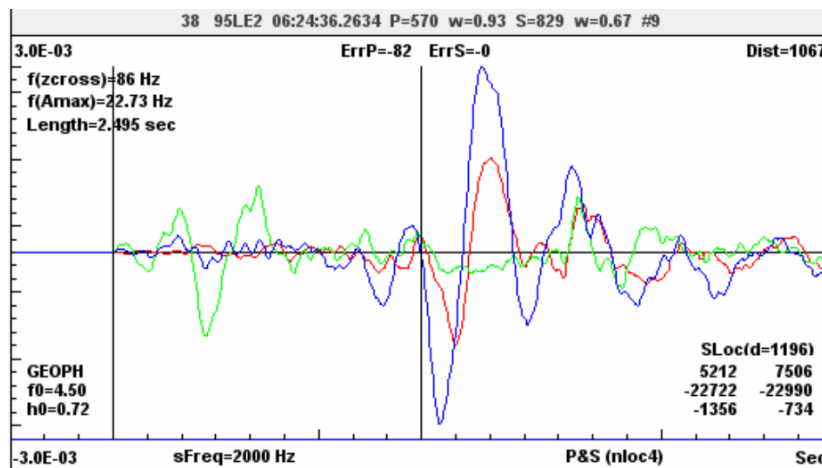


Figura 12. Sismograma genérico representativo (Joughin, 2007).

- El sismograma es identificado por el número de la estación, para el ejemplo anterior es el (38), seguido de la breve descripción del sitio (95LE2) en la barra superior de color gris. El fin de la estación o lugar de activación se indica en la parte superior derecha (#9). Se indica el tiempo de inicio de la selección original de la onda P, seguido por la posición de los picos P (570) y S (829) en el número de muestras desde el inicio del sismograma. También se indican los factores de ponderación (algoritmo de localización) para la onda P ($w = 0,93$) y la onda S seleccionadas ($w = 0,67$).
- La escala de amplitud está representada por el eje vertical. Los parámetros son la velocidad (m/s) para los geófonos y la aceleración de los acelerómetros (m/s^2). La amplitud máxima/mínima ($0,3 \times 10^{-3}$) se indica en la escala del eje vertical. La escala de tiempo está representado por el eje horizontal. La escala se indica en la parte inferior derecha (Sec=segundos) y representa el tiempo entre las marcas mayores. Esto puede cambiar cuando la escala de tiempo es expandida o contraída dependiendo del usuario.
- Las formas de onda x, y y z se indican en rojo, verde y azul respectivamente. Los picos de P y S se indican por las líneas verticales. La frecuencia dominante puede estimarse a partir de la frecuencia de la onda de amplitud máxima ($f(Amax) = 22.73Hz$). La Duración (longitud) es el tiempo transcurrido desde el inicio de la onda P hasta el final de la onda S (2,495 segundos en la Figura 12).

Es siguiente paso considera el procesamiento de las ondas de tronaduras registradas por el sistema. A continuación se presentan los pasos más importantes en el procesamiento de los sismogramas:

1. Primero se genera el despliegue de información a partir del uso de programa JMETS, se busca por día y hora en la que se llevó a cabo la tronadura (Figura 13). Generalmente se tiene una referencia de la hora de la tronadura basándose en los registros que posee mina RENO, los cuales sólo indican el turno en el cual se llevó a cabo la tronadura.



Figura 13. Despliegue de información en JMETS.

2. Se procura considerar las mediciones de onda que posean un alto número de estaciones, por lo general mayor a 13 (Figura 14). Es posible que un número mucho mayor de estaciones o sensores capten realmente la señal desde la fuente, sin embargo, el sistema por defecto registra un máximo de 15.

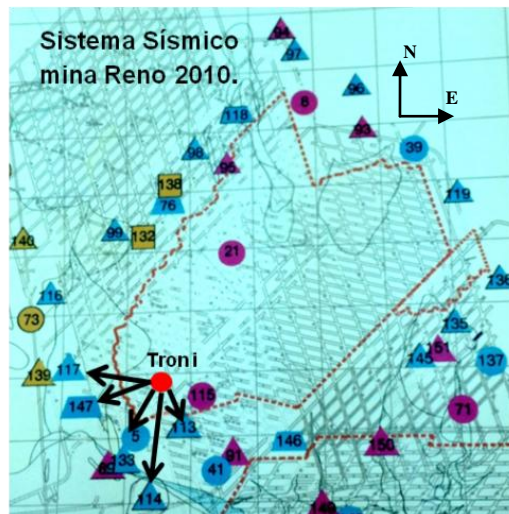


Figura 14. Las estaciones 117, 147, 5, 113, 114, 133, etc., las más cercanas a un polvorazo (Troni) con ciertas coordenadas X (Este), Y (Norte) en mina RENO

- Se debe verificar la cercanía de la tronadura con los sensores que captan la señal, tal que la forma de la onda sea distinta a la de un evento sísmico común, lo anterior se muestra en Figura 15 [28]:

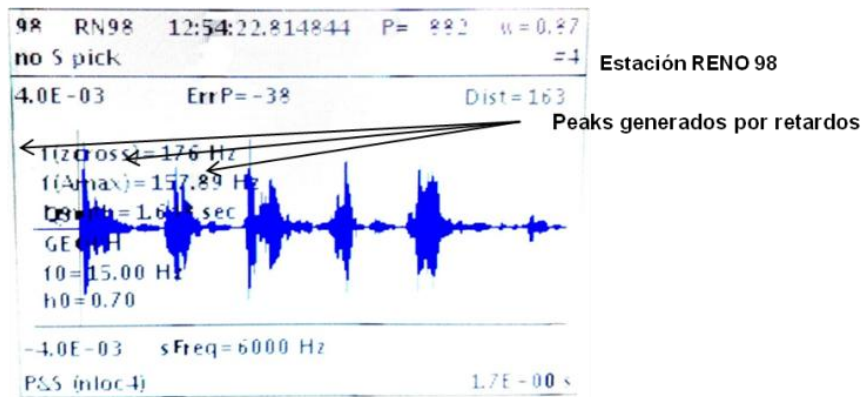


Figura 15. Forma típica de onda generada por una tronadura y captada por un geófono uniaxial (RN 98).

Los retardos en milisegundos del procedimiento de detonación en tronadura son efectivamente visualizados por distintos sismogramas, la cantidad de estaciones que captan la señal depende de la envergadura de la tronadura (m^2 incorporados), para tronaduras grandes pueden existir más de un histograma generado (en tiempos consecutivos con desfase en decimas de segundos), luego se debe procurar escoger la primera llegada de la onda, la cual es fraccionada por el sistema de monitoreo. Lo anterior ocurre debido a que las ondas de tronaduras, a diferencia de las ondas de eventos sísmicos, representan varios pulsos en el tiempo los cuales pueden durar segundos.

- Se procesan todos los sismogramas generados por las estaciones, ubicando la llegada de la primera onda P y S (Figura 16).

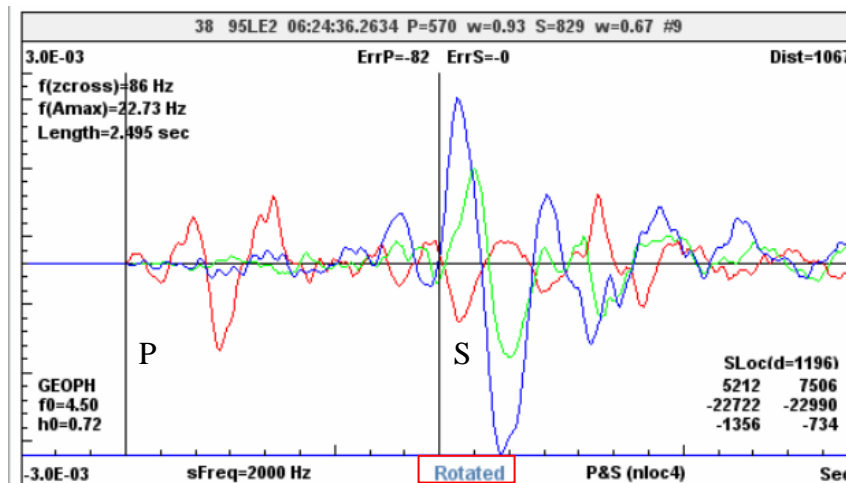


Figura 16. Histograma genérico expandido, rotación de las formas de ondas; x, y, y z (recuadro en rojo).

La Figura 16, muestra la forma en la cual se seleccionan las ondas P y S (sismograma con expansión del tiempo en el eje horizontal), además se observa el procedimiento de rotación, con el cual el sismograma se puede girar de tal manera que el componente que representa la onda P, y los dos componentes de la onda S sean ortogonales (Joughin, 2007), favoreciendo la identificación de llegadas de las ondas P y S.

5. Por último se verifica que las coordenadas que entrega el procesamiento coincidan con las coordenadas de la tronadura seleccionadas con anterioridad del diseño de mina RENO (layout). Entonces se recopilan los parámetros sísmicos de la tronadura.

3.2. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras

Con el objetivo de analizar y conocer lo que ocurre con el espacio-tiempo entre las tronaduras de incorporación de área y entre estas con los eventos sísmicos generados, se utilizan los siguientes procedimientos:

Es posible generar una base de datos de tronaduras que posea los parámetros de localización del hipocentro del polvorazo y los parámetros sísmicos generados a partir del análisis de ondas previamente mencionadas (E, N, Z, t_0, Mo, E, fo , etc.).

Con la base de datos anterior y ordenándolas correlativamente en el tiempo, es posible obtener la distribución acumulada de tiempo y distancias entre tronaduras consecutivas, estas se calculan como sigue:

- Tiempo entre tronaduras: entre tronaduras consecutivas se calcula su diferencia en tiempo tal que $\tau_i = t_i - t_{i-1}$ (Figura 17).

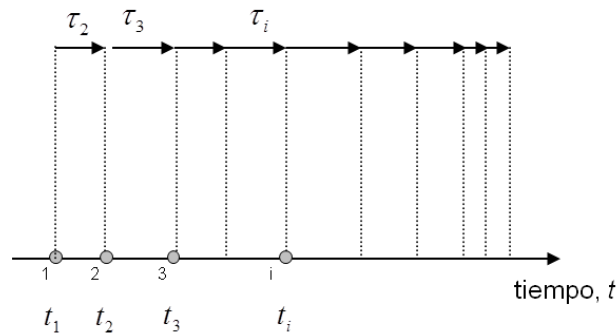


Figura 17. Esquema para el cálculo del tiempo entre tronaduras.

- Distancia entre tronaduras: entre tronaduras consecutivas se calcula su diferencia en distancia, como muestra la Figura 18, tal que:

$$d_i = \sqrt{(E_i - E_{i-1})^2 + (N_i - N_{i-1})^2 + (Z_i - Z_{i-1})^2} \quad (8)$$

Donde:

- E_i, E_{i-1} : Coordenadas este, consecutivas de la tronadura i .
- N_i, N_{i-1} : Coordenadas norte, consecutivas de la tronadura i .
- Z_i, Z_{i-1} : Cotas consecutivas de la tronadura i .

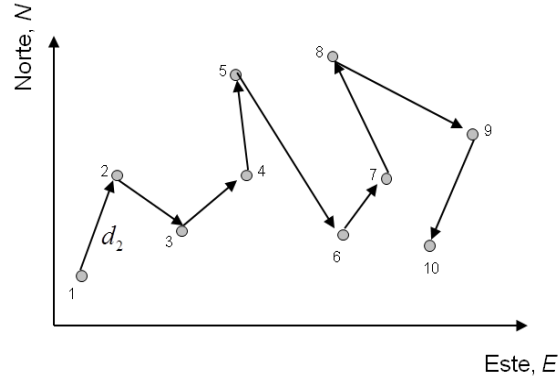


Figura 18. Esquema explicativo en 2D del cálculo de distancia entre tronaduras.

- Luego, se genera una distribución acumulada de τ_i y d_i .

Cabe destacar que la presente metodología se puede extender para el análisis entre tronaduras y eventos sísmicos; de manera tal que τ_i y d_i , serán el tiempo y distancia entre tronaduras y eventos sísmicos, respectivamente. A partir de las distribuciones de distancia y tiempo entre tronaduras es posible escoger un radio de búsqueda (R) y una ventana de tiempo (Δt) que minimicen la superposición entre tronaduras. Estos valores se utilizarán para fijar el espacio-tiempo alrededor de las tronaduras de incorporación de área con el objeto de aislar la sismicidad alrededor de estas.

3.3. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos

La generación de estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos, busca la relación existente entre las tronaduras y eventos de cierta magnitud (Figura 19).

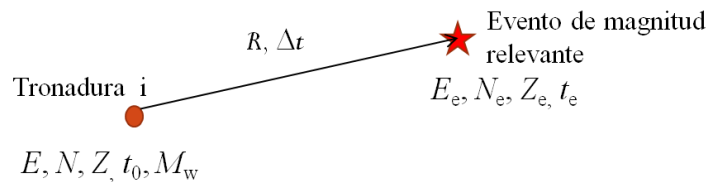


Figura 19. Estadísticas espacio-tiempo entre tronadura y eventos de magnitud relevante. Definición de un espacio-tiempo, junto con los parámetros sísmicos relevantes de las tronaduras y los eventos sísmicos.

Al igual que la sección 3.2, se pretende establecer las distancias y el tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos, con el objetivo de generar las distribuciones acumuladas para cada tipo de tronadura. El análisis anterior permitirá estudiar al agrupamiento en el espacio-tiempo de la sismicidad para distintas magnitudes de corte (M_{WC}).

3.4. Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras

Muchos autores coinciden en la afirmación de que inmediatamente después de un gran evento sísmico/estallido de roca o tronaduras en las minas sísmicamente activas, existe un incremento de corto-plazo en los niveles de la sismicidad, la cual decrece gradualmente a niveles normales [29].

Para aislar la sismicidad alrededor de cada polvorazo, es necesario fijar el espacio-tiempo mediante un radio y una ventana de tiempo de búsqueda de eventos sísmicos, con origen en la tronadura (t_0). A través de la utilización de un R y un Δt es posible seleccionar del espacio-tiempo los eventos sísmicos contenidos en una esfera de radio R , un tiempo antes ($\Delta t-$) y un tiempo después ($\Delta t+$), de cada tronadura.

La determinación de R y de Δt , se genera limitando el espacio-tiempo de manera de minimizar la superposición de tronaduras y maximizar la cantidad de eventos sísmicos de magnitud relevante. La Figura 20, muestra un esquema de la obtención de eventos sísmicos:

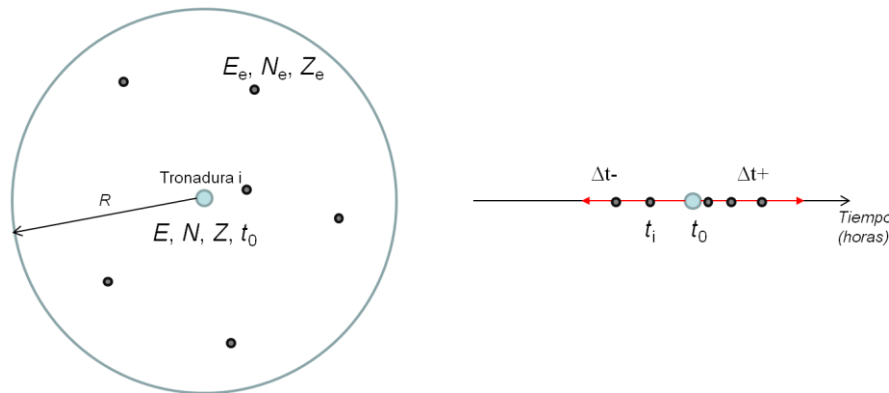


Figura 20. Esquema explicativo de aislamiento de tronaduras y eventos sísmicos, a cierto R y Δt .

Con el objetivo de generar un análisis estadístico que permita caracterizar la sismicidad para cada tipo de tronadura de incorporación de área, es necesario superponer las secuencias sísmicas aisladas. Este método se basa en agrupar los eventos contenidos en las secuencias aisladas por tipo de tronadura con origen en t_0 (Figura 21).

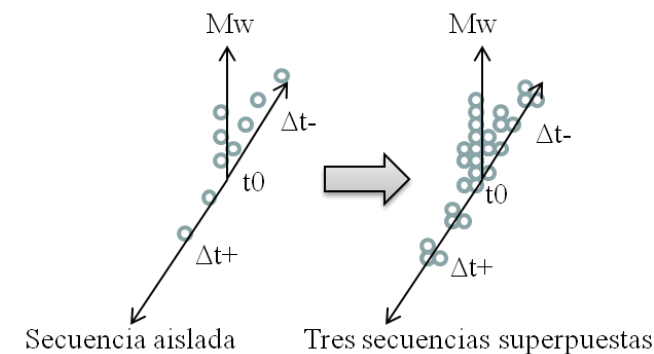


Figura 21. Secuencias aisladas superpuestas por tipo de tronadura.

3.5. Modelos utilizados

3.5.1. Distribución frecuencia magnitud

La ley de Gutenberg-Richter (1944) expresa la relación entre frecuencia de eventos y magnitud (FMD):

$$\log_{10}N = a - bM \quad (9)$$

Donde a y b son parámetros característicos de la sismicidad de la zona y cada tipo de tronadura. Se utiliza la metodología propuesta por Aki (1965) [30] para estimar dichos parámetros mediante máxima verosimilitud. En general, se busca encontrar b que maximiza $\pi_i f(M_{w_i}, b)$, donde la función de densidad de probabilidad anterior es la siguiente:

$$f(M_w, \beta) = \beta e^{-\beta(M_w - M_{wc})}, \quad M_{wc} \leq M_w \quad (10)$$

Donde β se define como:

$$\beta = b / \log_{10}e \quad (11)$$

La variable M_w corresponde a la magnitud de la sismicidad, M_{wc} es la magnitud de corte considerada, a partir de la cual, todos los eventos sísmicos son registrados consistentemente.

Los parámetros a y b se estiman para la superposición de las secuencias sísmicas para cada tipo de tronadura; socavación, batea normal y batea alta. Esto se realiza para la ventana de tiempo antes y después de t_0 (tiempo origen de la tronadura). Adicionalmente se generan gráficos de frecuencia acumulada versus el momento magnitud (Figura 23).

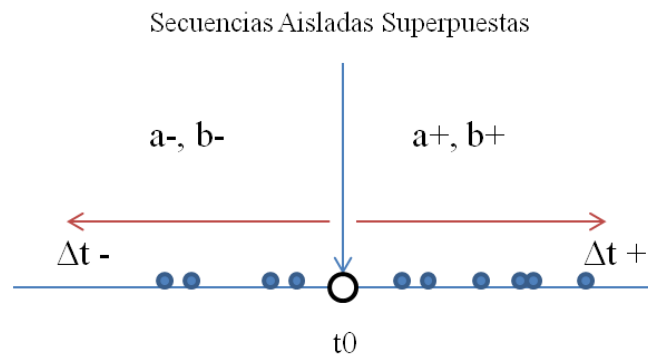


Figura 22. Esquema de metodología para la estimación de parámetros a y b antes y después de t_0 para cada tipo de tronadura.

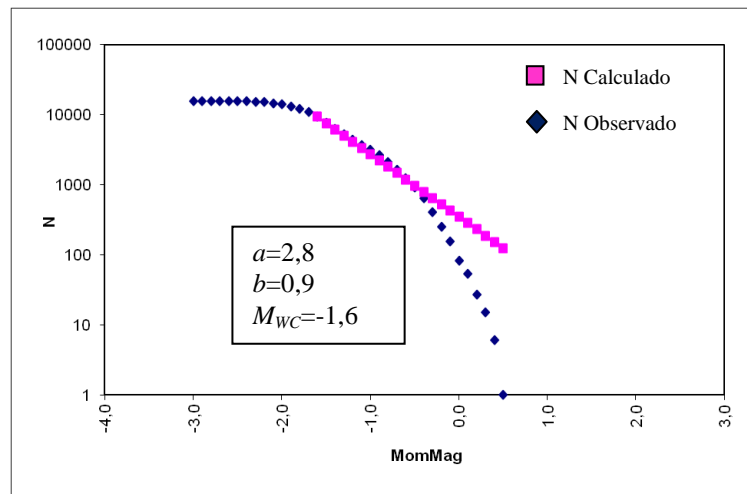


Figura 23. Ejemplo de gráfico frecuencia acumulada-magnitud momento observado y calculado para una secuencia sísmica.

La ecuación (9), supone que la frecuencia acumulada de eventos sísmicos es una función de la magnitud, donde N es el número de eventos mayores iguales a M_{WC} . La constante a es una medida de la tasa de sismicidad y proporciona el logaritmo del número de eventos con magnitudes mayores que M_{WC} en la región y ventana de tiempo especificada. El valor de b es una razón entre los eventos grandes y pequeños, en general tiene valores entre 0,8 y 1,2 [31] y para el caso de sismos relacionados con la actividad minera su valor puede variar entre $0,5 < b < 1,5$ [32].

Según Hudyma (2007), el valor de b para grandes poblaciones de eventos sísmicos es típicamente muy cercano a 1. Esta relación es cierta para grandes subconjuntos de datos, en el caso de la generación del análisis de un clúster de eventos sísmicos individual el valor b puede variar mucho, dependiendo del mecanismo de la actividad sísmica.

La sismicidad relacionada con el deslizamiento de fallas tiene con frecuencia un valor de b muy bajo (a menudo menor a 0,8). Por su parte la sismicidad como resultado del cambio estrés (asociada directamente con variaciones de esfuerzo por tronadura) tiene con frecuencia un valor b en el rango de 1,2 a 1,5 (Legge & Spottiswoode, 1987; Hudyma et al, 1995) [33-34].

La hipótesis anterior es mencionada igualmente por Heal et. al. (2004), los cuales indican que las tronaduras masivas (por ejemplo; las de un caserón o las que se llevan a cabo en procesos de socavación) provocan una redistribución de los esfuerzos. Estos cambios de esfuerzo pueden resultar en una falla significativa del macizo rocoso. Cuando se produce dicha falla, se pueden generar eventos sísmicos, los cuales decaen en cuestión de horas [35].

Para Mendecki (1999), el valor b se puede ver influenciado por las siguientes características: la rigidez es decir, la capacidad para resistir la deformación con el aumento del esfuerzo, el nivel de esfuerzo y la heterogeneidad del macizo rocoso [36].

Una estimación de la desviación estándar de b , se obtiene mediante la ecuación propuesta por Shi & Bolt (1982):

$$\Delta b = 2,3b^2 \sqrt{\frac{\sum_i (M_{wi} - \bar{M}_w)^2}{n(n-1)}} \quad (12)$$

Donde M_{wi} es la magnitud, \bar{M} es la magnitud promedio de los eventos sísmicos con $M_{wc} \leq M_{wi}$ y n es el número de eventos correspondiente a M_{wc} .

Por otro lado, la calidad del ajuste se estima como la diferencia absoluta del número de eventos en cada contenedor de magnitud de eventos³ entre los observados y los calculados:

$$R = 1 - \frac{\sum_{M_i}^{M_{max}} |B_i - S_i|}{\sum_i B_i} \quad (13)$$

Donde B_i y S_i son el número acumulado de eventos observados y calculados en cada contenedor de magnitud, M_i y M_{max} es la magnitud mínima y máxima de la muestra, respectivamente. La distribución se normaliza dividiendo por el número total de eventos observados.

3.5.2. Ley de Omori Modificada

Seguido de un evento principal (tronadura/estallido de roca), la tasa de ocurrencia de réplicas $n(t)$ disminuye con el tiempo como función de una ley de potencia (Omori, 1894; Utsu, 1961) [37-38], conocida como ley de Omori modificada (MOL):

$$n(t) = \frac{K}{(c+t)^p} \quad (14)$$

Donde t es el tiempo medido desde el evento principal, c es un tiempo de desviación constante, p es un parámetro relacionado con la velocidad de decaimiento, y K es un parámetro de productividad en relación con el número de eventos que ocurren en un período de tiempo $[T_A, T_B]$ y los otros dos parámetros, luego:

³ **Contenedor de magnitud de eventos:** Intervalo numérico correspondiente a la magnitud, en el cual se contabiliza la cantidad de eventos que se encuentran dentro de éste, para el análisis se considera un valor de 0,1.

$$K = \begin{cases} \frac{N_{T_B-T_A}}{\ln \frac{(T_B+c)}{(T_A+c)}} & , \quad p = 1 \\ \frac{N_{T_B-T_A}(1-p)}{[(T_B+c)^{1-p} - (T_A+c)^{1-p}]} & , \quad p \neq 1 \end{cases} \quad (15)$$

Según Vallejos & McKinnon (2009), la ley anterior corresponde a un ajuste estadístico de funciones a los patrones observables de secuencias sísmicas, la cual además de explicar la física del proceso tiene una alta aplicabilidad en el área [39].

El comportamiento de ley de potencia de la ecuación (14) es indicativo de un proceso físico general más lento que las que normalmente se observa en la naturaleza, que por lo general se describen por exponenciales negativos (Utsu et al., 1995) [40]. El parámetro p difiere de secuencia a secuencia, con un intervalo típico de 0,6-1,6 y un valor medio de 1,1 (Utsu et al., 1995). Utilizando un estado de velocidad dependiente de un modelo de resistencia de falla, Dieterich (1994) indicó que un $p > 1$ pueden surgir cuando los esfuerzos sobre la superficie de falla disminuye con el tiempo después del evento principal [41].

La existencia de un valor c y su significado físico aún son objeto de debate (Enescu e Ito, 2002) [42]. La inclusión de c es esencialmente un artificio matemático para evitar la singularidad de la ecuación de MOL para $t=0$ (Gross y Kisslinger, 1994; Narteau et al, 2002) [43-44]. Específicamente para mina RENO, Cornejo & Landeros (2011) ajustan la ley de Omori a secuencias superpuestas por tipo de tronadura, encontrando valores de p para tronaduras de socavación de 0,833 y para tronaduras de batea alta de 1,22; utilizando radios de aislación de sismicidad entre 80 a 100 m y una ventana de tiempo de 24 hrs antes y después de cada tronadura [45].

Si los tiempos de ocurrencia t_i ($i=1, \dots, N$) de eventos individuales se encuentran disponibles en el intervalo de tiempo $[T_A, T_B]$ antes mencionado, entonces los parámetros K , p , c , pueden ser estimados mediante máxima verosimilitud (Ogata, 1983) [46]. Suponiendo que todos los eventos en una secuencia de réplicas son condicionalmente independientes y distribuidos de acuerdo con un proceso de Poisson no estacionario con función de intensidad dada por la ecuación (14), la función log-verosimilitud viene dada por:

$$\ln L(K, p, c, T_A, T_B) = N \ln K - p \sum_{i=1}^N \ln(t_i + c) - KA(p, c, T_A, T_B) \quad (16)$$

Donde:

$$A(p, c, T_A, T_B) = \begin{cases} \ln(T_B + c) - \ln(T_A + c) & , p = 1 \\ \frac{[(T_B + c)^{1-p} - (T_A + c)^{1-p}]}{1 - p} & , p \neq 1 \end{cases} \quad (17)$$

Entonces los parámetros K , p , c estimados mediante máxima verosimilitud maximizan la ecuación (16).

Por otro lado, para el presente estudio se considerará la superposición de secuencias sísmicas por tipo de tronadura, a partir de la cual se ajustará la ley de Omori modificada. El valor de p ha sido ampliamente estudiado y es factible obtenerlo a partir de secuencias sísmicas superpuestas en el tiempo con valores generalmente mayores a 0,6 [47]. El cálculo de los parámetros K , p , c , se llevará a cabo variando los valores de R y T_B para conocer el comportamiento de dichos parámetros con respecto a la ventana de tiempo escogida y el radio de búsqueda.

La curva de decaimiento temporal del número de eventos en un intervalo de tiempo $[T_A, t]$ nace del cálculo de la integral representada en la ecuación (18), dada por:

$$N_{[t, T_A]} = \int_{T_A}^t n(t) dt = \begin{cases} K \ln \frac{(t + c)}{(T_A + c)} & , p = 1 \\ \frac{K}{1 - p} [(T_B + c)^{1-p} - (T_A + c)^{1-p}] & , p \neq 1 \end{cases} \quad (18)$$

Mediante la fijación de un rango del intervalo de tiempo $[T_A, t]$ a un período de tiempo determinado:

$$t - T_A = \Delta t \quad (19)$$

Reemplazando la ecuación (19) en la (18):

$$N_{[t, t-\Delta t]} = \begin{cases} K \ln \frac{(t + c)}{(t - \Delta t + c)} & , p = 1 \\ \frac{K}{1 - p} [(t + c)^{1-p} - (t - \Delta t + c)^{1-p}] & , p \neq 1 \end{cases} \quad (20)$$

La ecuación (20), representa el número de eventos que ocurren en el tiempo t durante la ventana de tiempo anterior Δt .

Una aplicación de la función de máxima verosimilitud se basa en la selección del modelo estadístico basado en el Criterio de Información de Akaike (*AIC*), dado por (Akaike, 1974):

$$AIC = -2 \max\{\ln L(K, p, c, T_A, T_B)\} + 2n_p \quad (21)$$

Donde n_p es el número de parámetros ajustables del modelo y $\ln L(K, p, c, T_A, T_B)$ es la función de máxima verosimilitud. El *AIC* se puede utilizar para comparar diferentes tipos de modelos que posean distinto número de parámetros y teniendo el mínimo valor para el mejor modelo ajustado.

Para la elección del mejor modelo a cierta ventana de tiempo y radio de análisis se tienen los siguientes procedimientos:

1. Para los eventos sísmicos que se encuentran en $T_B = t^* \geq t \geq T_A = 0$ y a cierto R , se evalúan los parámetros de Omori según máxima verosimilitud junto con la función de máxima verosimilitud y el *AIC* con un $n_p = 3$. Se obtiene el *AICo* correspondiente al modelo $no(t)$ de Omori para cada t^* y R .
2. Para los eventos sísmicos que se encuentran en $T_B = 24\text{hrs} \geq t > t^*$ y a cierto R , se asume un modelo constante imponiendo $p=0$, es decir, $nc(t)=K$, con $K=N/(T_B - t^*)$. Luego la función de verosimilitud se define como: $\ln L = N \ln K - N$ y se evalúa el *AICc* con un $n_p = 1$. Este modelo corresponde al resto de sismicidad para cada t^* y R .
3. La suma de *AICo* y *AICc* corresponde a *AIC1* para cada caso.
4. Se calcula *AIC2* correspondiente al modelo de Omori completo en una ventana de tiempo de 24 hrs y un $R=200\text{m}$, con el fin de compararlo con *AIC1*.

Se escogerá el mejor modelo ajustado a partir del mínimo valor de *AIC1* variando la ventana de análisis y el radio de búsqueda (Figura 24).

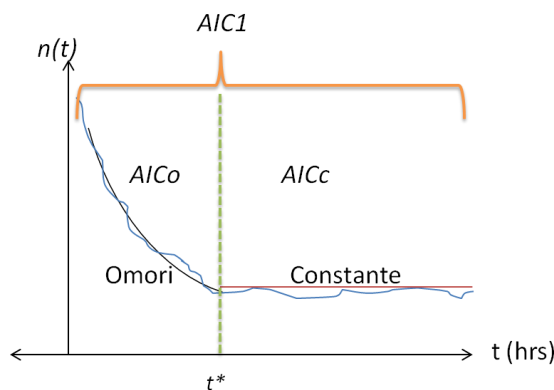


Figura 24. Representación del procedimiento de ajuste de un modelo constante y Omori.

Cabe destacar que las metodologías de las secciones anteriores 3.5.1 y 3.5.2, poseen directa relación con los procedimientos ampliamente estudiados por Vallejos (2010) en la sección metodológica de su tesis de doctorado [48].

3.6. Clasificación de registros sísmicos

La metodología utilizada se basa en el estudio realizado por Vallejos & McKinnon (2013) [49], el cual propone de manera general la utilización de regresión logística con el objeto de clasificar los registros sísmicos de dos minas en Ontario, Canadá. En general la metodología comprende el siguiente procedimiento para el ajuste:

- i. Se consideran todas las variables posibles para ajustar un modelo. Se debe trabajar con el logaritmo de las variables que presentan distribución logarítmica.
- ii. Se genera el test de hipótesis χ^2 para cada variable. Si el valor $\text{prob} > \chi^2$ obtenido es menor a 0,05 (valor escogido por defecto) es posible aceptar la hipótesis de que las constantes son significativas [50].
- iii. Se elimina la variable con mayor valor $\text{prob} > \chi^2$, siempre que éste sea mayor a 0,05. Se repite el paso i, hasta que todas las variables que queden en el análisis sean significativas.

Mediante la utilización de parámetros sísmicos es posible ajustar un modelo y verificar su desempeño. Adicionalmente, se debe estimar la cantidad de registros necesarios para que el modelo sea robusto. Esto se logra aplicando el procedimiento anterior para poblaciones incrementales registros y hasta determinar el punto donde el modelo se estabiliza.

A continuación se presentan las herramientas estadísticas utilizadas para el análisis.

3.6.1. Regresión logística

La regresión logística fue propuesto como una alternativa de modelamiento a finales de 1960 y principios de 1970 (Cabrera, 1994), y se incluyó en rutinas disponibles en paquetes estadísticos a principios de 1980. El concepto matemático que subyace en el centro de la regresión logística es la utilización del logaritmo Logit [51].

El alto grado de variabilidad y el carácter dinámico del entorno en minería subterránea se prestan para éste método y para un tratamiento probabilístico. La regresión logística permite la determinación de la confianza en las predicciones o las decisiones de diseño que se han hecho utilizando métodos empíricos. Se aplica un grado de rigor matemático o estadístico para estos métodos empíricos en la ausencia de pruebas matemáticas [52].

Para el caso en el que existen sólo dos resultados, como un sí o un no o una pregunta, estas respuestas se denominan respuestas binarias. Cuando la variable de respuesta es nominal, no hay un orden natural entre las categorías de la variable de respuesta.

En caso del presente estudio, cómo se pretende conocer la probabilidad de que un acontecimiento sea una tronadura con respecto a un evento sísmico es posible utilizar un modelo Logit nominal.

La Figura 25, presenta una representación de las predicciones del modelo para un parámetro x , que puede ser cualquier variable, desde un parámetro sísmico, el área socavada o presencia estructura geológica. Este esquema asume que a partir de cierto valor del parámetro sísmico x el tipo de evento comienza a clasificarse como tronadura.

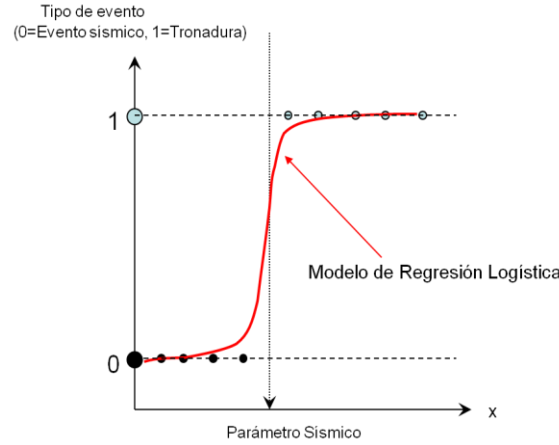


Figura 25. Representación de la respuesta de un modelo de regresión logística.

El modelo Logit explica el riesgo relativo de estar en una categoría frente a ser la categoría de referencia k , usando una combinación lineal de variables predictivas. En consecuencia, la probabilidad de cada resultado se expresa como una función no lineal de n variables de predicción [53].

A continuación se presentan las expresiones matemáticas que permiten calcular un modelo capaz de incorporar variables independientes (predictivas) y la probabilidad asociada a su cálculo.

$$\ln\left(\frac{\pi_{k-1}}{\pi_k}\right) = \alpha_{(k-1)} + \beta_{(k-1)1}X_1 + \beta_{(k-1)2}X_2 + \dots + \beta_{(k-1)n}X_n \quad (22)$$

Donde n es el número de variables predictivas, k el número de categorías. El total de $j-1$ ecuaciones se resuelven simultáneamente para estimar los coeficientes utilizando los mínimos cuadrados del algoritmo iterativo para encontrar las estimaciones de máxima verosimilitud.

Sea $\pi_j = P(Y = j)$ es la probabilidad de un resultado de estar en categoría j y su expresión genérica se expresa a continuación:

$$\pi_j = P(Y = j) = \frac{e^{\alpha + \sum_{l=1}^p \beta_{jl}x_l}}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} e^{\alpha + \sum_{l=1}^p \beta_{jl}x_l}}, \quad j = 1, \dots, k - 1 \quad (23)$$

Para el caso del presente informe se consideran dos categorías y n variables, luego se tiene que: $j=1, k=2, l=1, \dots, n$. La categoría de referencia corresponde a que el acontecimiento sea un evento sísmico, y la categoría j es que sea tronadura.

El modelo se basa efectivamente en considerar la mayor cantidad de variables predictivas con el objeto de caracterizar la tronadura y efectivamente estimar la probabilidad de que el acontecimiento sea una tronadura. Particularmente se considera la sismicidad contenida en el historial sísmico de mina RENO, sin filtrar por espacio o tiempo.

3.6.2. Desempeño del estimador-Análisis ROC

Un gráfico Receiver Operating Characteristics (ROC) es un técnica para visualizar, organizar y seleccionar clasificadores basados en su desempeño. Para el caso del presente estudio se utilizará un sistema de clasificación que utiliza sólo dos clases, por lo que para el presente modelo clasificador, existen cuatro posibles escenarios. Si el acontecimiento es positivo y se clasifica como positivo, se cuenta como un verdadero positivo (TP), mientras que, si se clasifica como negativo, se cuenta como falso negativo (FN). Si la instancia es negativa y se clasifica como negativo, se cuenta como un verdadero negativo (TN), mientras que, si se clasifica como positivo, se cuenta como un falso positivo (FP) [54]. Dado un clasificador y un conjunto de instancias es posible construir la matriz de contingencia mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de contingencia y métricas comunes de desempeño (Fawcett, 2005).

		<u>True class</u>			
		p	n		
<u>Hypothesized class</u>	Y	True Positives	False Positives	$fp\ rate = \frac{FP}{N}$	$tp\ rate = \frac{TP}{P}$
	N	False Negatives	True Negatives	$precision = \frac{TP}{TP+FP}$	$recall = \frac{TP}{P}$
Column totals:		P	N	$accuracy = \frac{TP+TN}{P+N}$	$F\text{-measure} = \frac{2}{1/precision+1/recall}$

Se definen la tasa de verdaderos positivos (TPR), la tasa de falsos positivos (FPR), y la exactitud (ACC) mediante:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} ; FPR = \frac{FP}{FP + TN} ; ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (24)$$

Se tiene que el clasificador es perfecto si $TPR = ACC = 1$, y el $FPR = 0$. Se definen las métricas de desempeño (skill scores) mediante:

$$HSS = \frac{2(TP * TN - FP * FN)}{(TP + FN)(FN + TN) + (TP + FP)(FP + TN)} ; PSS = TPR - FPR \quad (25)$$

Donde *HSS* y *PSS* son los skills scores Heidke y Peirce respectivamente [55-56]. Estas métricas ofrecen una comparación directa entre el método utilizado y uno random, adquiriendo valores entre -1 y 1. Valores iguales a 1, 0 y -1, indican que el método utilizado es perfecto, random, o peor que random, respectivamente.

Mediante la examinación de la matriz de contingencia y la maximización de las métricas de desempeño (skills scores), es posible encontrar un umbral de decisión óptimo que permita optimizar la precisión de la clasificación del modelo determinado.

La curva ROC es una representación gráfica en dos dimensiones de verdaderos positivos (*TPR*) trazados en el eje Y, como función de la tasa de falsos positivos (*FPR*) en el eje X. El área bajo la curva ROC (*AUC*) toma valores entre 0 y 1. Mientras más cercana a 1 indica un mejor desempeño del clasificador. El *AUC* resulta fácil de estimar mediante el método de trapezoides en cualquier programa computacional [57].

4. RESULTADOS

4.1. Parámetros sísmicos de tronaduras

Los parámetros sísmicos de la fuente normalmente no se determinan en el dominio del tiempo ya que es una tarea muy difícil de realizar, es por esto que la serie de tiempo se transforma al dominio de la frecuencia, utilizando una transformada de Fourier. Los modelos de fuente requieren de un pequeño número de parámetros para describir adecuadamente la fuente. Las observaciones en el campo lejano se pueden utilizar para estimar dichos parámetros (Joughin, 2007).

En la búsqueda de encontrar un modelo a partir de parámetros sísmicos, se hace fundamental el origen de éstos. Mina El Teniente no posee un procesamiento manual (por el personal del sistema de monitoreo) de los sismogramas generados por las tronaduras, por lo tanto el cálculo de los parámetros es automático, y por ende muchas veces dista de un valor confiable. Las señales de ondas procesadas automáticamente son simplemente almacenadas, por lo que fue necesario reprocesar los registros de señales de ondas de tronaduras manualmente.

La mayor parte de la metodología fue expuesta anteriormente en la sección 3.1, en este subcapítulo se analizarán casos particulares, y se profundizará en el procesamiento de señales.

4.1.1. Análisis de señales de ondas de tronaduras

El procesamiento manual de ondas se realiza mediante la utilización del programa JMTS. El despliegue de información se logra seleccionando la fecha en la cual se lleva a cabo el polvorazo que se pretende encontrar. El horario en un principio es una estimación del t_0 original, el cual es considerado a priori 15 minutos antes del término de cada turno. Si bien dicho valor oscila cerca del t_0 real, existen tronaduras que efectivamente se encuentran incluso entre 8 a 16 hrs antes o después del polvorazo, es decir, en un turno distinto al registrado por el área de perforación y tronadura de mina RENO.

Los desfases antes mencionados, que corresponden a 44 de un total de 380 tronaduras (registro desde comienzos del 2009 a fines del 2010), pueden representar un error inicial en la calibración de los modelos propuestos. Por lo anterior se decide realizar un análisis manual de las ondas de tronaduras, con el objeto de encontrar los parámetros sísmicos de estas, junto con un valor más confiable de t_0 .

Una etapa crucial en el procedimiento propuesto, es la selección de los tiempos de llegadas de las ondas P y S. Encontrar la llegada exacta de dichas ondas implica efectivamente que la medición de parámetros de la fuente sísmica es confiable. Estas variables medidas son determinadas a

partir de la manipulación matemática de los sismogramas procesados (identificando P y S) y por ende su selección debe estar en lo posible libre de errores.

La liberación energética de estas ondas mecánicas es bastante alta, en algunos casos es imperceptible la llegada de la onda S, la cual representa el corte (onda transversal) de la señal. Ambas ondas dependen de las características del material y de las propiedades geométricas del medio. La onda P es registrada primero debido a que es más veloz que la onda S, la selección de ambas se presenta a continuación mediante un ejemplo real obtenido de la manipulación manual de los registros sísmicos de tronaduras (Figura 26):

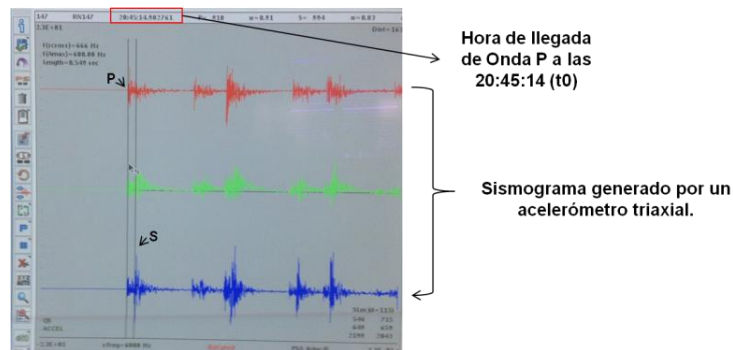


Figura 26. Sismograma típico de una Tronadura de incorporación de área, identificación de ondas P y S. La componente de la onda P es de color rojo y las componentes verticales y horizontales de la onda S son de color verde y azul, respectivamente

Cabe destacar de la figura anterior que se utilizó un procedimiento de rotación y polarización de la onda, por lo general la onda P se encuentra polarizada en la dirección de la fuente (Figura 27.a), por su parte la llegada de la onda S, se alinea perpendicular a la dirección de la fuente (Figura 27.b).

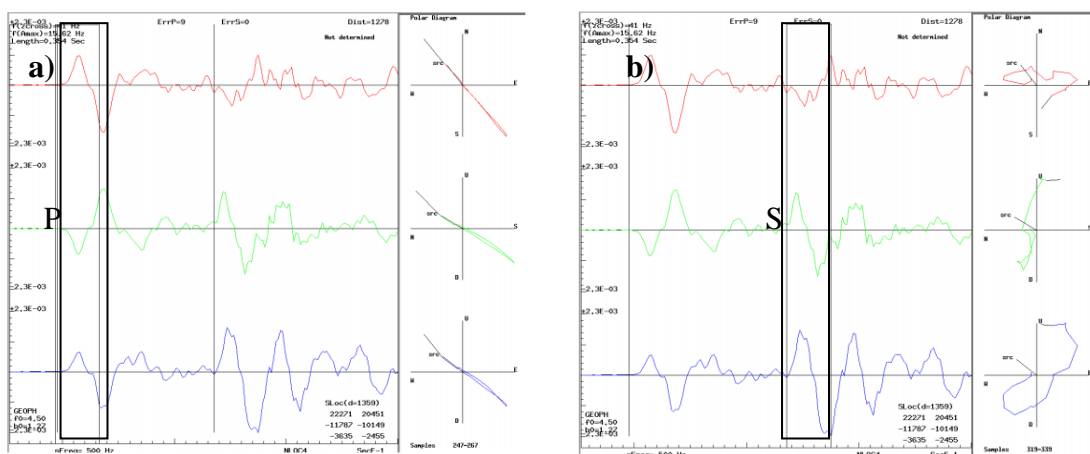


Figura 27. Polarización; a) onda P, b) onda S.

Luego, del procesamiento de la onda es posible obtener t_0 , y los parámetros más importantes de la fuente. El algoritmo interno obtiene dentro de otras variables la ubicación del hipocentro, la energía radiada, el momento sísmico, la frecuencia esquinada, etc.

Otras consideraciones con respecto a la metodología para reconocer una onda de tronadura, es que por lo general la cantidad de estaciones que registran la señal es alta, por defecto para el programa un alto número de estaciones es 15 aunque su valor real puede superar los 30 registros. Lo anterior, considera que el valor de N es sólo de referencia, dicho esto entonces no se puede utilizar como variable en el modelo de regresión logística.

Es necesario mencionar que efectivamente las estaciones que están más cerca de la fuente son los que registran de mejor manera la llegada de las ondas de las tronaduras, la selección de las ondas P y S se lleva a cabo para todos los sismogramas que captan la señal. También es posible desechar los registros de estaciones que se encuentran muy lejos de la fuente ya que estas por lo general distorsionan la localización del origen en el algoritmo de cálculo. Entonces lo complejo del procedimiento es que se deben tener mediante inspección visual la correcta selección de las ondas P y S, considerando las estaciones cercanas a la fuente que generan un sismograma particular.

Los parámetros sísmicos son entonces la solución final, de la consideración de N estaciones cercanas a la fuente, cada una procesada de manera particular. Por último se compara el origen, basado en información del layout de mina RENO que contiene la información correspondiente al diseño minero en formato (.dwg), con el entregado por el procesamiento de los registros con el programa JMTS. Si la diferencia es muy pequeña entonces se detiene la búsqueda de la señal ya que el registro a posteriori corresponde originalmente a una tronadura de incorporación de área en mina RENO. A continuación se muestra una figura con un ejemplo de aplicación del procedimiento:

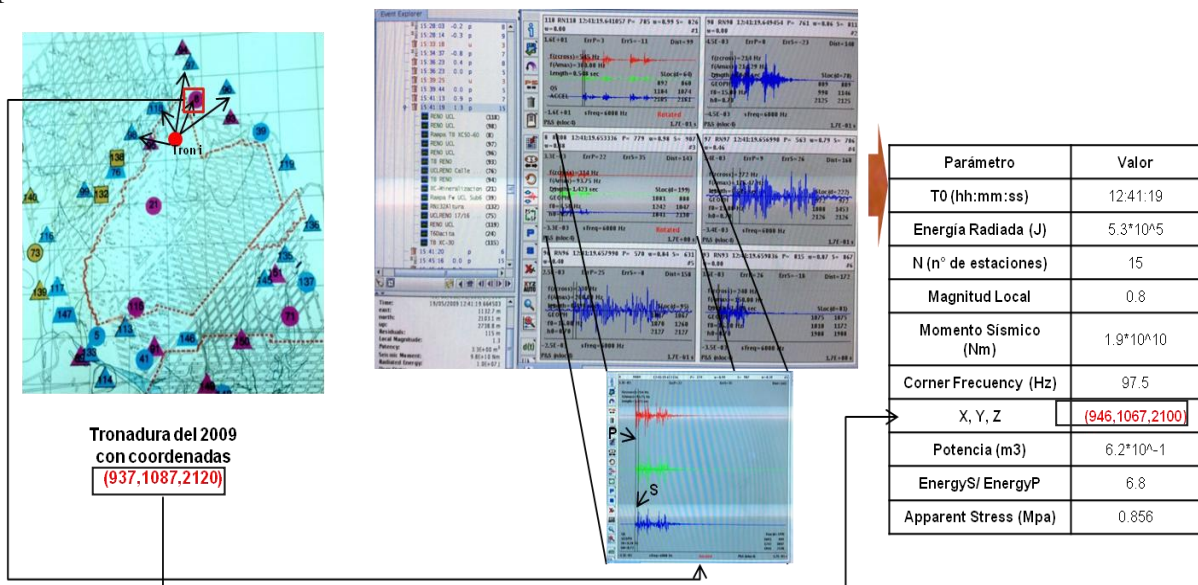


Figura 28. Ejemplo de procedimiento utilizado, coordenadas de la tronadura marcadas con color rojo coinciden.

De la Figura 28, es posible observar que el origen de la tronadura calculado previamente (utilizando AutoCad⁴ para la visualización del layout) coincide con el entregado por el procesamiento, como parámetros sísmicos de la ubicación de hipocentro. El algoritmo de cálculo interno del programa entrega los parámetros sísmicos más importantes una vez procesada la totalidad de los sismogramas que captaron la onda mecánica. En la Tabla 3, se muestran los parámetros sísmicos obtenidos:

Tabla 3. Parámetros sísmicos obtenidos del análisis de onda de tronaduras.

Símbolo	Nombre	Unidades
t_0	Tiempo en el cual se genera la tronadura	[hh:mm:ss]
E	Energía radiada	[J]
N	Número de estaciones	-
M_L	Magnitud local	-
M_o	Momento sísmico	[Nm]
f_o	Frecuencia esquina	[Hz]
X	Coordenada en dirección este	[m]
Y	Coordenada en dirección norte	[m]
Z	Elevación o cota	[m]
P	Potencia	[m ³]
E_s/E_p	Razón entre la energía S y la energía P	-
σ_A	Esfuerzo aparente	[MPa]
r	Radio de ruptura	[m]
$\Delta\sigma$	Caída de esfuerzo estático	[Pa]
VA	Volumen aparente	[m ³]

4.1.2. Estadísticas generales del análisis de ondas

En esta sección se expondrán las estadísticas generales obtenidas del procesamiento de las señales de ondas correspondientes a 380 tronaduras de incorporación de área en mina RENO, para los años 2009-2010.

Cabe destacar que las tronaduras generan señales mecánicas particulares, lo anterior debido a que corresponden a esfuerzos dinámicos inducidos por; la detonación y de los gases en expansión, desempeñando un papel importante en el proceso de fragmentación (Hoek, 2004) [58]. La cantidad de explosivo, el diseño de perforación y tronadura, y la geometría del pilar o zanja tronado, etc., puede influenciar la señal propagada en el espacio, caracterizando aún más los parámetros de fuente.

⁴ **AutoCad**: es un software de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones.

Las estadísticas generales son presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 4. Estadísticas generales de parámetros sísmicos de tronaduras de incorporación de área, 2009-2010.

Estadístico	E	N	M_L	M_o	f_o	Es/Ep	σA	r	$\Delta\sigma$	VA
\bar{X}	197.158	14	0,6	1,47E+10	92	108	0,6	18	2.216.998	227.373
σ	340.362	1	0,3	1,59E+10	54	547	1,6	12	5.381.954	2.436.312

Por otro lado es posible separar por tipo de tronadura sus distribuciones acumuladas versus M_o , M_w y E (Figura 29 a), b) y Figura 30). Se observa que todas las tronaduras cubren un rango similar de M_o y E .

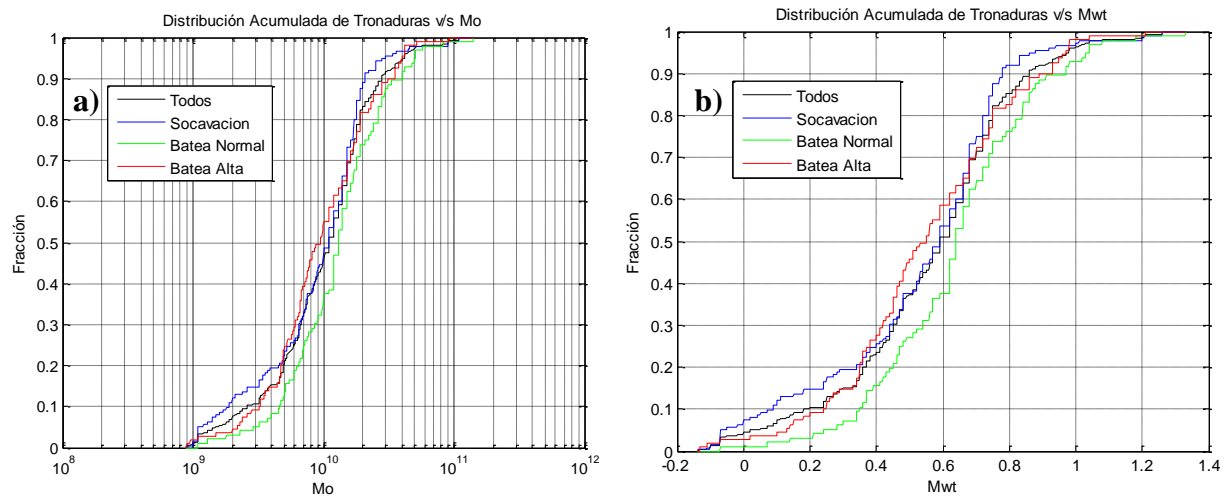


Figura 29. a) Distribución acumulada de tronaduras versus momento sísmico, b) distribución acumulada de tronaduras versus momento magnitud de las tronaduras, años 2009-2010.

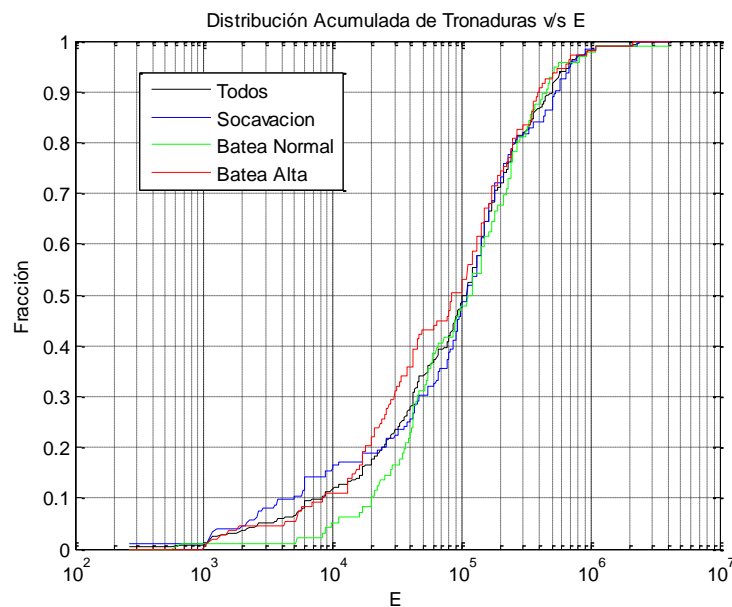


Figura 30. Distribución acumulada de tronaduras versus energía radiada, años 2009-2010.

4.2. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras

Las 380 tronaduras de incorporación de área presentan la siguiente distribución en categorías:

Tabla 5. Distribución de tipos de tronaduras de incorporación de área.

Tipo Tronadura	Turno	2009	2010	Total
Batea Alta	A	34	14	48
	B	16	39	55
	C	2	4	6
Batea Normal	A	9	11	20
	B	20	50	70
	C	3	3	6
Socavación	A	47	14	61
	B	48	53	101
	C	9	4	13
Total		188	192	380

Para estudiar cómo interactúan las tronaduras en espacio y tiempo se procede a calcular el tiempo y la distancia entre tronaduras consecutivas con la metodología expuesta en la sección 3.2. Es necesario determinar un radio de búsqueda y una ventana de tiempo fijos, de manera de generar una aislación de sismicidad consistente que logre, conjugar una cantidad de datos estadísticamente significativos, disminuyendo además la superposición entre tronaduras.

Los parámetros R y Δt , quedan en función de los valores límites de $\tau_i \leq \tau_i^*$ y $d_i \leq d_i^*$, los cuales se obtienen calculando la fracción de tronaduras consecutivas que se superponen. La dispersión de los valores τ_i y d_i , entrega un primer análisis de la interacción entre tronaduras y su superposición (Figura 31).

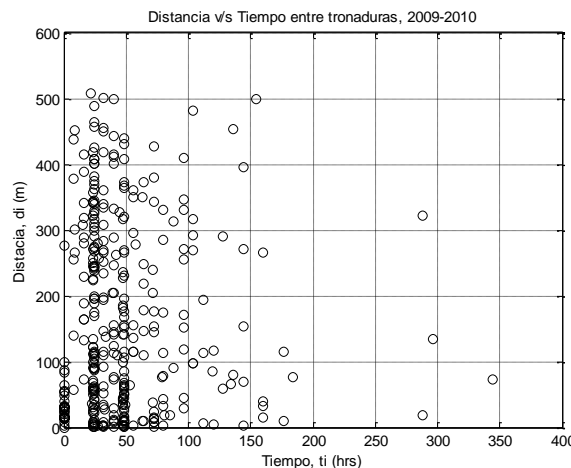


Figura 31. Dispersión de distancia y tiempo entre tronaduras (380).

La fracción de tronaduras resultante para distintos valores de τ_i^* en función de d_i^* , por año se presentan a continuación (Figura 32).

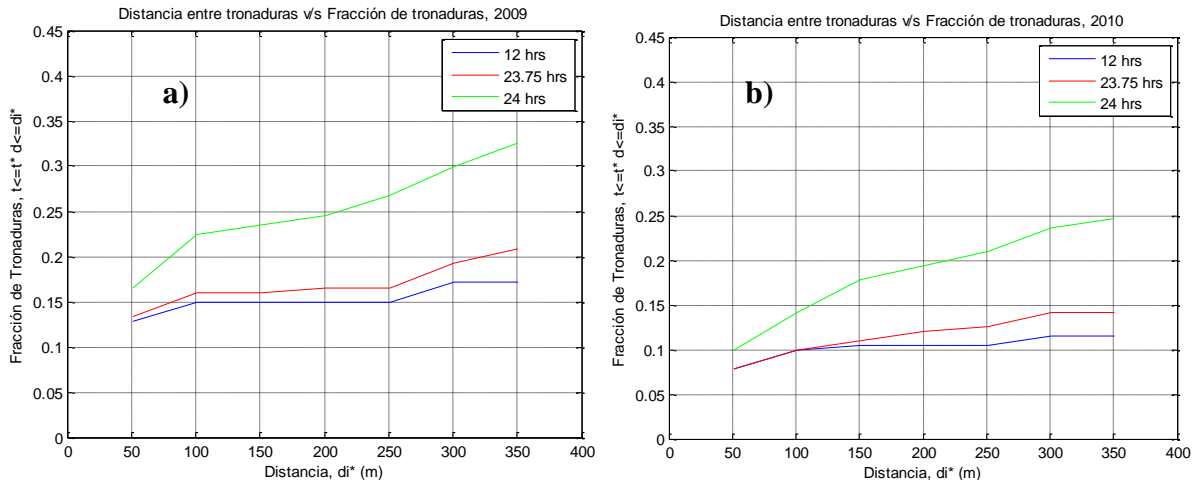


Figura 32. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras consecutivas, a) año 2009, b) año 2010.

La Figura 32, indican que el número de tronaduras superpuestas se reduce significativamente cuando $\tau_i \leq 23,75$ horas (un 10% aprox.). Adicionalmente, se observa que para dicho intervalo de tiempo entre tronaduras la distancia no tiene un gran efecto en la superposición de tronaduras. Luego, utilizando un $d_i=200$ m es posible seleccionar una cantidad suficiente para hacer un trabajo estadístico consistente, ya que por ejemplo: a un $d_i=200$ m se tiene un 70% más de eventos sísmicos que para un $d_i=150$ m.

4.3. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos

Una manera de analizar el agrupamiento tiempo-espacio de forma general y preliminar, es generando gráficos de distribuciones temporales y espaciales de la sismicidad cercana a cada tronadura de incorporación de área. Manteniendo un radio de 200 m y una ventana de tiempo de 23,75 hrs, es posible examinar cómo se distribuye la sismicidad en espacio y tiempo alrededor de las tronaduras para distintos niveles de magnitud. A continuación se presentan las distribuciones acumuladas espacio-tiempo, para distintas M_w , por año.

4.3.1. Tronaduras de Socavación

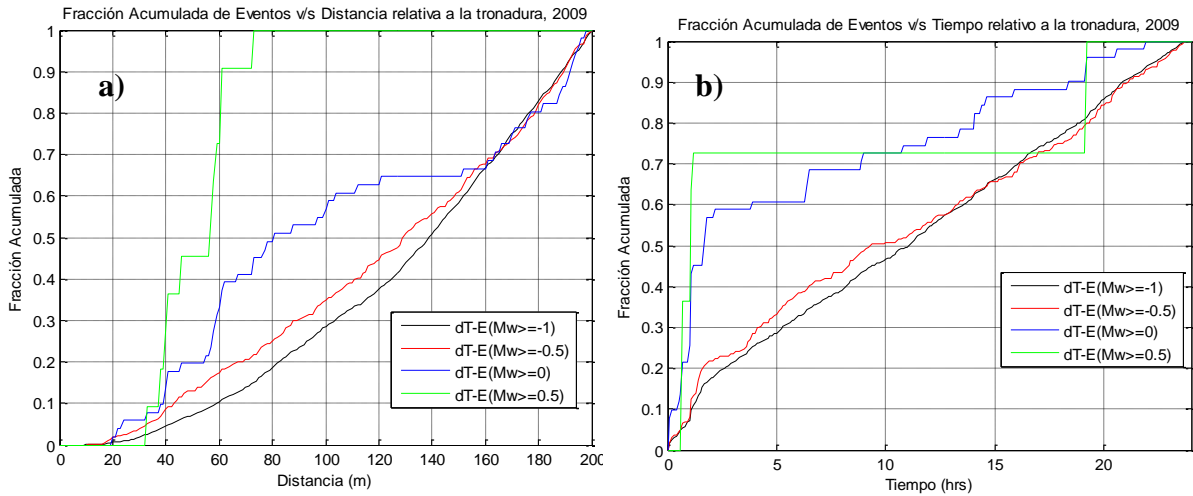


Figura 33. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de socavación para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos año 2009.

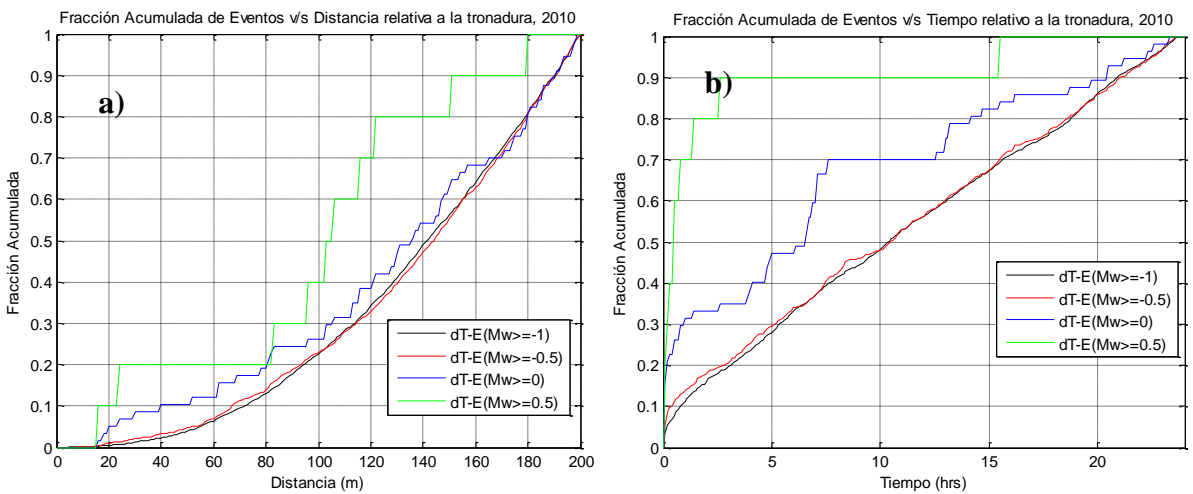


Figura 34. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de socavación para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de socavación y eventos sísmicos año 2010.

La Figura 33, muestra una clara tendencia de clusterización en tiempo y espacio entre tronadura de socavación y la ocurrencia de eventos sísmicos a partir de magnitudes mayores igual a 0. Para el 2009, se puede afirmar que para $M_w \geq 0,5$ existe agrupamiento en espacio-tiempo cercano a las tronaduras de socavación (menos de 70 m y 2 hrs desde t_0). Si bien para ambos años la tendencia de clusterización temporal es evidente, para el 2010 es discutible el agrupamiento espacial al menos para $M_w < 0,5$ (Figura 34 a)).

4.3.2. Tronaduras de Batea Normal

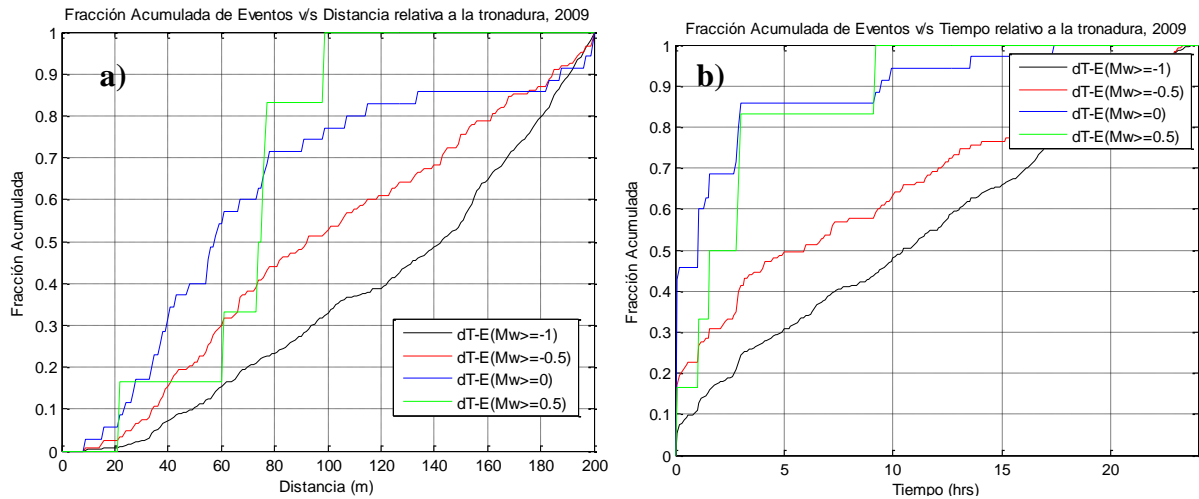


Figura 35. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea normal para distintos M_W , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos año 2009.

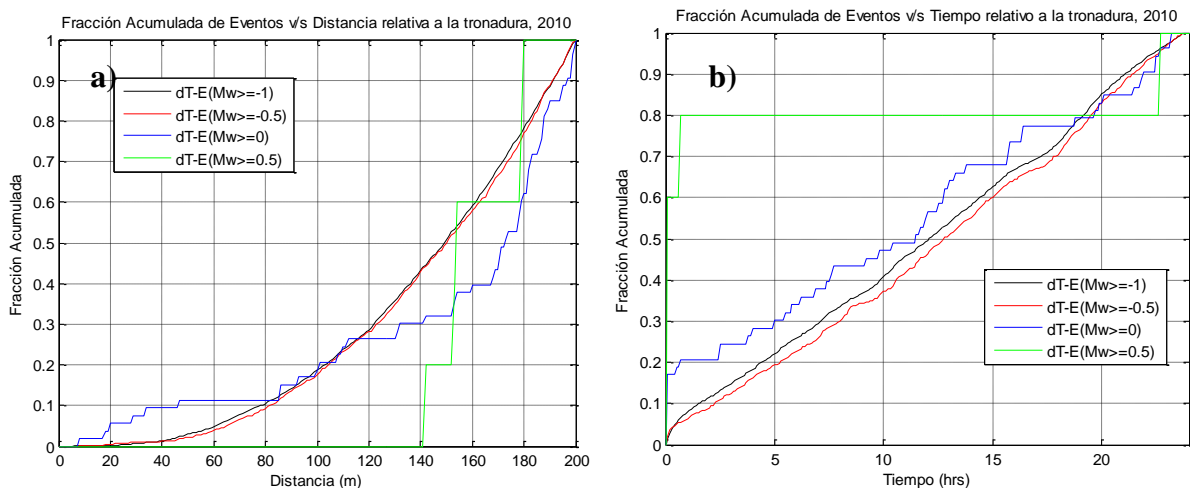


Figura 36. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea normal para distintos M_W , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea normal y eventos sísmicos año 2010.

La Figura 35, muestra una tendencia de clusterización en tiempo y espacio entre tronadura de batea normal y la ocurrencia de eventos de sísmicos a partir de magnitudes mayores igual a 0. Para el 2009, se puede afirmar que para $M_W \geq 0,5$ existe agrupamiento en espacio-tiempo cercano a tronaduras de batea normal (menos de 100 m y 3 hrs desde t_0). Si bien para ambos años la tendencia de clusterización temporal es evidente, para el 2010 el agrupamiento cercano es discutible, ya que recién a 180 m desde las tronaduras existe cierta clusterización para un $M_W \geq 0,5$ (Figura 36 a)).

4.3.3. Tronaduras Batea Alta

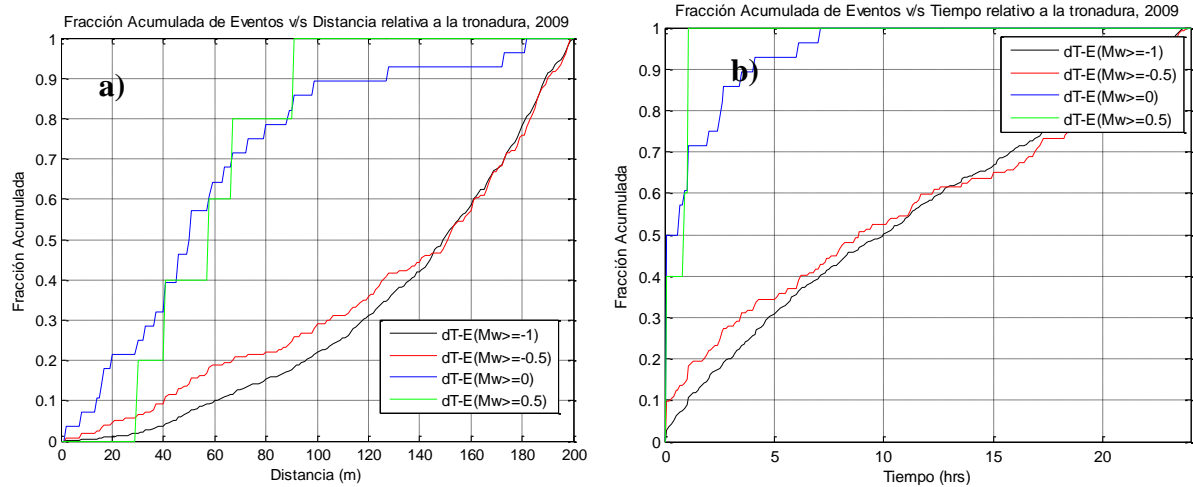


Figura 37. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea alta para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos año 2009.

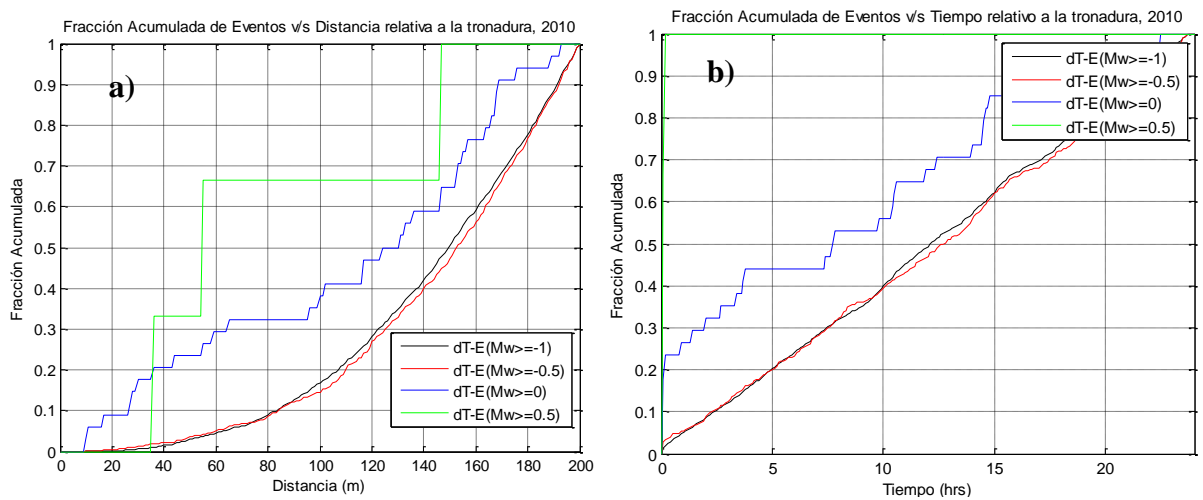


Figura 38. Espacio-tiempo posterior a la tronadura de batea alta para distintos M_w , a) distribución acumulada de distancia entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos, b) distribución acumulada de tiempo entre tronaduras de batea alta y eventos sísmicos año 2010.

La Figura 37, muestra una tendencia de clusterización en tiempo y espacio entre tronadura de batea alta y la ocurrencia de eventos sísmicos a partir de magnitudes mayores igual a 0. Para el 2009, se puede afirmar que para $M_w \geq 0.5$ existe agrupamiento en espacio-tiempo cercano a tronaduras de batea alta (menos de 90 m y 1 hrs desde t_0). Para el 2010 también existe clusterización cercana a las tronaduras en espacio-tiempo (Figura 38).

4.3.4. Distribución de eventos sísmicos en el espacio

Para observar la distribución espacial de la sismicidad en función de la magnitud, se presentan a continuación isométricos con los eventos aislados alrededor de las tronaduras para distintos niveles de magnitud y por año.

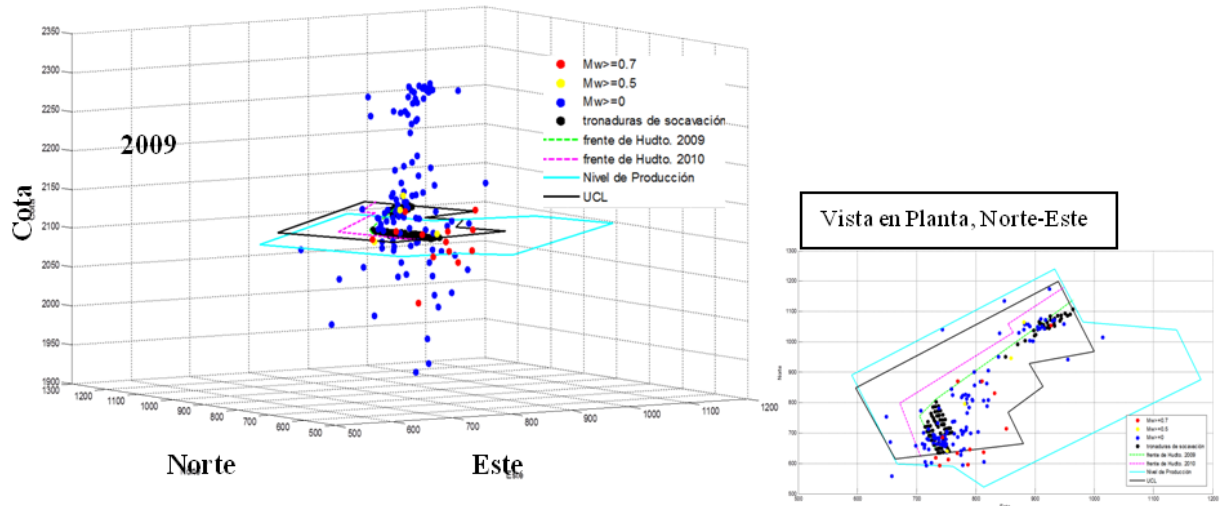


Figura 39. Dispersión de eventos sísmicos de tronaduras de incorporación de área, para distintas M_w de corte, 2009.

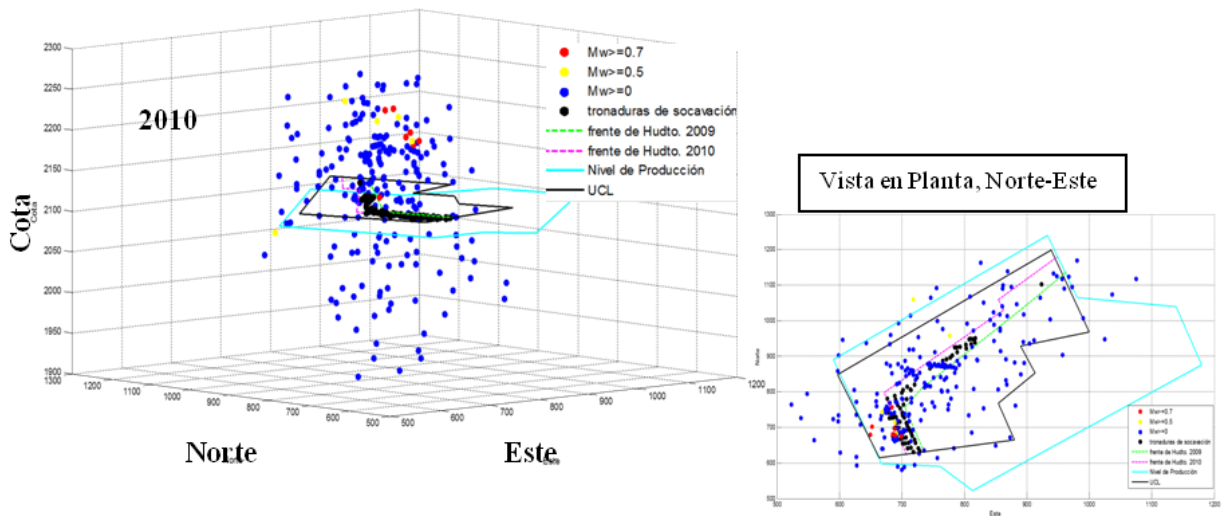


Figura 40. Dispersión de eventos sísmicos de tronaduras de incorporación de área, para distintas M_w de corte, 2010.

La Figura 39 y la Figura 40, muestran la cercanía de los eventos de magnitudes mayores a 0, específicamente para eventos de magnitud relevante, existe tendencia de clusterización cercana a los polvorazos, además se observa que para el año 2010 existe una mayor actividad sísmica comparativamente con el año 2009, debido a que existe para una misma M_w de corte existe una mayor cantidad de datos.

Por otro lado es posible destacar que para el año 2009 los eventos sísmicos con un $M_w \geq 0,7$ se encuentran cerca del nivel de producción y hundimiento con cotas entre los 2102 y 2120 respectivamente, para el 2010 en cambio esta clase de eventos se encuentran a mayor altura. Las distribuciones de la sismicidad con respecto a su cota por año (Figura 41), se muestran a continuación:

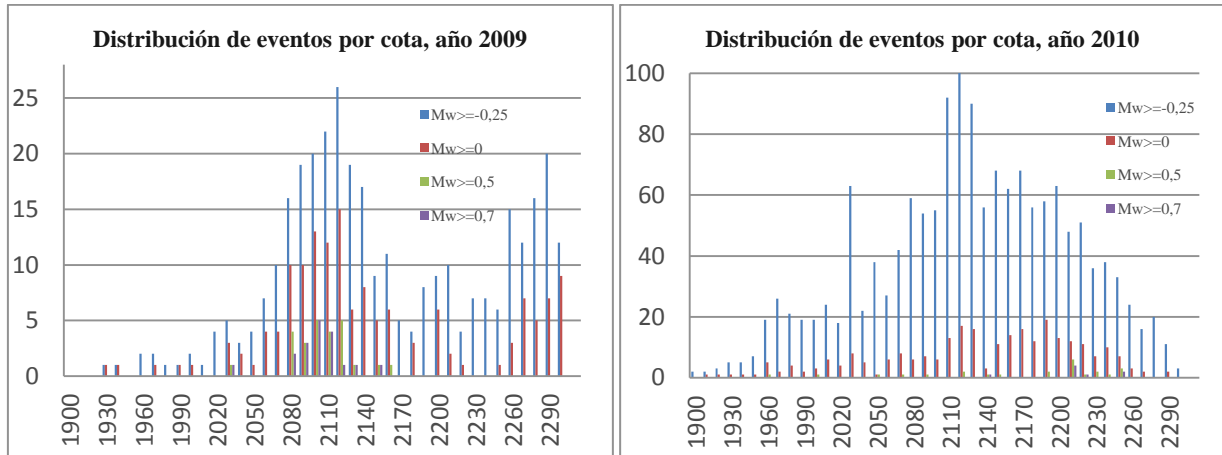


Figura 41. Histogramas de la sismicidad en función de la altura.

4.4. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos de magnitud relevante

Con el objeto de evidenciar que las tronaduras de incorporación de área actúan como generadoras de eventos de magnitud relevante se procede a generar estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante.

Utilizando una ventana de tiempo para el análisis fijo en 23,75 hrs y un radio de búsqueda libre se, genera un gráfico de distribución acumulada de eventos con respecto a su distancia de la tronadura.

4.4.1. Tronaduras de Socavación

Utilizando la metodología expuesta en la sección 3.3, se procede con el cálculo de la distribución acumulada de las distancias entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante.

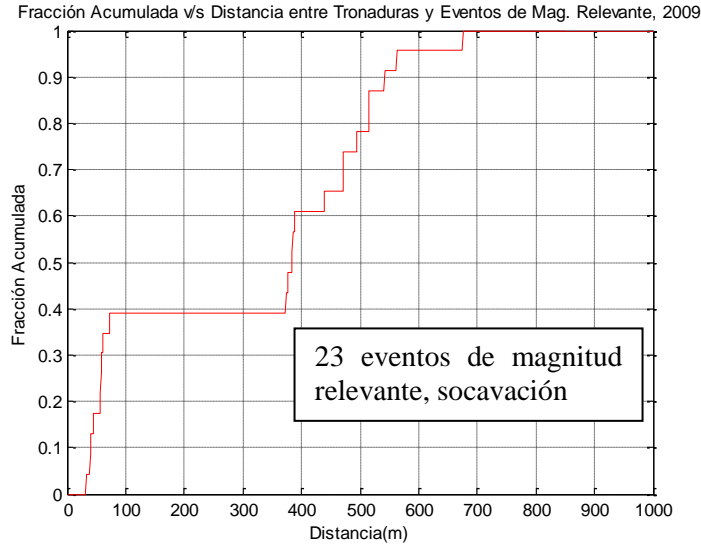


Figura 42. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante, 2009.

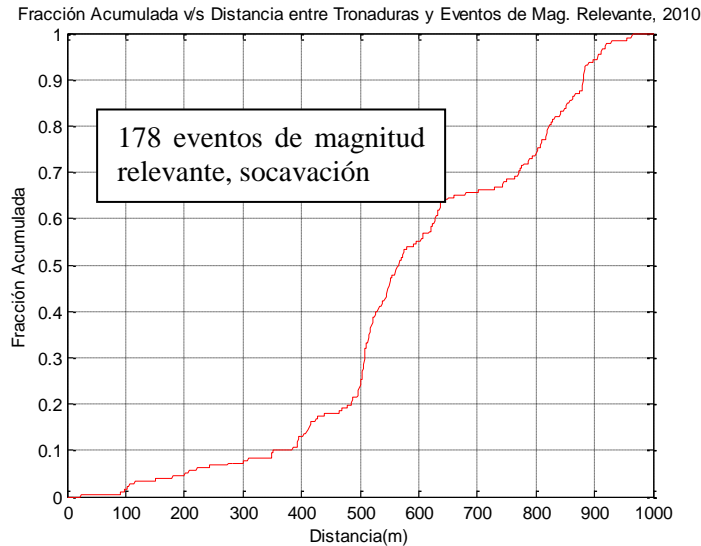


Figura 43. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de socavación y eventos de magnitud relevante, 2010.

De la Figura 42, se observa que para el año 2009 existe cierta clusterización espacial evidente de eventos de magnitud relevante cercanos a las tronaduras, debido a que el 40% de éstos se encuentra a menos de 100 m (muy cercanos entre sí). Para el año 2010 la tendencia anterior no es tan evidente, ya que para distancias menores a 200 m sólo se generaron 8 eventos de magnitud relevante.

4.4.2. Tronaduras de Batea Normal

Utilizando la metodología expuesta en la sección 3.3, se procede con el cálculo de la distribución acumulada de las distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante.

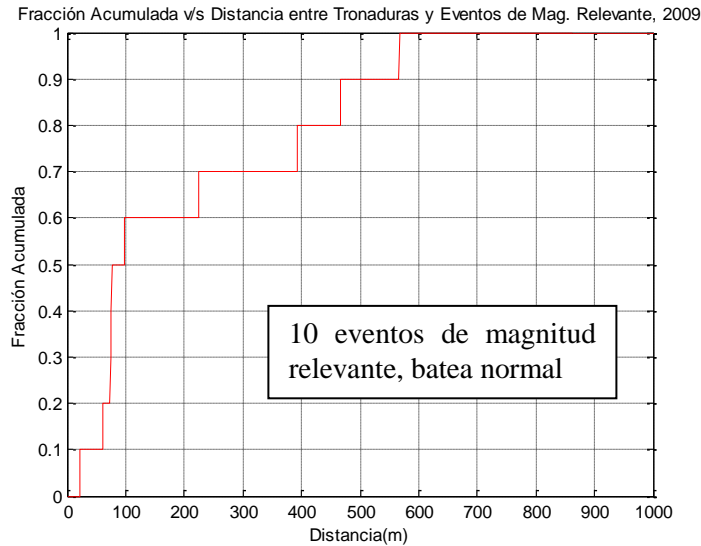


Figura 44. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2009.

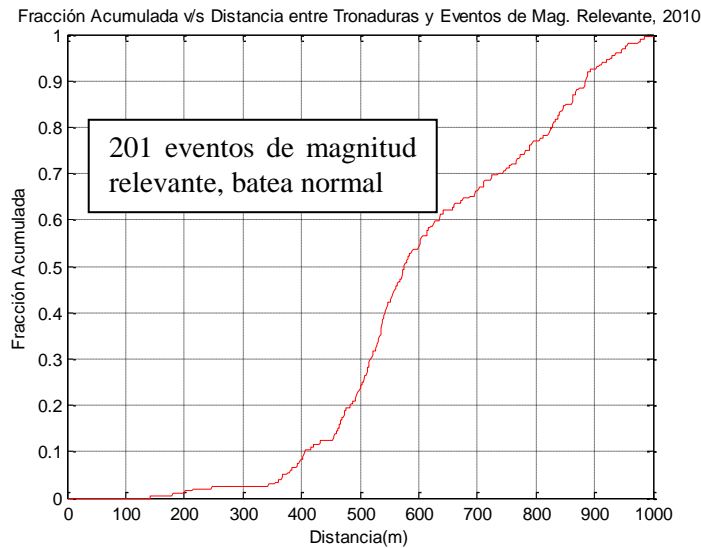


Figura 45. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2010.

De la Figura 44, se observa que para el año 2009 existe cierta clusterización espacial evidente de eventos de magnitud relevante cercanos a las tronaduras, debido a que el 60% de éstos se encuentra a menos de 100 m, considerando que se agrupan más del 50% de los eventos en una zona cercana a la perturbación. Para el año 2010, la tendencia anterior no es tal, ya que para distancias menores a 200 m sólo se generaron 4 eventos de magnitud relevante.

4.4.3. Tronaduras de Batea Alta

Utilizando la metodología expuesta en la sección 3.3, se procede con el cálculo de la distribución acumulada de las distancias entre tronaduras de batea alta y eventos de magnitud relevante.

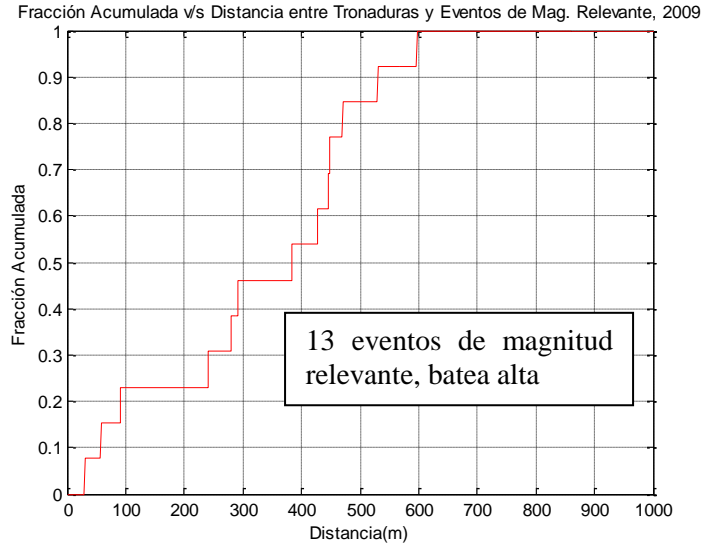


Figura 46. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea normal y eventos de magnitud relevante, 2009.

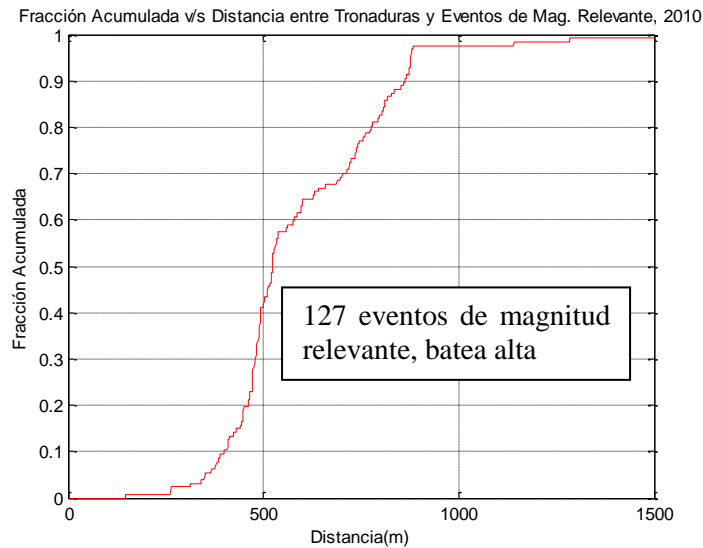


Figura 47. Fracción acumulada de distancias entre tronaduras de batea alta y eventos de magnitud relevante, 2010.

De la Figura 46, se observa que para el año 2009 no existe tendencia al agrupamiento espacial, debido a que no existen cambios abruptos a medida que aumento la distancia desde la tronadura. Para el año 2010, la tendencia anterior no es tal al, igual que para las otros tipos de tronaduras.

4.5. Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras

De manera de aislar la sismicidad y definir secuencias sísmicas inducidas por cada tronadura se procede a extraer del catálogo los eventos sísmicos considerando un radio esférico de aislación (R) y una ventana de tiempo (Δt), ambos relativos a las coordenadas espaciales y temporales de origen de las tronaduras (t_0). Según la metodología revisada en la sección 4.2.1, se selecciona un radio esférico y una ventana de tiempo de 200 m y 23,75 horas, respectivamente. A continuación se presentan los resultados obtenidos con las secuencias sísmicas aisladas superpuestas.

4.5.1. Magnitud versus tiempo

La Figura 48, presenta la superposición de todas las secuencias sísmicas aisladas en términos del momento magnitud versus el tiempo relativo a las tronaduras de incorporación de área en el sector RENO para los años 2009 y 2010.

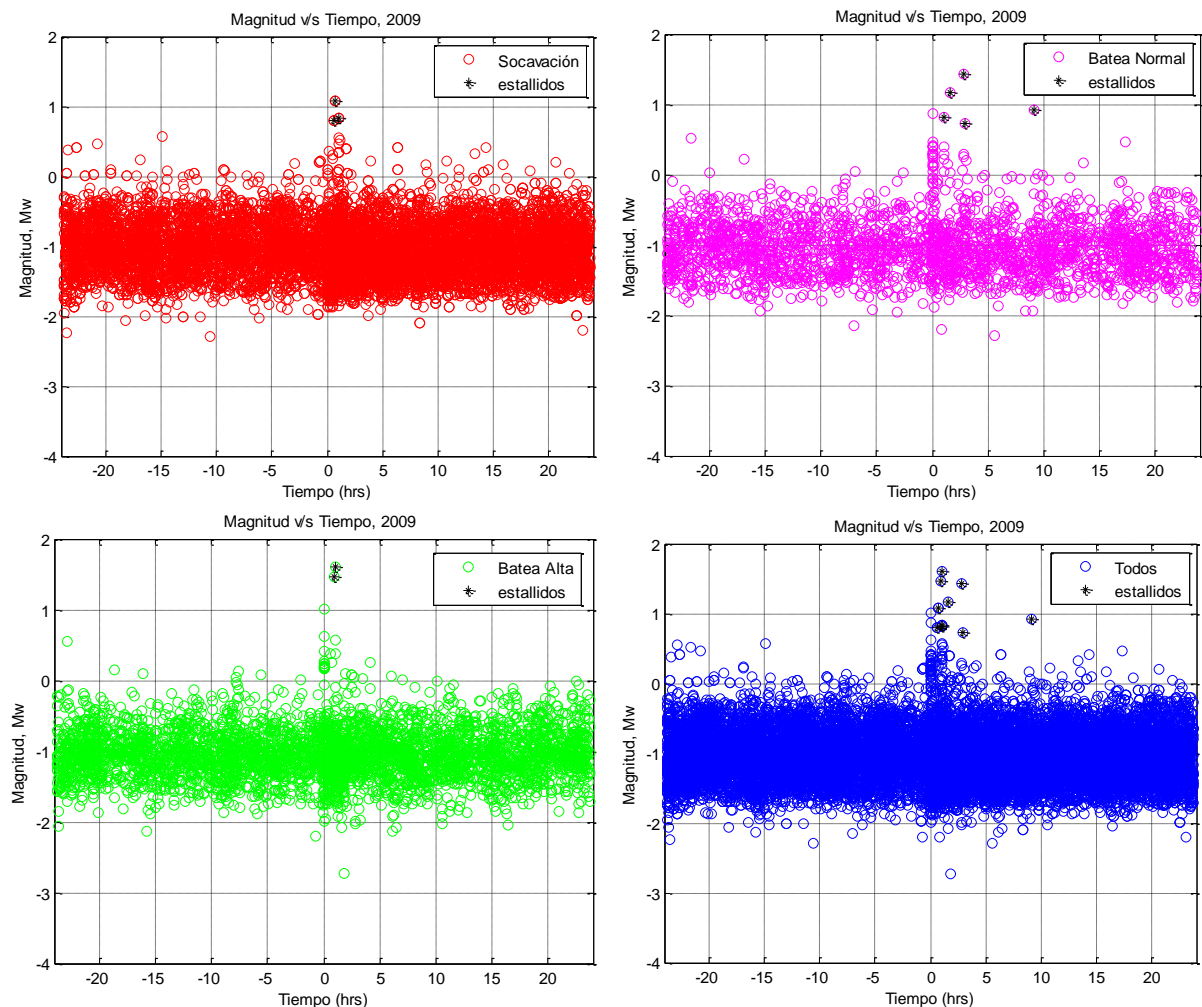


Figura 48. Momento magnitud en función del tiempo para cada tipo de tronaduras, año 2009.

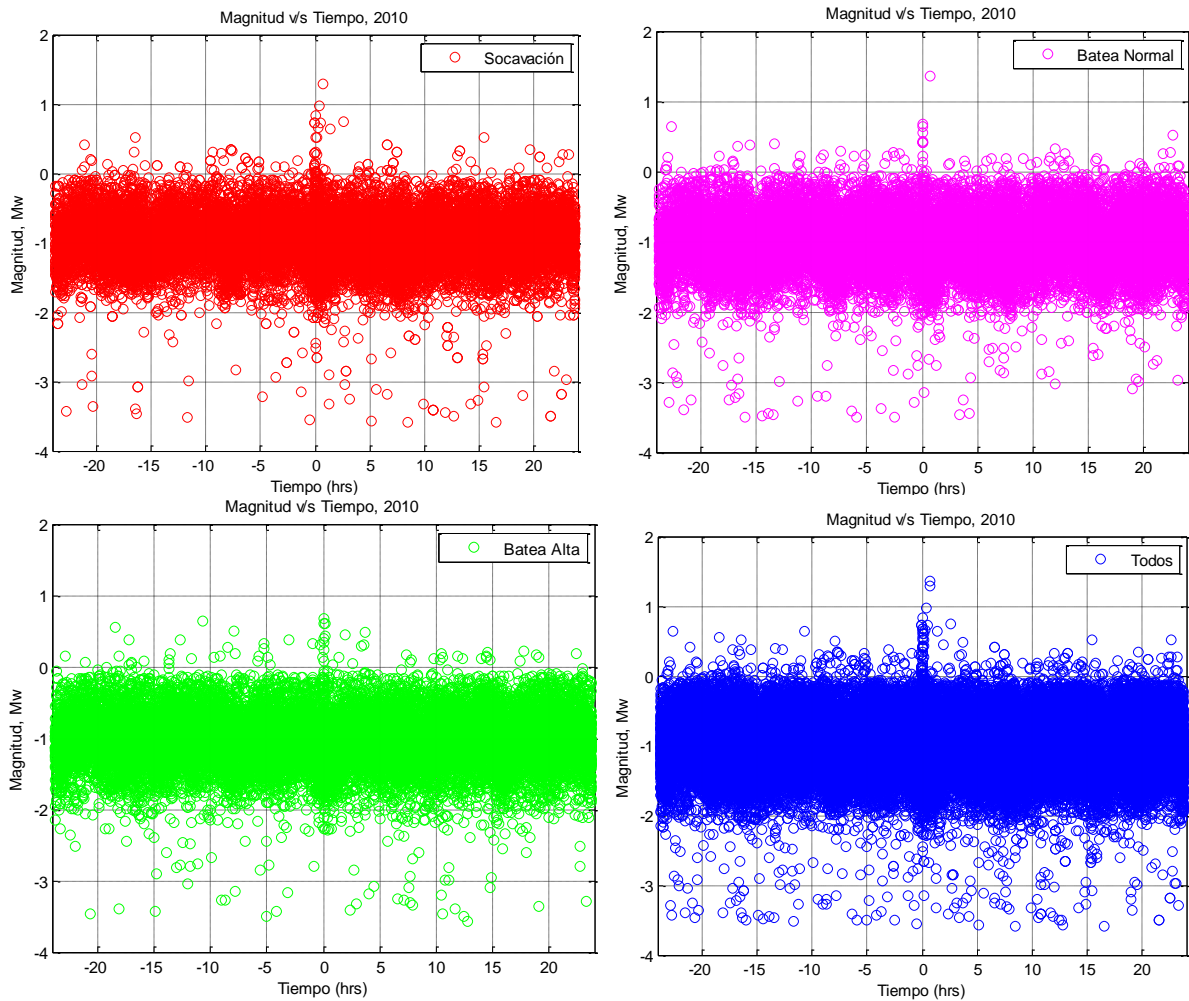


Figura 49. Momento magnitud en función del tiempo para cada tipo de tronaduras, año 2010.

En la Figura 48, se observa que la mayoría de los eventos sísmicos, en especial los de magnitud relevante se encuentran distribuidos un lapso de menos de 4 horas después de la tronadura (t_0). Lo mismo ocurre para el año 2010 sin embargo, estas secuencias superpuestas poseen una mayor cantidad de eventos sísmicos con $M_W < -2$, junto con un mayor ruido sísmico entorno a t_0 (Figura 49).

De la Figura 48, se observa que se graficaron los eventos que generaron el daño clasificados como estallidos de roca, sin embargo para dichos casos es difícil conocer efectivamente cual es responsable del daño. Para el año 2009, la mayoría de los eventos de magnitud relevante se encuentran distribuidos cercanos a la tronadura en espacio y en tiempo, para el 2010 en cambio estos eventos se localizan en altura, entonces es muy probable que para este año los estallidos de roca se hayan generado en cotas superiores a las del 2120, siendo imposibles de registrar ya que se encuentran lejos de los niveles de producción y hundimiento en los cuales se puede corroborar el daño.

4.5.2. Frecuencia de Eventos

El número de eventos por hora para la ventana de tiempo y el radio de búsqueda de análisis por tipo de tronadura y año se muestra a continuación

4.5.2.1. Tronadura Socavación

Igualmente es importante conocer la frecuencia de eventos para la sismicidad superpuesta en torno a las tronaduras de socavación, el número de eventos por hora para distintos M_W de corte, se grafica a continuación:

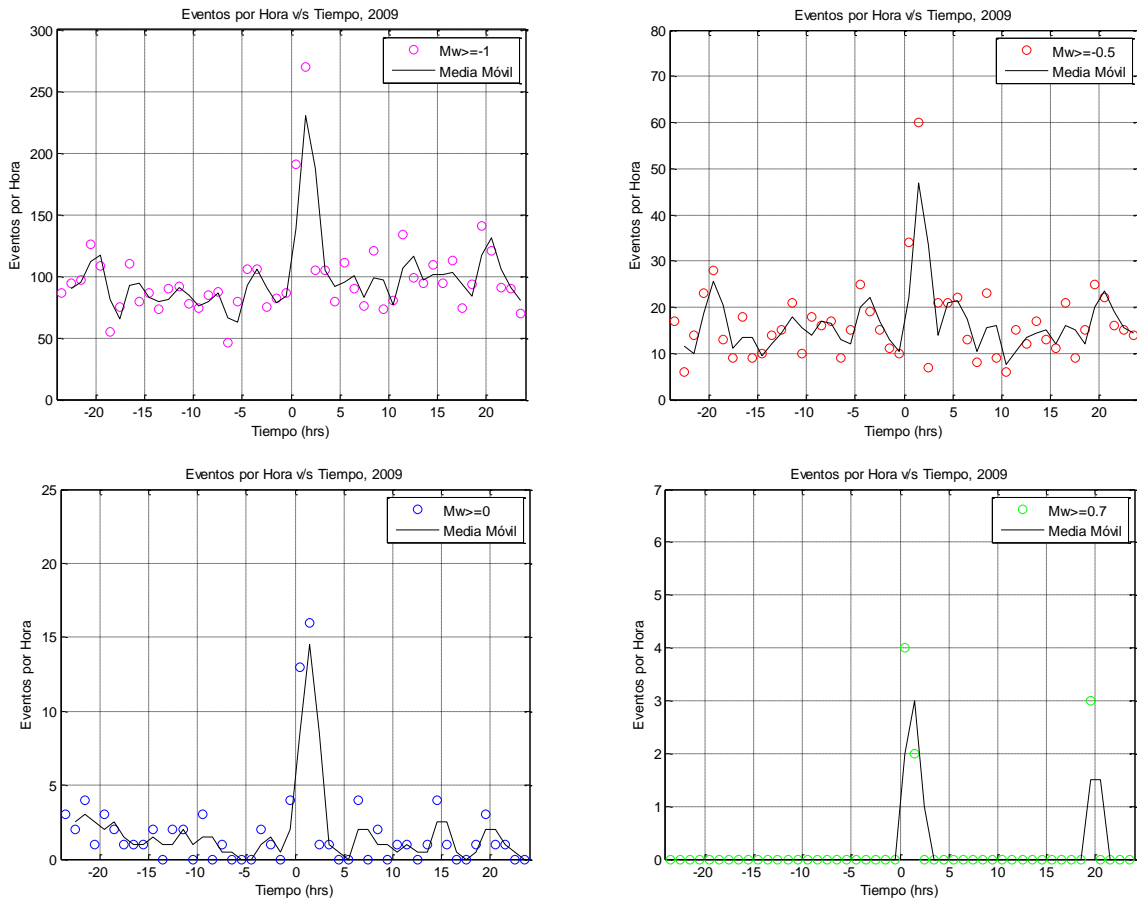


Figura 50. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de socavación, año 2009.

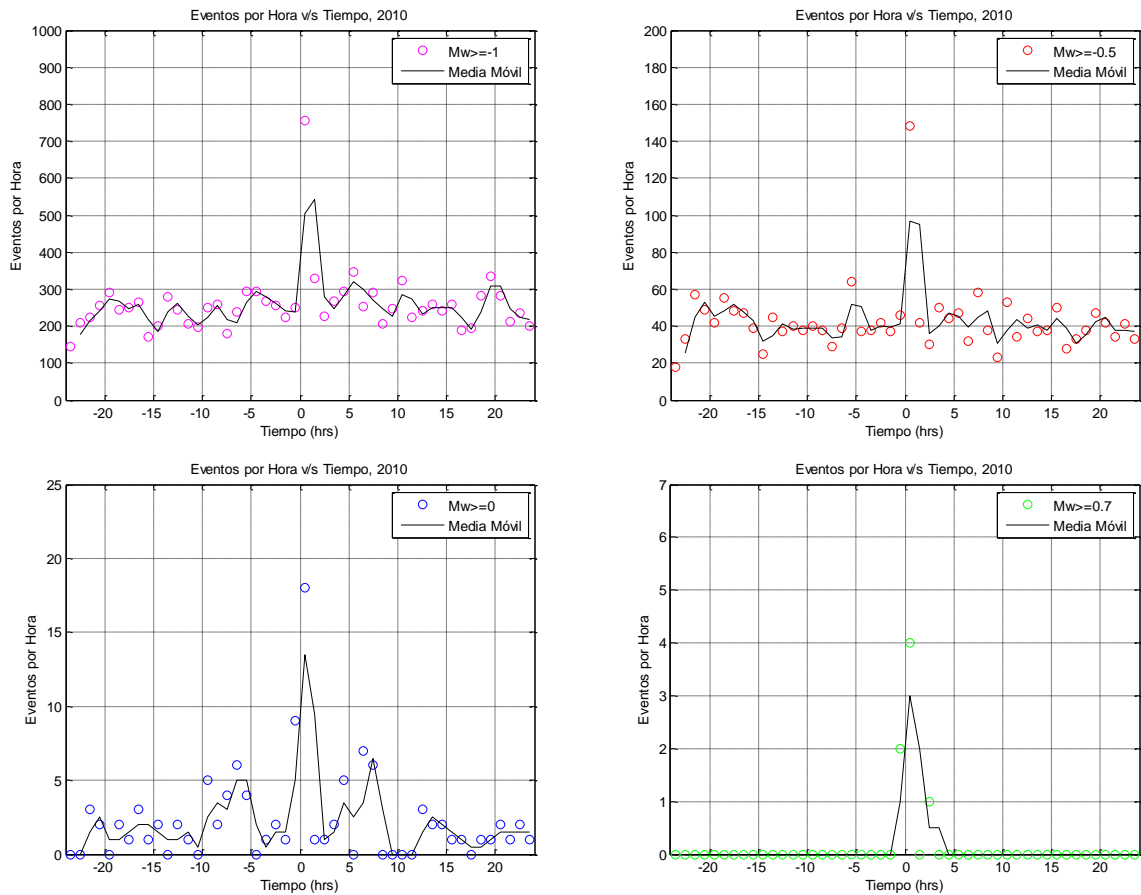


Figura 51. Frecuencia de eventos para distintos M_w , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de socavación, año 2010.

La frecuencia de eventos por hora máximo para el año 2009, no se encuentra efectivamente en el t_0 , sino una hora después de realizadas las tronaduras de socavación, para el 2010 en cambio el máximo se encuentra efectivamente en el intervalo de 0 a 1 hrs. Si bien existe cierta tendencia de decaimiento potencial luego del evento principal (tronadura) (Vallejos & McKinnon, 2009), no queda claro el nivel base de sismicidad a la cual la tendencia decreciente se estabiliza, debido al ruido aparente de eventos sísmicos alrededor de la tronadura.

4.5.2.2. Tronadura Batea Normal

También es importante conocer la frecuencia de eventos para sismicidad superpuesta en torno a las tronaduras de batea normal, el número de eventos por hora para distintos M_W de corte, se grafica a continuación:

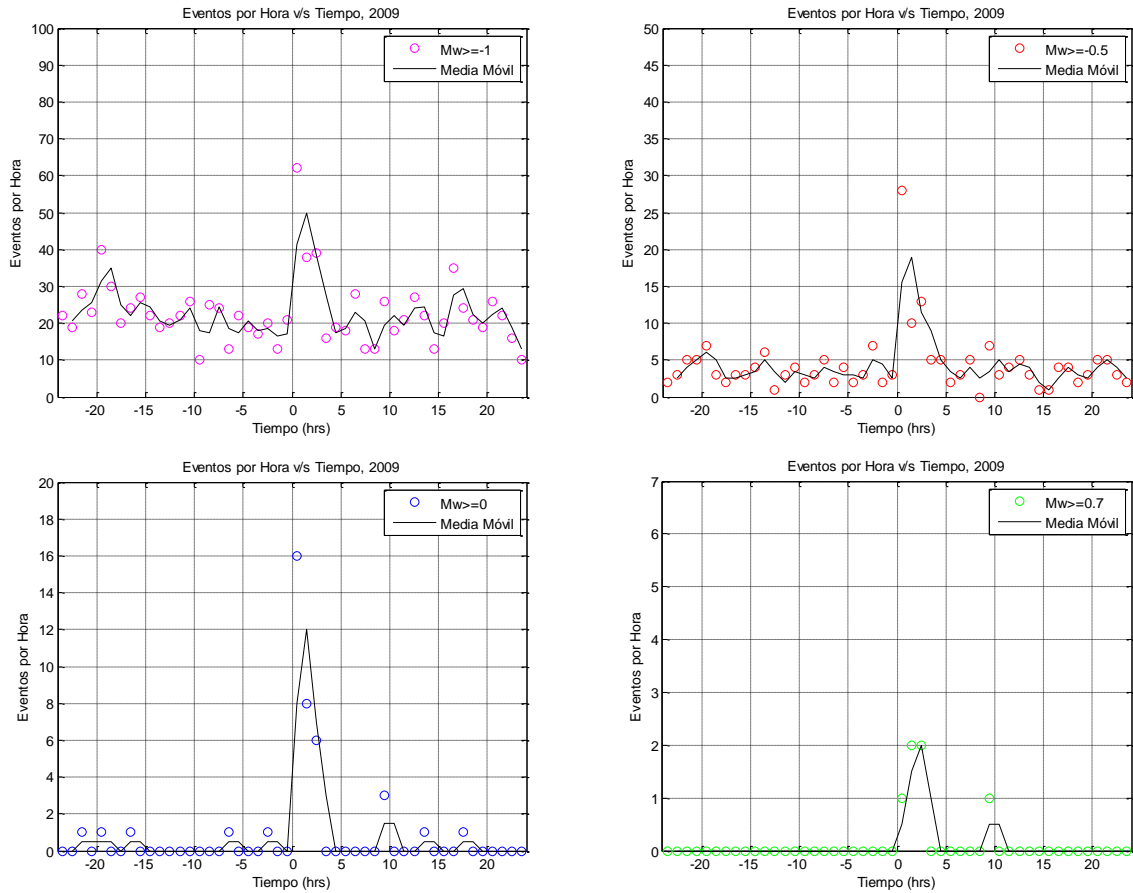


Figura 52. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea normal, año 2009.

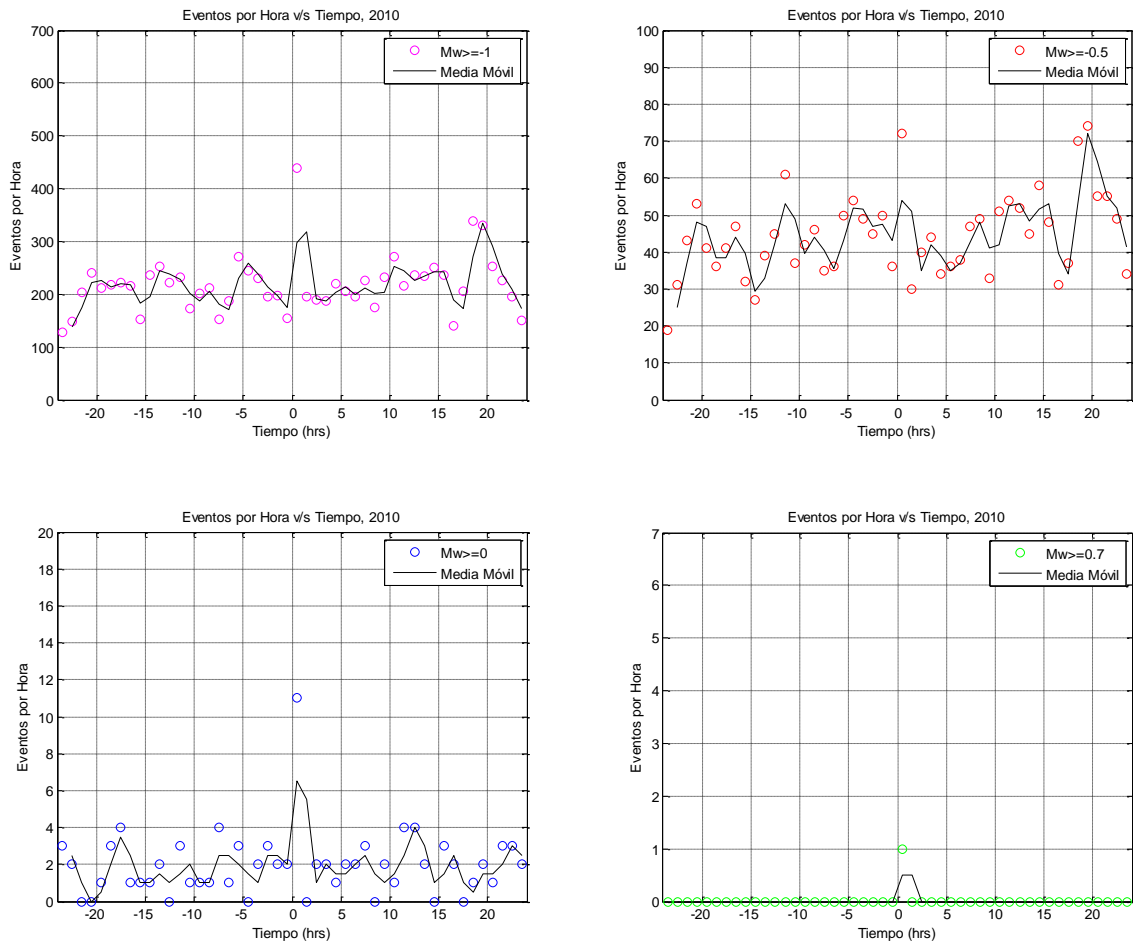


Figura 53. Frecuencia de eventos para distintos M_w , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea normal, año 2010.

La frecuencia de eventos por hora máximo para el año 2009 y 2010 se encuentra efectivamente en el intervalo de 0 a 1 hrs, para este tipo de tronaduras. Si bien existe cierta tendencia de decaimiento potencial luego del evento principal para el año 2009-2010, no queda claro el nivel base de sismicidad a la cual la tendencia decreciente se estabiliza, debido al ruido aparente de eventos sísmicos alrededor de la tronadura, especialmente para el año 2010 y para magnitudes menores a cero.

4.5.2.3. Tronadura Batea Alta

La frecuencia de eventos para sismicidad superpuesta en torno a las tronaduras de batea alta, a distintos M_W de corte, se grafica a continuación:

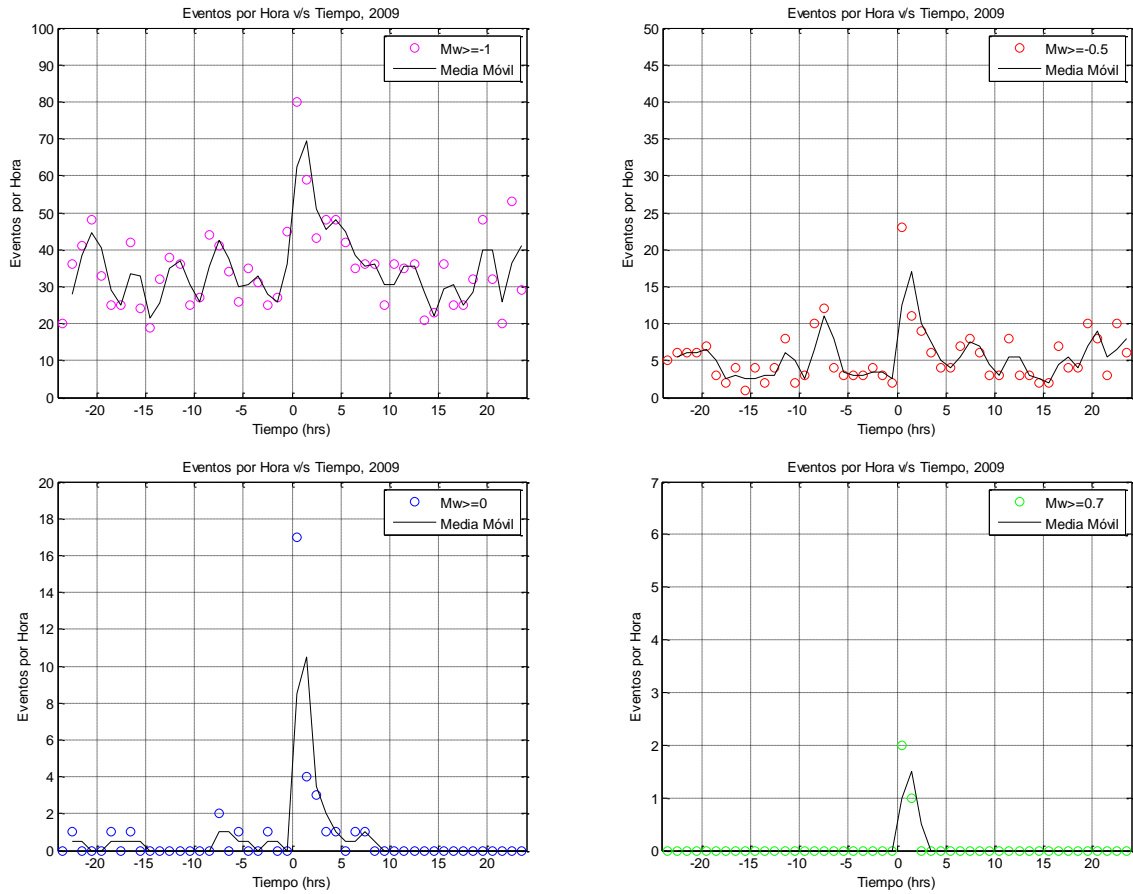


Figura 54. Frecuencia de eventos para distintos M_W , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea alta, año 2009.

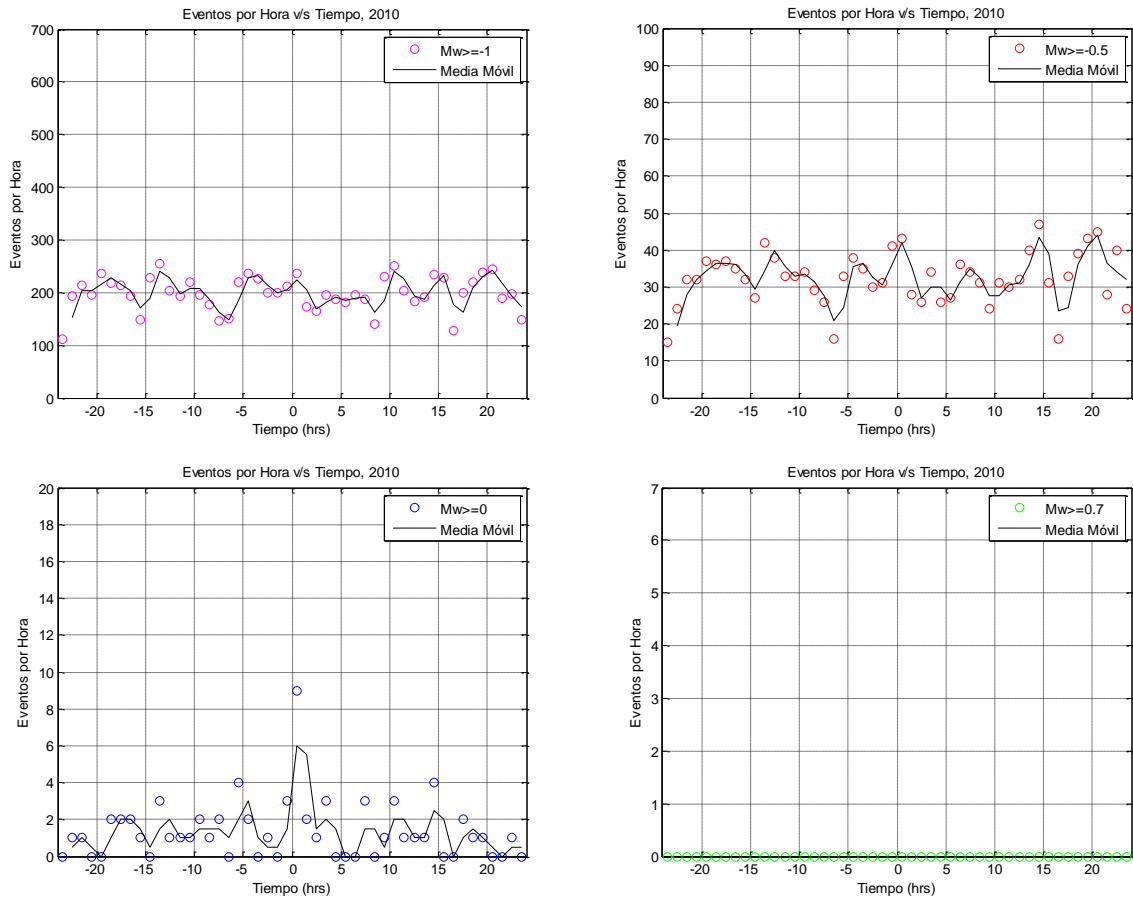


Figura 55. Frecuencia de eventos para distintos M_w , sismicidad de secuencias superpuestas para tronaduras de batea alta, año 2010.

La frecuencia de eventos por hora máximo para el año 2009 y 2010 se encuentra efectivamente en el intervalo de 0 a 1 hrs, para tronaduras de batea normal. La tendencia de decaimiento potencial luego del evento principal para el año 2010 casi no existe, sobre todo para eventos de magnitud menor a cero (Figura 55).

4.6. Distribución frecuencia magnitud

El objetivo principal de esta sección es evidenciar los mecanismos de generación de sismicidad de los distintos tipos de tronaduras mediante la utilización de la metodología propuesta en la sección 3.5.1. Este análisis sugiere la utilización de las secuencias superpuestas por tipo de tronadura, calculando valores a y b antes y después de t_0 . Con los procedimientos propuestos, en la sección antes mencionada, es posible calcular los parámetros sísmicos: $a-$, $b-$ y $a+$, $b+$, cambiando los valores de M_{WC} desde $-1,0$ hasta $0,2$. A continuación se presentan los gráficos de frecuencia acumulada-magnitud para cada tipo de polvorazo para los casos $M_{WC} = -1,0$ y $M_{WC} = 0,2$.

4.6.1. Tronaduras de Socavación

Los gráficos de frecuencia acumulada-momento magnitud antes y después de t_0 para las secuencias superpuestas, se muestran en la Figura 56.

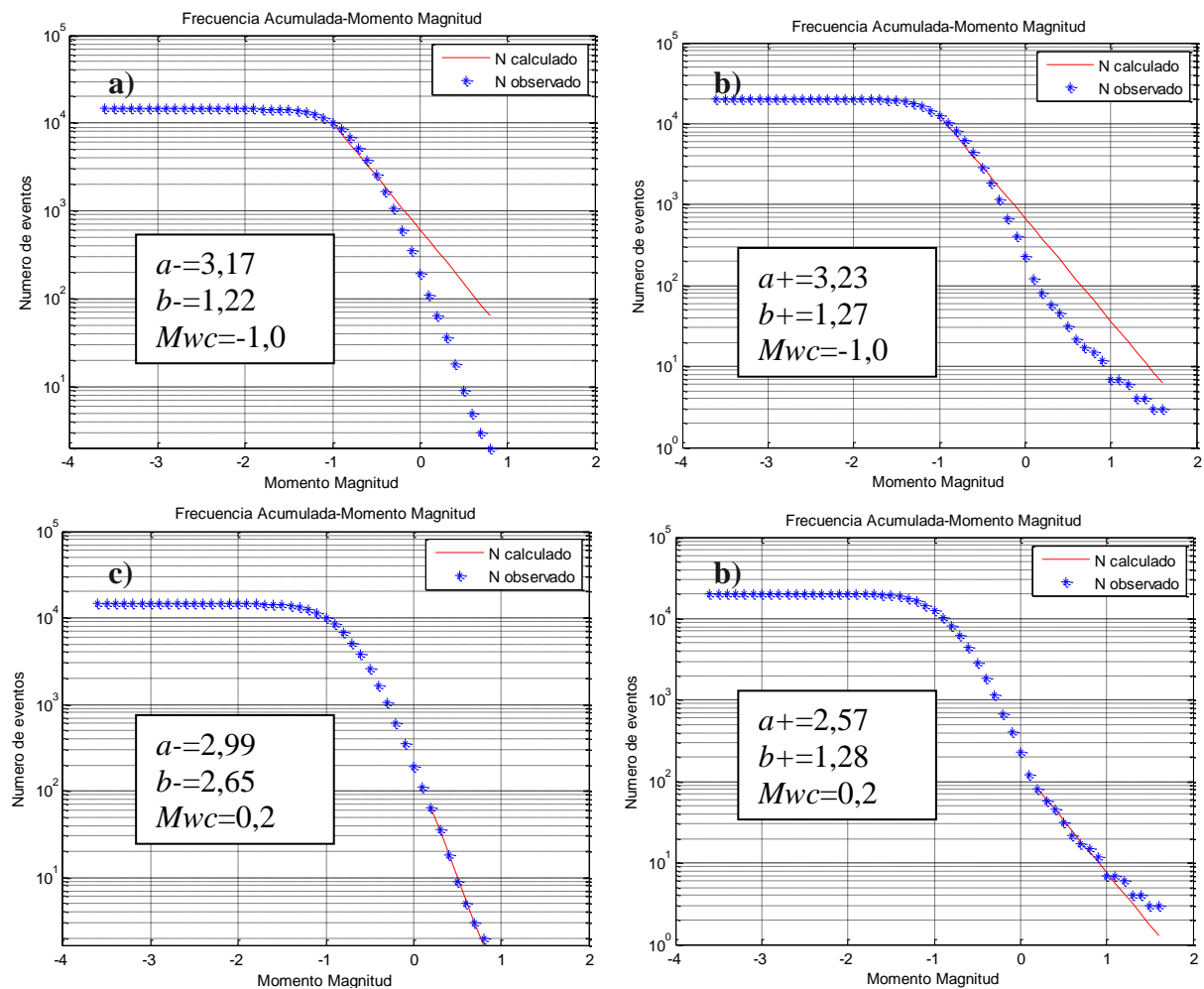


Figura 56. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{WC} = -1$, b) después de t_0 con $M_{WC} = -1$, c) antes de t_0 con $M_{WC} = 0,2$, d) después de t_0 con $M_{WC} = 0,2$, para tronaduras de socavación.

La Figura 57, presenta el número de eventos acumulados observados en las secuencias superpuestas antes y después de t_0 . Se observa una diferencia significativa entre la frecuencia acumulada-magnitud antes y después de t_0 a partir de un $M_W \geq 0,2$.

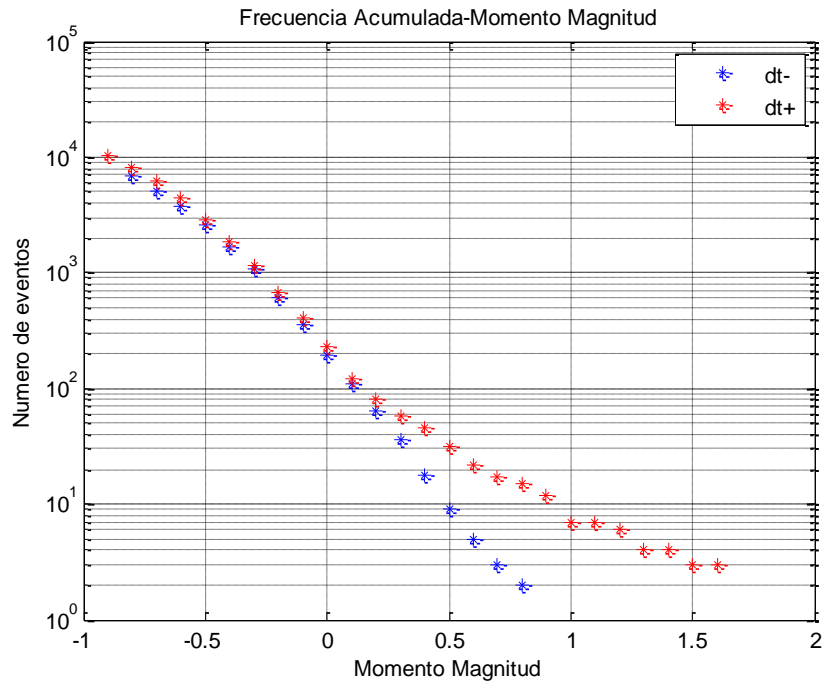


Figura 57. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto antes y después, para tronaduras de socavación.

4.6.2. Tronaduras de Batea Normal

Los gráficos de frecuencia acumulada-momento magnitud antes y después de t_0 para las secuencias superpuestas, se muestra en la Figura 58.

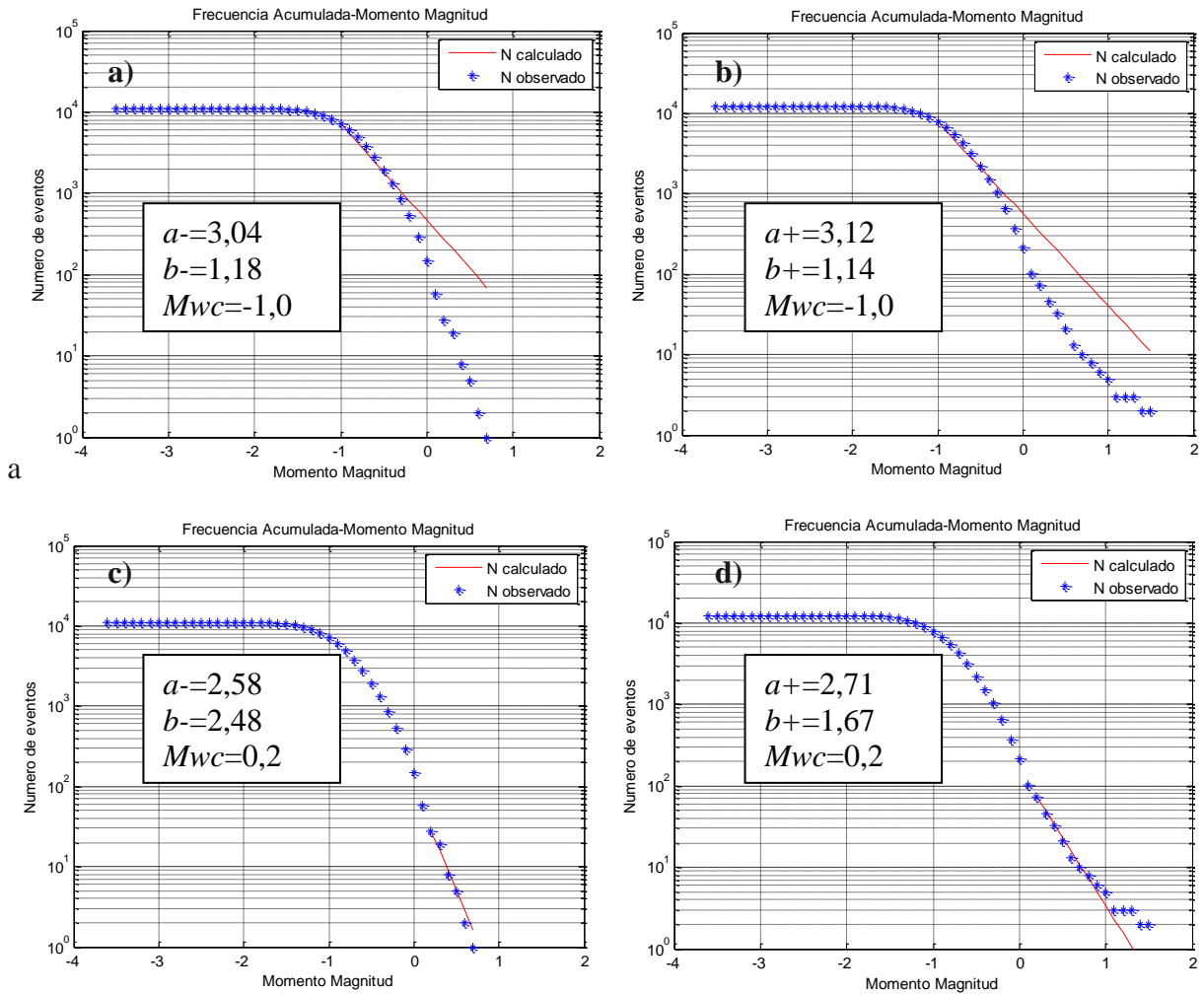


Figura 58. a) Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{wc} = -1$, b) después de t_0 con $M_{wc} = -1$, c) antes de t_0 con $M_{wc} = 0,2$, d) después de t_0 con $M_{wc} = 0,2$, para tronaduras de batea normal.

La Figura 59, presenta el número de eventos observado en las secuencias superpuestas antes y después de t_0 . Se observa una diferencia significativa entre la frecuencia acumulada-magnitud antes y después de t_0 a partir de un $M_W \geq 0$.

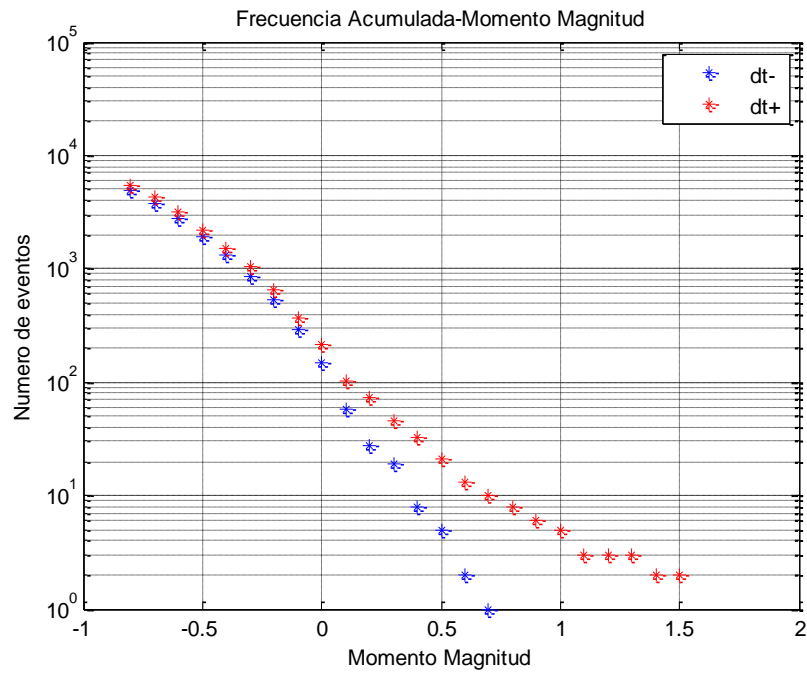


Figura 59. Gráfico frecuencia-magnitud superpuesto antes y después, para tronaduras de batea normal.

4.6.3. Tronaduras de Batea Alta

Los gráficos de frecuencia acumulada-momento magnitud antes y después de t_0 para las secuencias superpuestas, se muestra en la Figura 60.

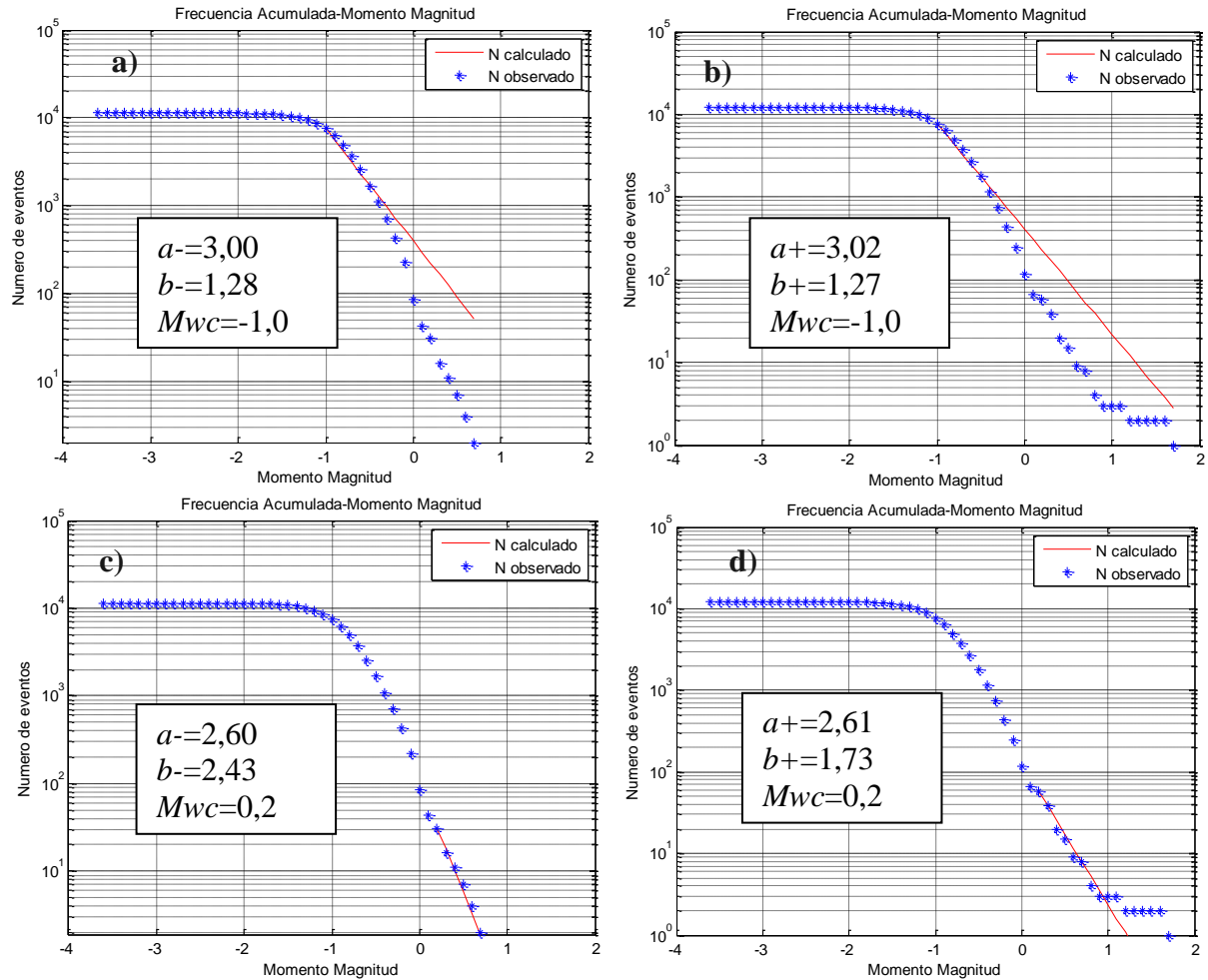


Figura 60. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto, a) antes de t_0 con $M_{WC} = -1$, b) después de t_0 con $M_{WC} = -1$, c) antes de t_0 con $M_{WC} = 0,2$, d) después de t_0 con $M_{WC} = 0,2$, para tronaduras de batea alta.

La Figura 61, muestra el número de eventos observado en las secuencias superpuestas antes y después de t_0 . Se observa una diferencia significativa entre la frecuencia acumulada-magnitud antes y después de t_0 a partir de un $M_W \geq 0$.

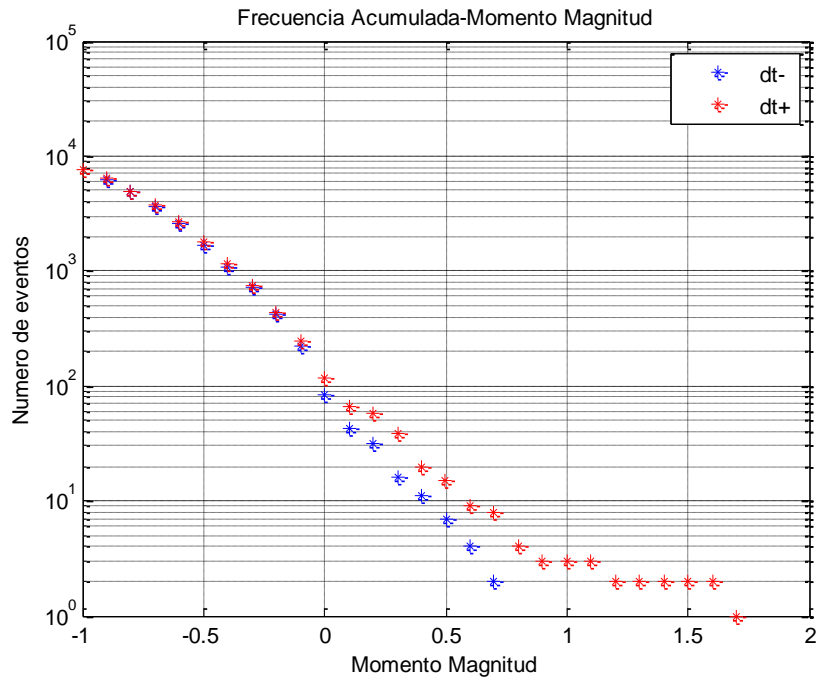


Figura 61. Gráfico frecuencia acumulada-magnitud superpuesto después de t_0 , para tronaduras de batea alta.

4.6.4. Resumen

Los gráficos anteriores (Figura 57, Figura 59 y Figura 61), muestran que antes y después existe un comportamiento sísmico distinto a partir de un $M_W \geq 0$ aproximadamente. A partir de este momento magnitud existe una mayor generación de eventos para una ventana de tiempo posterior a las tronaduras.

A continuación se muestran las gráficas que resumen el comportamiento de los parámetros: $a-$, $a+$, $b-$, $b+$, $\Delta b-$, $\Delta b+$, $R-$ y $R+$, con la variación de M_{WC} por tipo de tronadura.

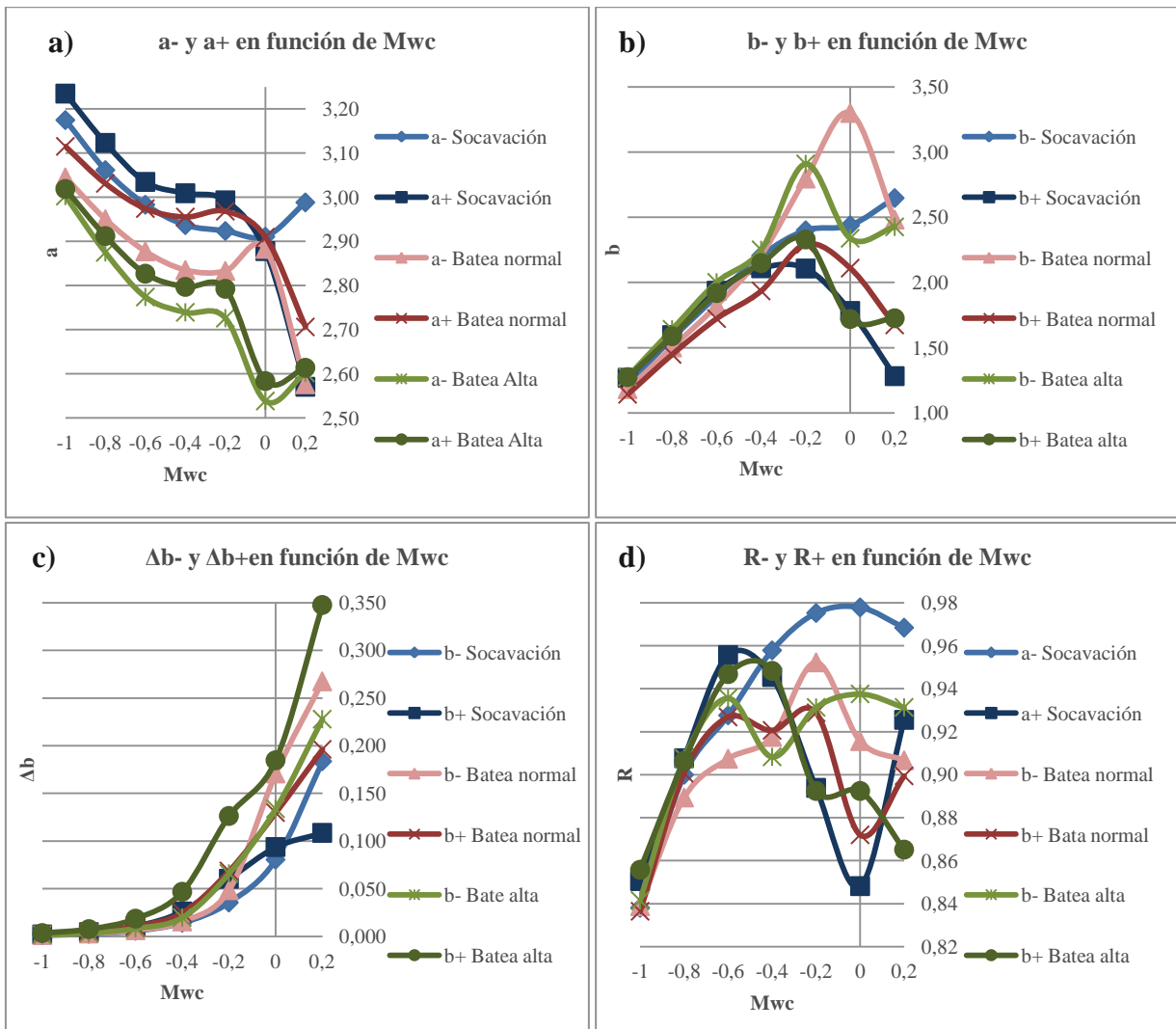


Figura 62. a) Valores de $a-$ y $a+$ en función de M_{WC} , b) Valores de $b-$ y $b+$ en función de M_{WC} , c) Valores de $\Delta b-$ y $\Delta b+$ en función de M_{WC} , d) Valores de $R-$ y $R+$ en función de M_{WC} .

Los valores de a y b , mostrados en la Figura 62 a) y b), sugieren un cambio antes y después de t_0 , para cualquier tipo de tronadura, en general se cumple que $b+ < b-$, y $a+ > a-$.

4.7. Ley de Omori modificada

Considerando a la tronadura de incorporación de área como el evento principal que genera la sismicidad inducida, es factible encontrar mediante la metodología presentada en la sección 3.5.2, los parámetros K , p , c , que maximizan la ecuación (16). En este capítulo se ajusta la ley de Omori modificada a las secuencias superpuestas por tipo de tronadura, analizando el efecto de la estimación de parámetros con la variación de T_B , R y M_{WC} . Con respecto a lo anterior, se analizarán los siguientes casos: variación de T_B , dejando $R=200$ m y sin filtrar por M_{WC} , variación de R , dejando $T_B=24$ hrs y sin filtrar por M_{WC} , y variación de M_{WC} , dejando $R=200$ m y en $T_B=24$ hrs.

4.7.1. Tronaduras de Socavación

Utilizando la ecuación (20) evaluada con las variables anteriores; es posible graficar para el caso de tronaduras de socavación la frecuencia de eventos por hora y la curva de Omori ajustada. Considerando la variación de T_B , R y M_{WC} (Figura 63, Figura 64 y Figura 65, respectivamente), se tiene lo siguiente:

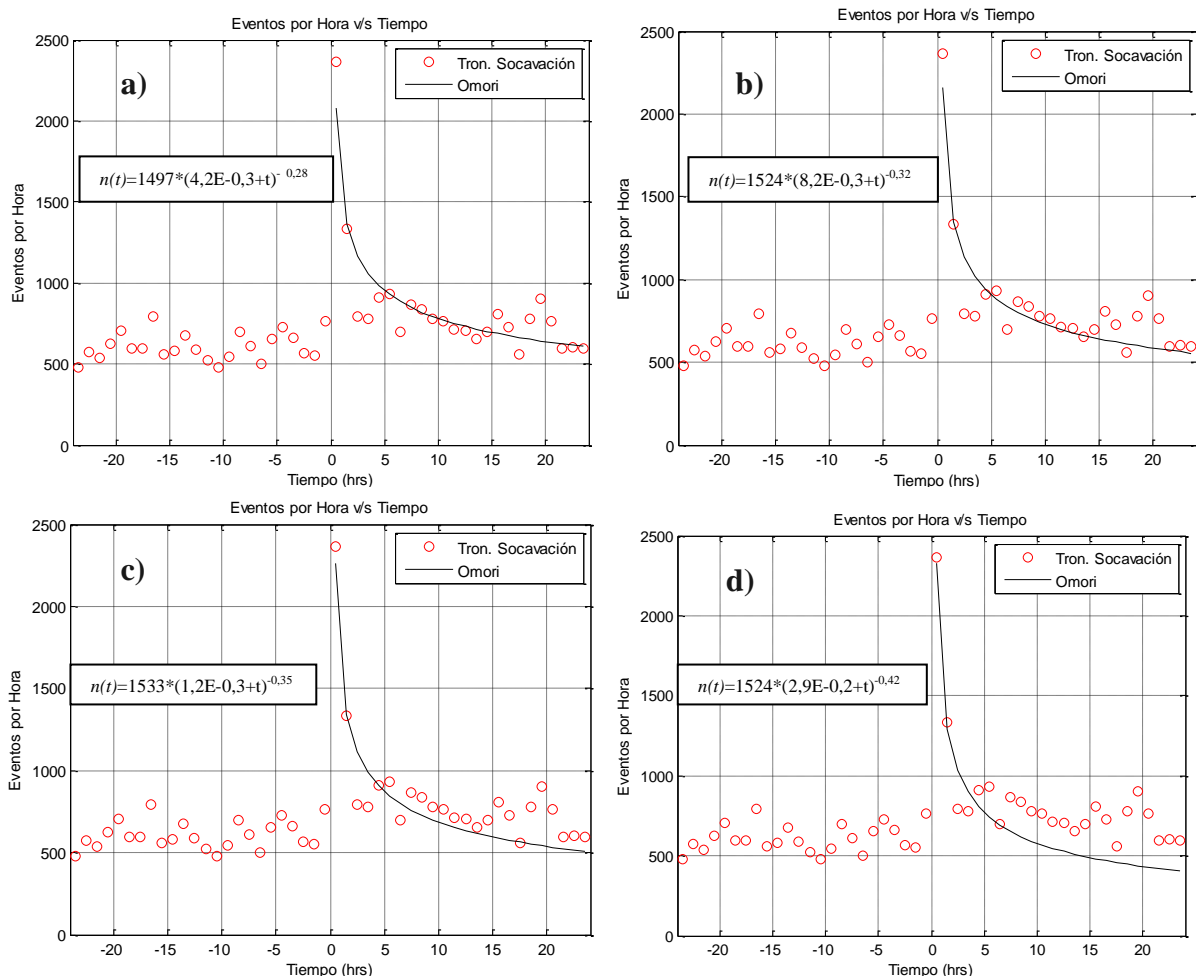


Figura 63. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de socavación.

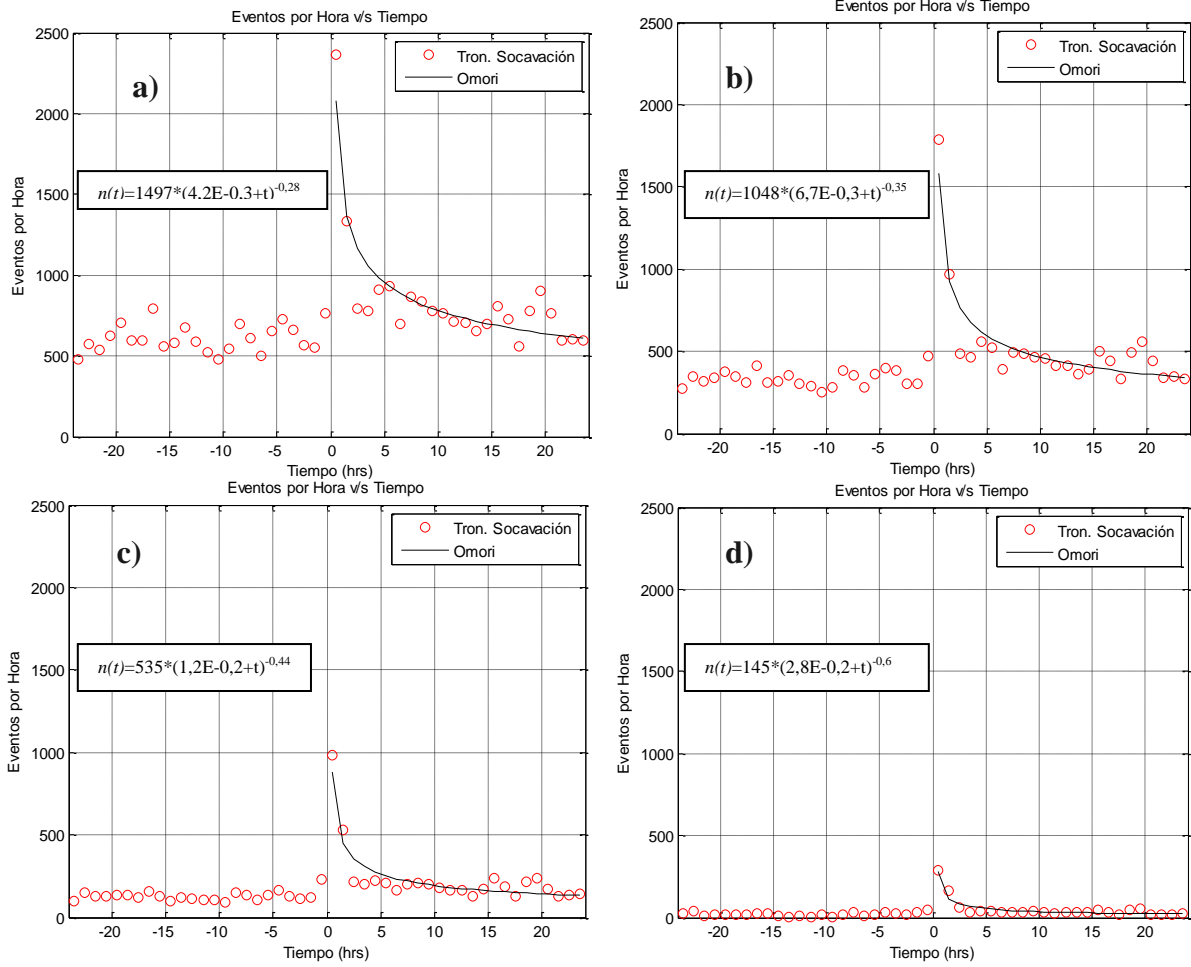


Figura 64. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de socavación.

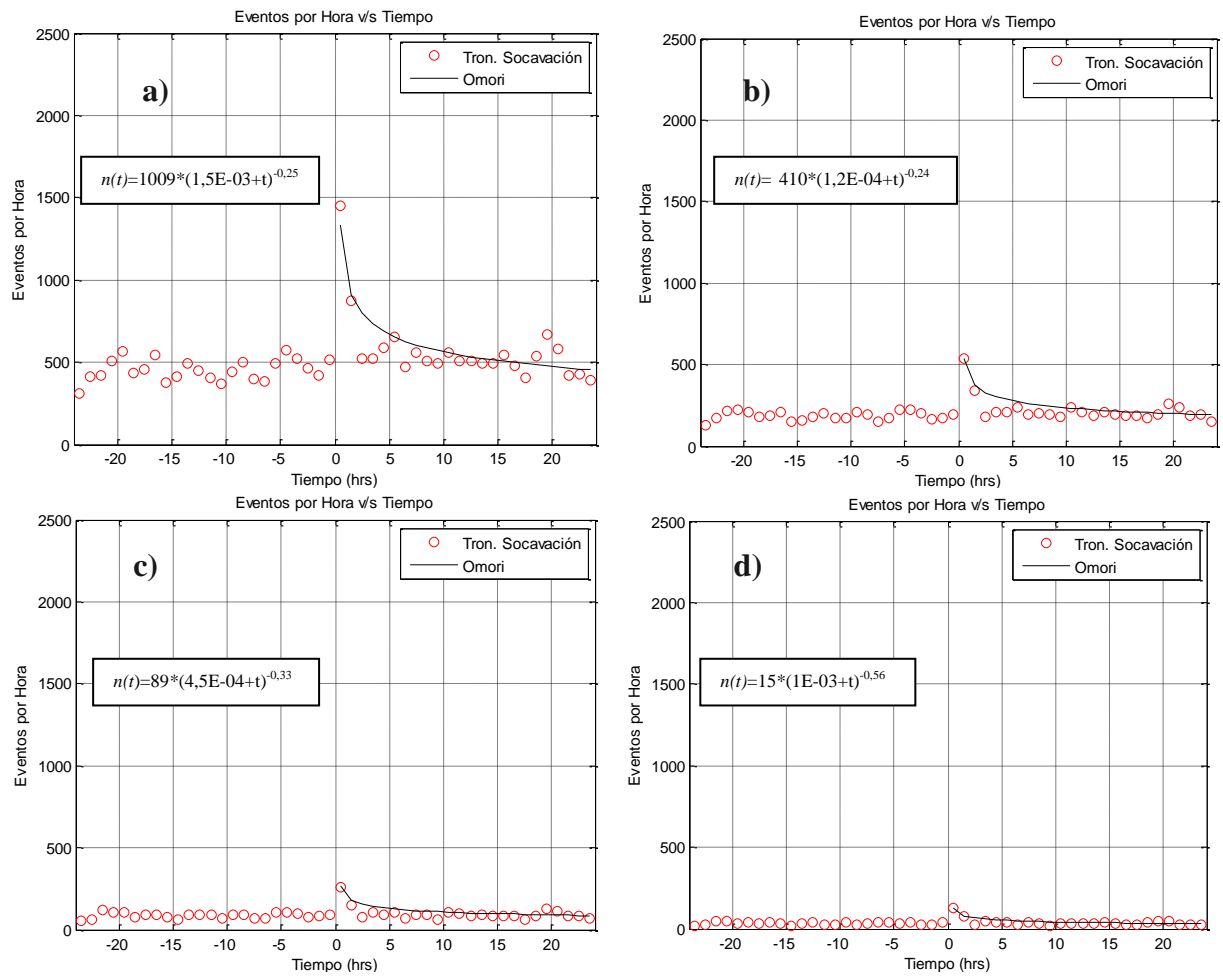


Figura 65. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC}=-1,2$, b) $M_{WC}=-0,8$, c) $M_{WC}=-0,6$, d) $M_{WC}=-0,4$, tronaduras de socavación.

4.7.2. Tronaduras de Batea Normal

Igualmente es posible graficar para el caso de tronaduras de batea normal la frecuencia de eventos por hora y la curva de Omori ajustada considerando la variación de T_B , R y M_{WC} (Figura 66, Figura 67 y Figura 68, respectivamente), se tiene lo siguiente:

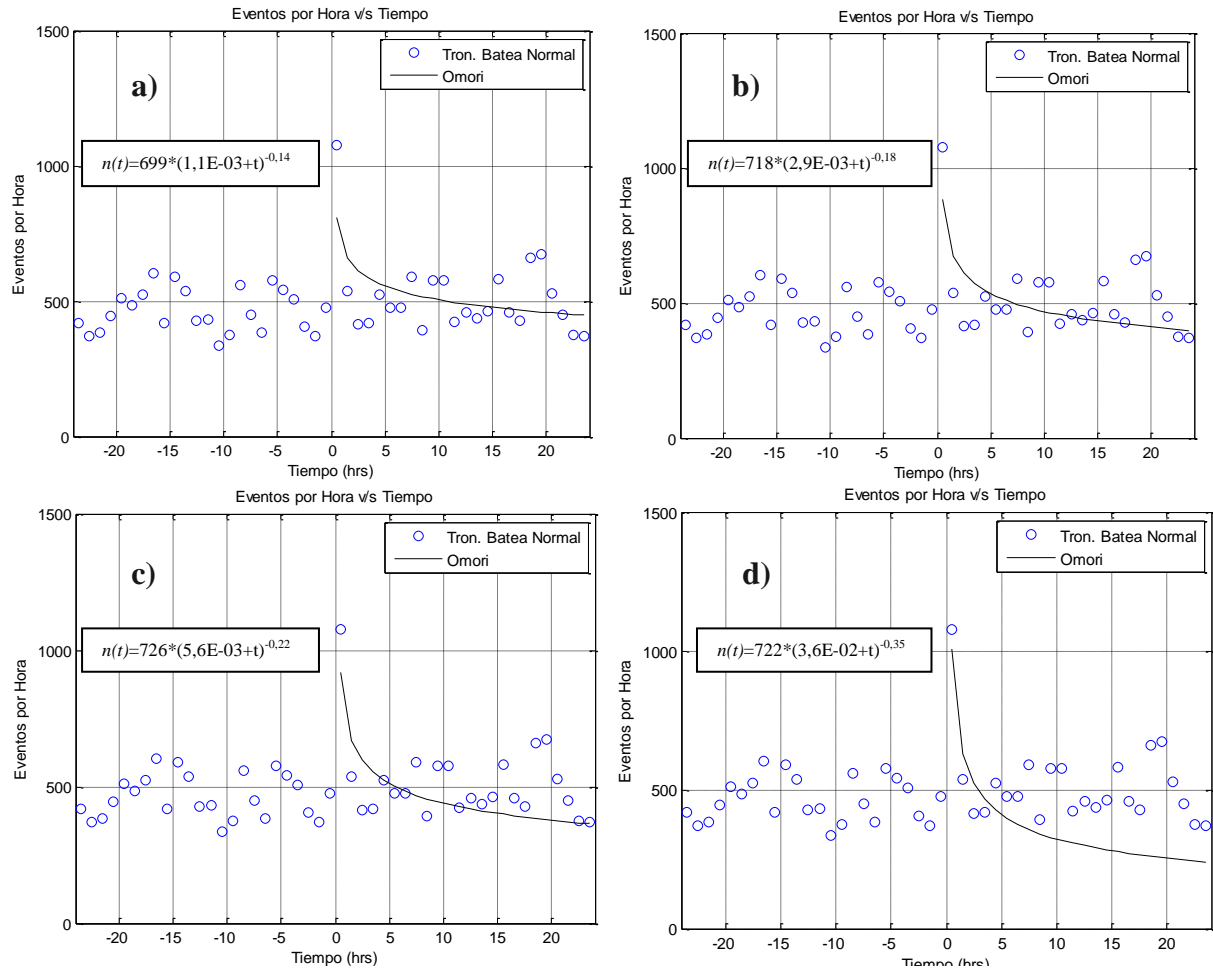


Figura 66. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de batea normal.

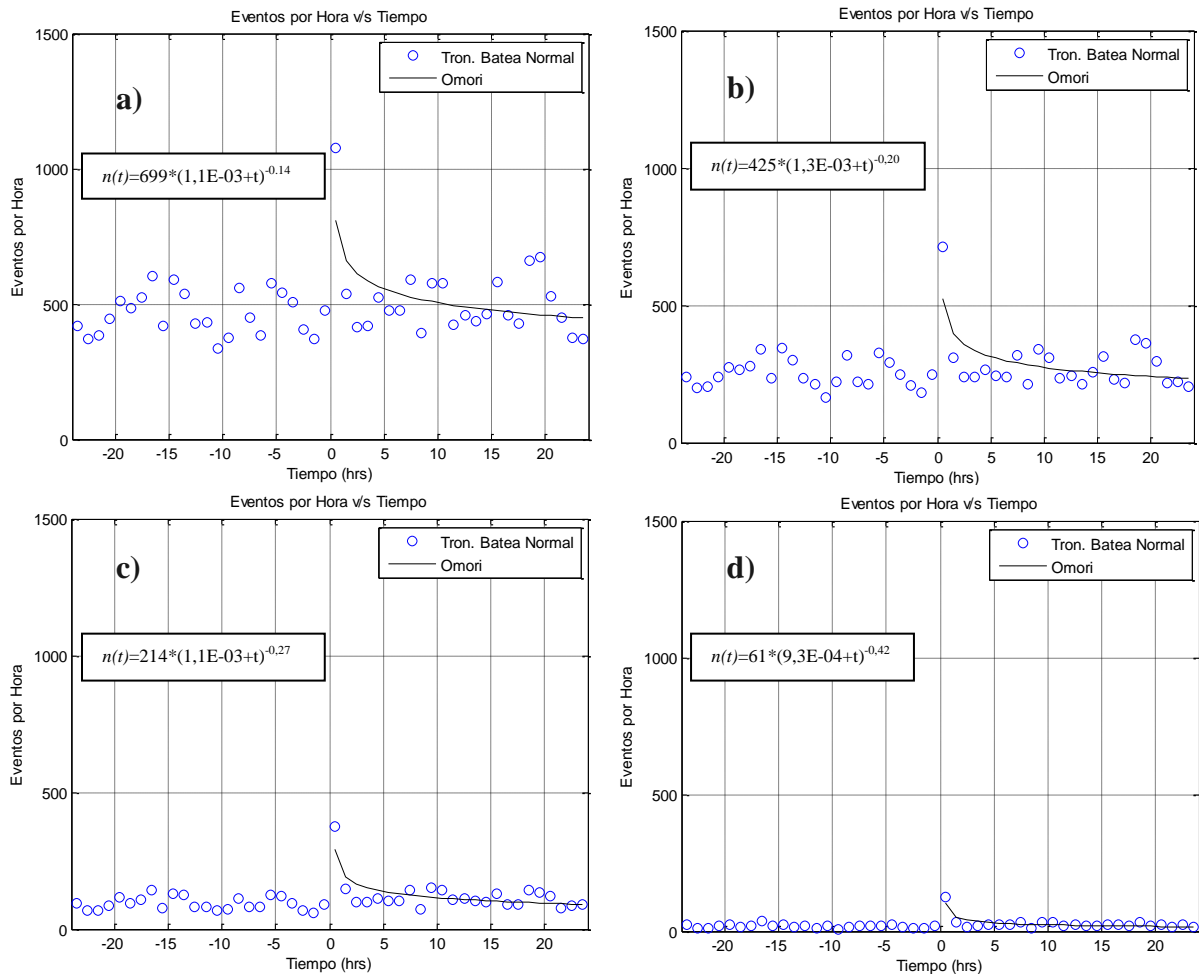


Figura 67. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de batea normal.

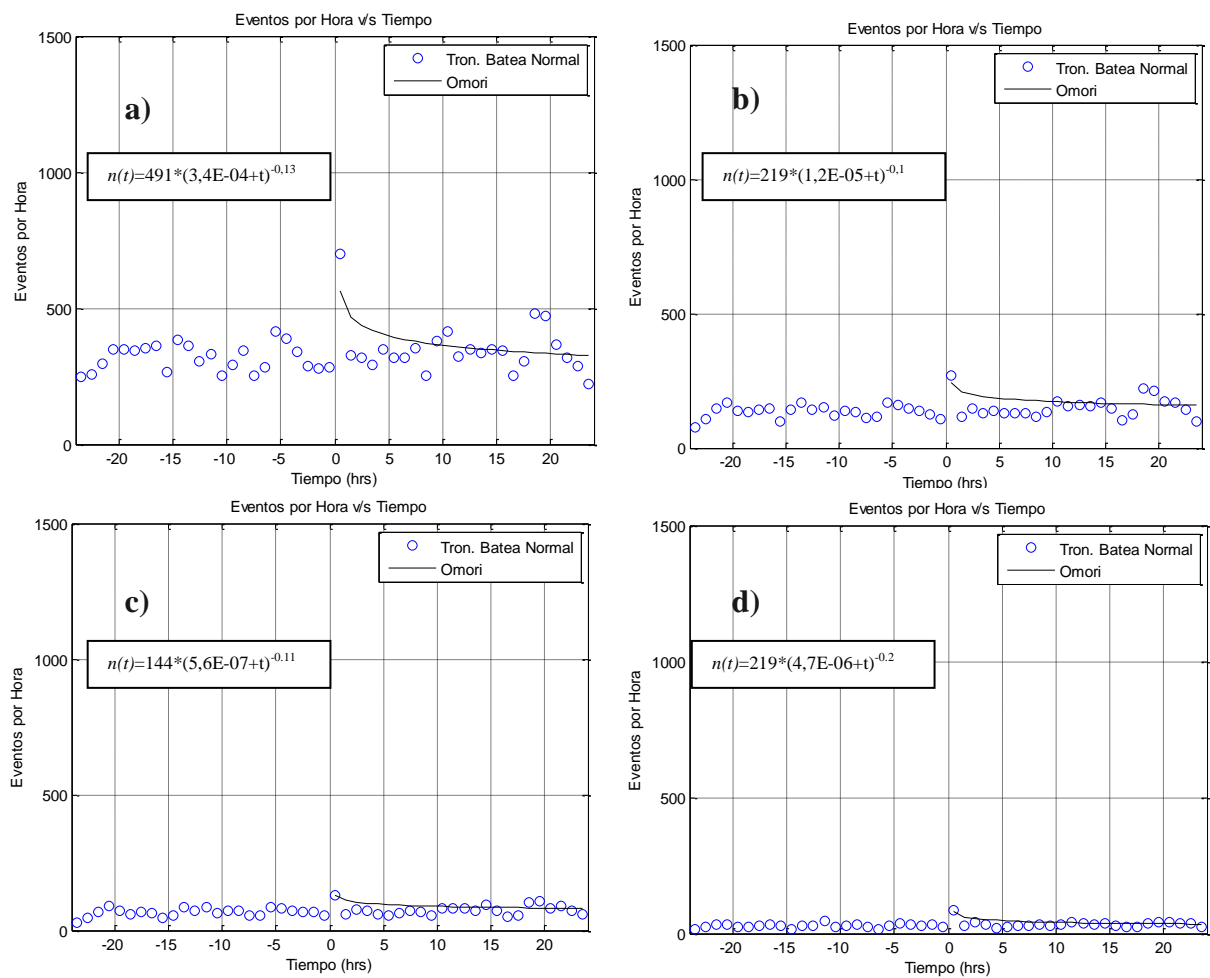


Figura 68. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC} = -1,2$, b) $M_{WC} = -0,8$, c) $M_{WC} = -0,6$, d) $M_{WC} = -0,4$, tronaduras de batea normal.

4.7.3. Tronaduras de Batea Alta

Para el caso de tronaduras de batea alta se grafica la frecuencia de eventos por hora y la curva de Omori ajustada considerando la variación de T_B , R y M_{WC} (Figura 69, Figura 70 y Figura 71, respectivamente), se tiene lo siguiente:

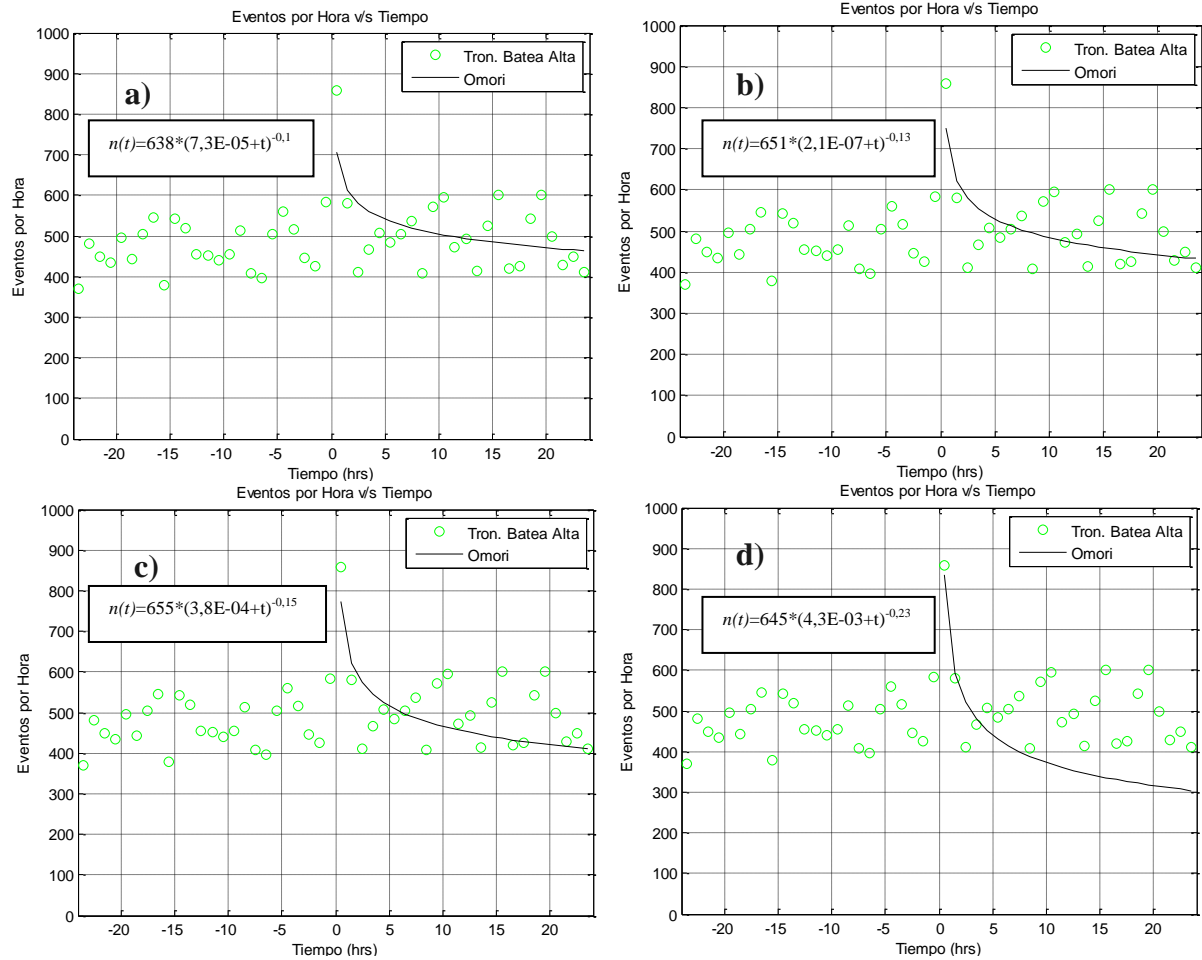


Figura 69. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $T_B=24$ hrs, b) $T_B=18$ hrs, c) $T_B=12$ hrs, d) $T_B=6$ hrs, tronaduras de batea alta.

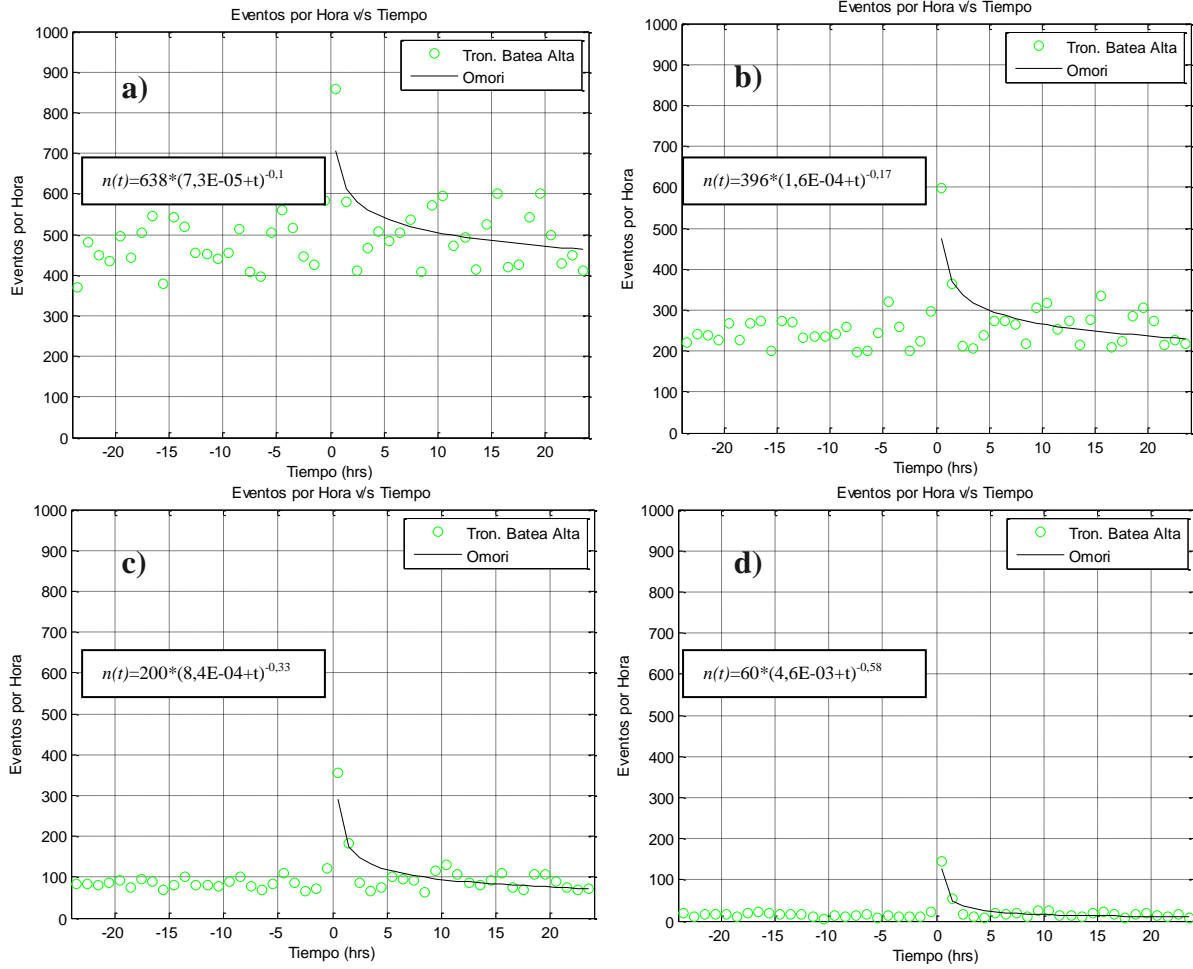


Figura 70. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $R=200$ m, b) $R=150$ m, c) $R=100$ m, d) $R=50$ m, tronaduras de batea alta.

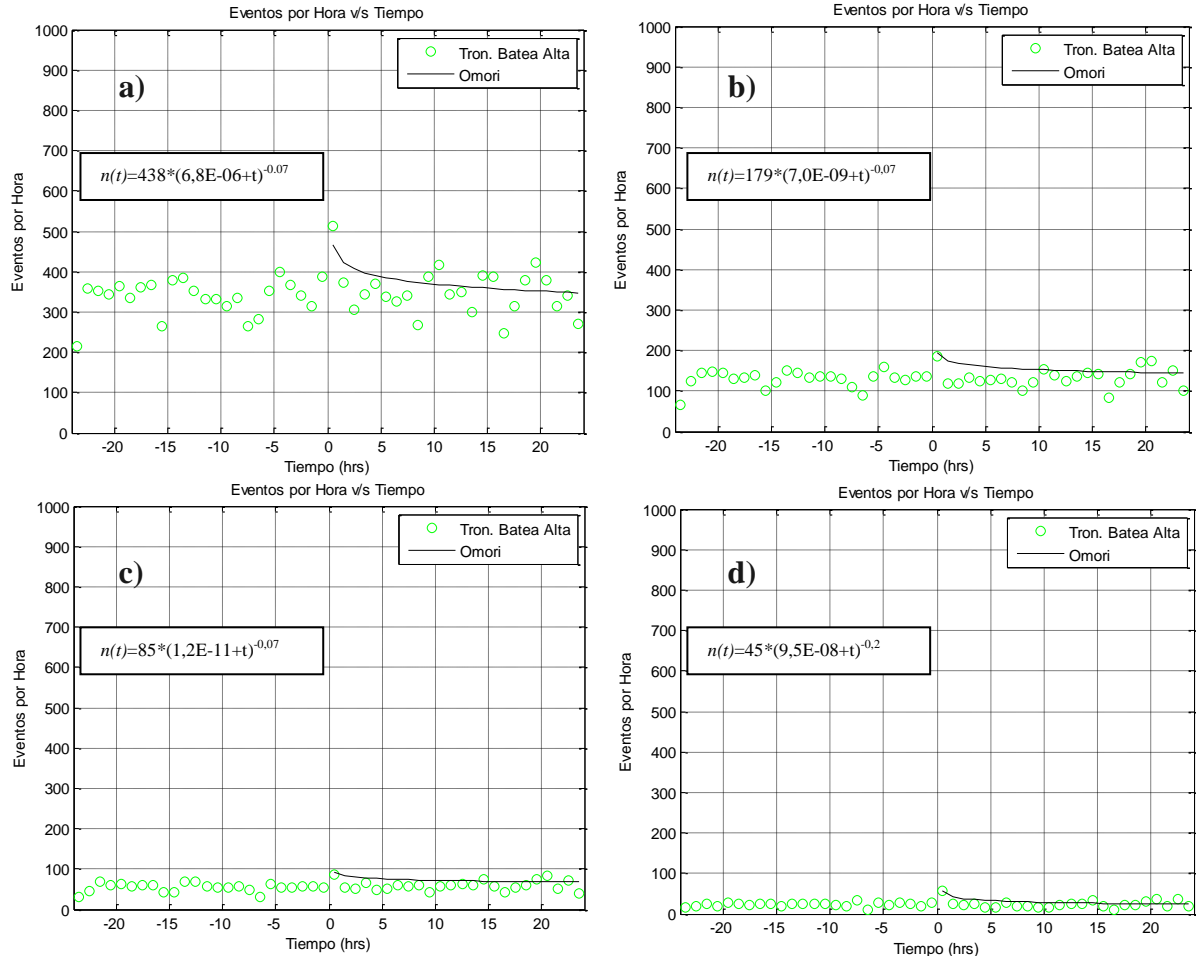


Figura 71. Ajuste de Omori a secuencias superpuestas: a) $M_{WC} = -1,2$, b) $M_{WC} = -0,8$, c) $M_{WC} = -0,6$, d) $M_{WC} = -0,4$, tronaduras de batea alta.

Con respecto a las figuras que muestran los graficos de ajuste de Omori para cada tipo de tronadura se tiene que: la disminuci3n de T_B , genera un decaimiento m1s marcado de la curva de Omori ajustada en el tiempo, debido a que esta tiene una mayor influencia de los eventos sismicos generados inmediatamente despu3s de la tronadura, la disminuci3n de R genera una atenuaci3n del ruido s3smico, una disminuci3n de la productividad de eventos y un aumento del decaimiento potencial, por su parte el aumento de M_{WC} genera una disminuci3n del ruido s3smico y de la productividad de eventos, el decaimiento potencial es relativamente el mismo para distintos valores de M_{WC} .

4.7.4. Resumen

En resumen se tienen los siguientes valores de los parámetros de ajuste de la ley de Omori modificada en función de T_B , R y M_{WC} :

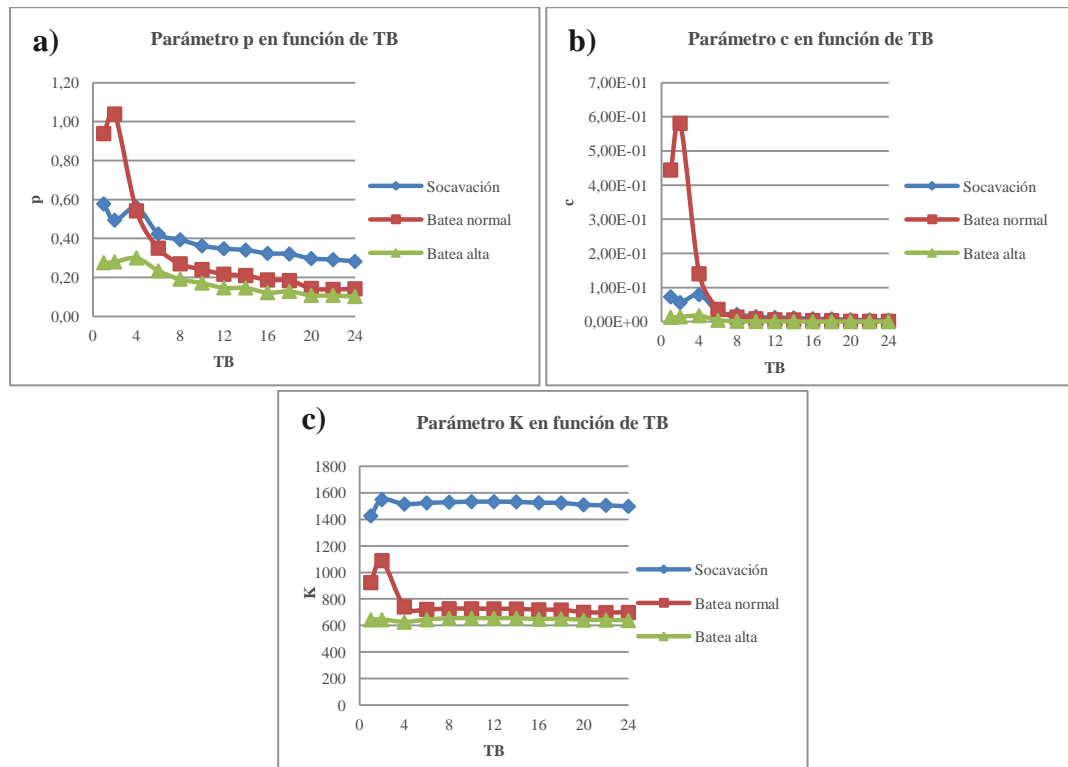


Figura 72. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de T_B para distintos tipos de tronaduras.

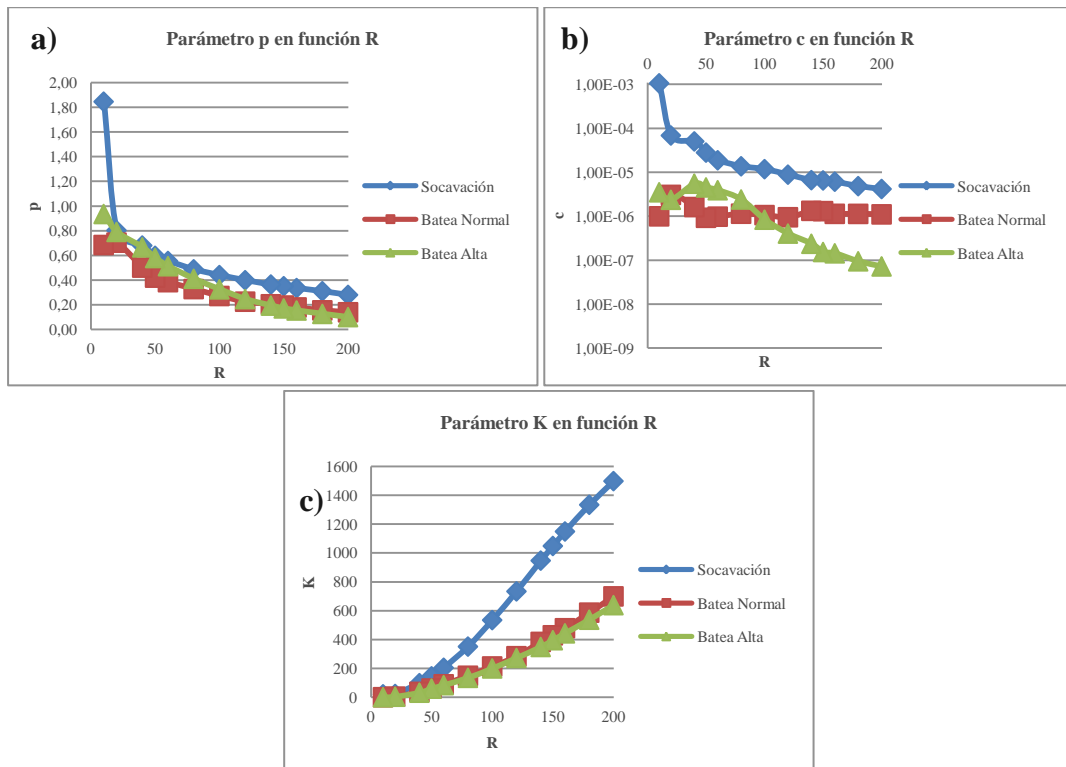


Figura 73. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de R para distintos tipos de tronaduras.

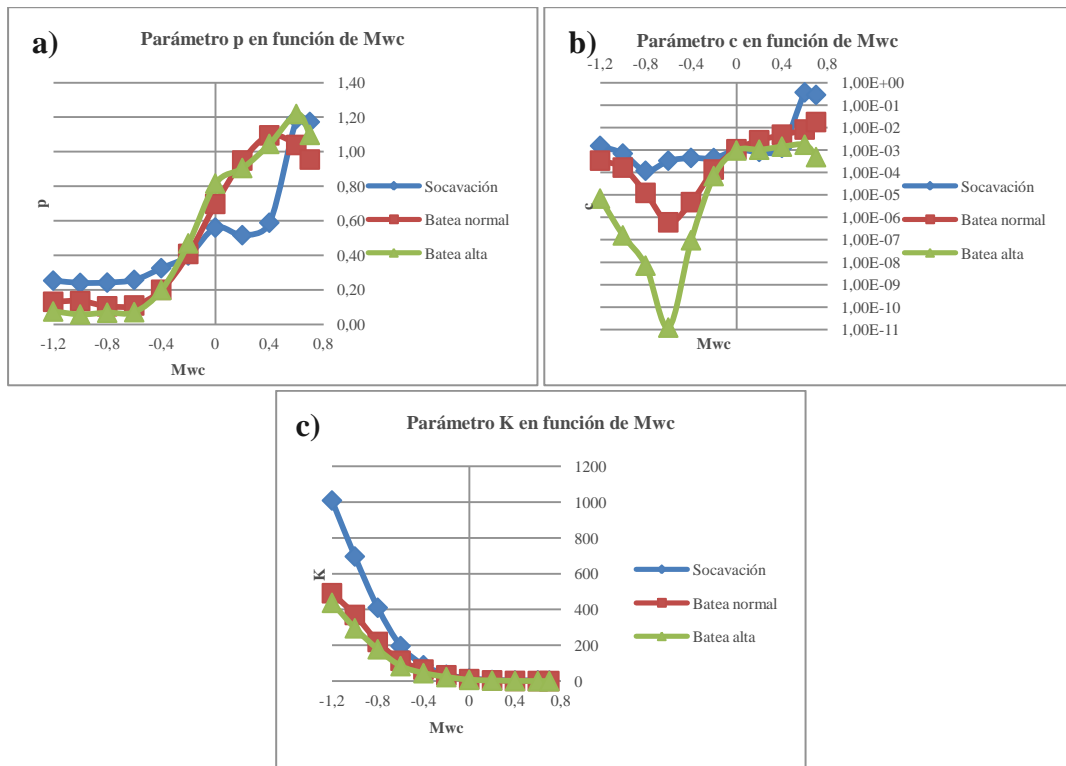


Figura 74. Parámetros: a) p , b) c y c) K , en función de M_{wc} para distintos tipos de tronaduras.

A partir de los gráficos anteriores se tiene que, el valor del parámetro p es mayor para las tronaduras de socavación y menor para las tronaduras de batea. Con respecto a la Figura 72 a) se tiene que, para $T_B < 4$ hrs los valores de p se incrementan considerablemente. El ruido sísmico genera que el ajuste potencial no sea tan evidente, luego el valor de los parámetros no corresponde a los valores esperados, al menos para un $T_B > 4$ hrs, un $R > 60$ m y un $M_{WC} > -0,2$.

La Figura 73, muestra que p aumenta considerablemente (más que con la disminución de T_B) si se disminuye R . Este valor es similar para tronaduras de batea alta y socavación para valores de $R \leq 50$ m, para valores de $R \geq 120$ m las tronaduras de batea alta y normal poseen un comportamiento similar. La Figura 74, muestra que las tronaduras de batea normal y alta poseen un mínimo valor de c a un $M_{WC} = -0,6$ y para tronaduras de socavación a un $M_{WC} = -0,8$.

El valor c aumenta al disminuir T_B para tronaduras de socavación, batea normal y batea alta. Al disminuir R en cambio el parámetro c aumenta para tronaduras de socavación y batea alta. El valor de K se mantiene relativamente constante para cambios de T_B , aumenta al aumentar R y disminuye al aumentar M_{WC} .

La elección del mejor ajuste se basa en la determinación del $AIC1$ mínimo, considerando el efecto de t^* a cierto R , para cada tipo de tronadura.

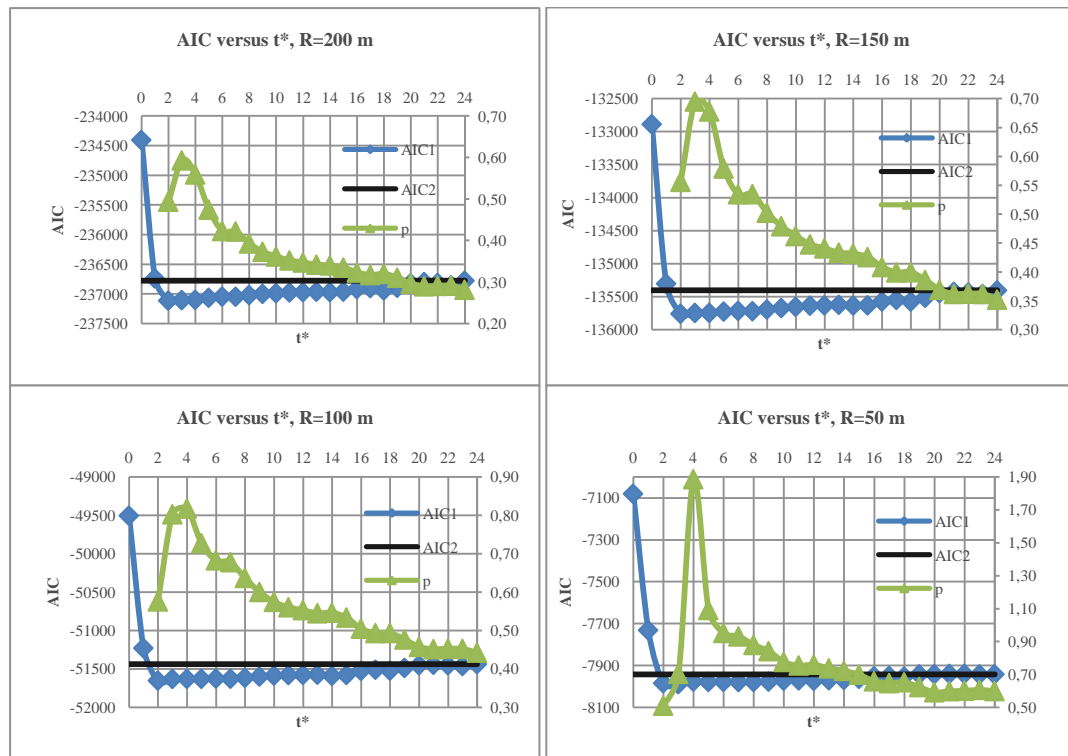


Figura 75. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de socavación.

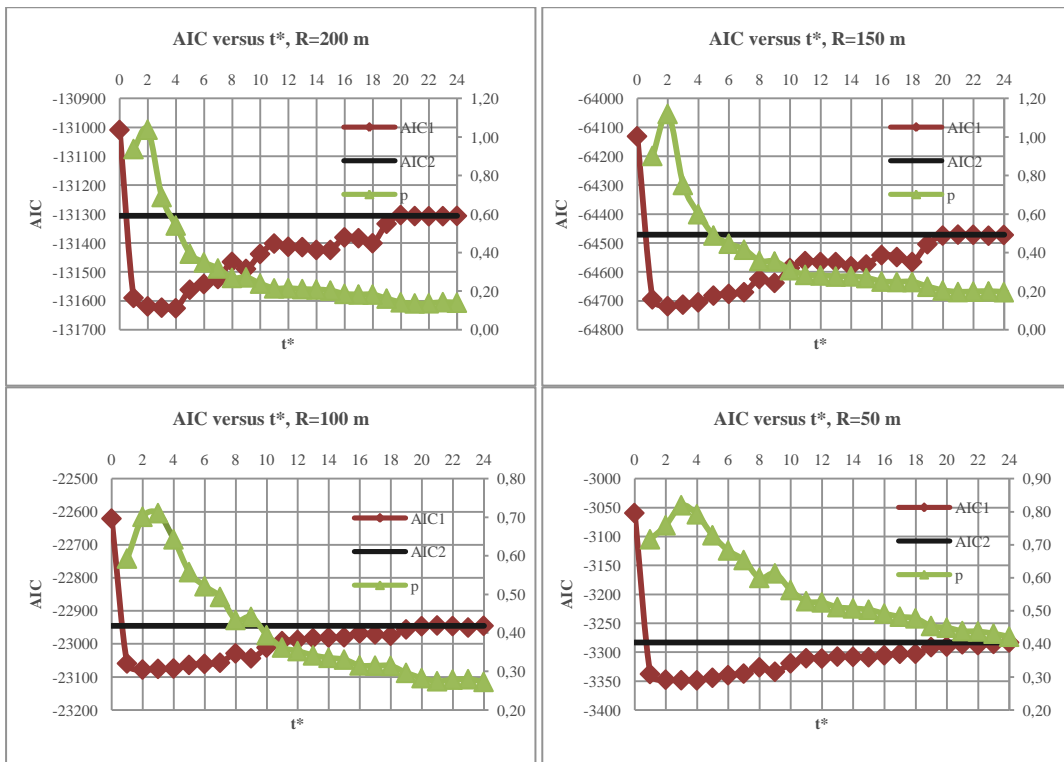


Figura 76. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de batea normal.

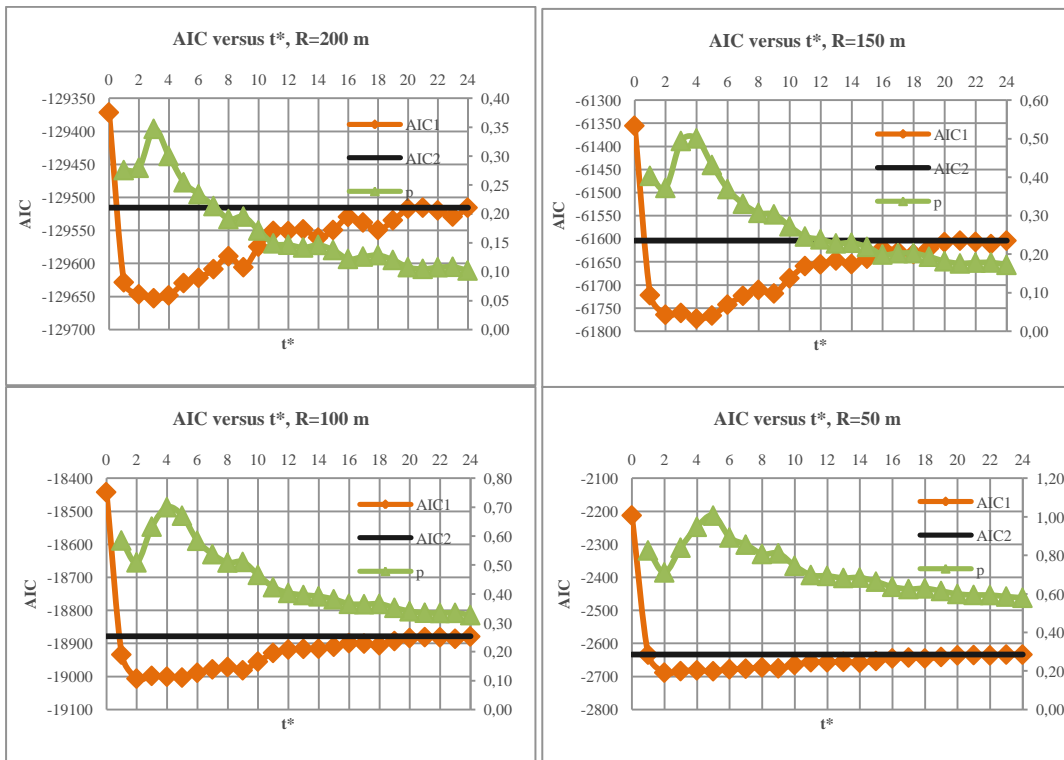


Figura 77. Efecto de t^* y R en la elección del mejor ajuste de Omori, tronaduras de batea alta.

A partir de las figuras anteriores, es posible observar de que los valores mínimos de $AIC1$ se alcanzan a t^* entre 2 y 4 hrs independiente de R , para cualquier tipo de tronadura.

4.8. Clasificación de registros sísmicos

En esta sección se revisa la consistencia del historial de los parámetros sísmicos. Para mina El Teniente no existe un registro conjunto que almacene los eventos sísmicos y las tronaduras que se llevan a cabo en las inmediaciones del sistema minero. Por ende se crea un nuevo catálogo que incluya los parámetros de fuente sísmica más importantes de las tronaduras de incorporación de área, además de los eventos del historial sísmico original, ordenados temporalmente. La clasificación de tronaduras se lleva a cabo mediante regresión logística considerando los registros totales de mina RENO, sin limitar el espacio-tiempo como se hizo en secciones anteriores. Los parámetros sísmicos a considerar en la calibración del modelo de regresión logística según la metodología en la sección 3.6 se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetros Sísmicos utilizados para la generación del modelo de clasificación.

Símbolo	Nombre
$\log E$	Logaritmo de la energía radiada
M_w	Momento magnitud
f_0	Frecuencia esquina
$\log E_s/E_p$	Logaritmo de la razón entre la energía S y la energía P
$\log \sigma_A$	Logaritmo del esfuerzo aparente
r	Radio de ruptura
$\log \Delta\sigma$	Logaritmo de la caída de esfuerzo estático
$\log VA$	Logaritmo del volumen aparente

4.8.1. Consistencia temporal de parámetros sísmicos

Es necesario revisar antes de cualquier estudio que implique la generación de un modelo predictivo la consistencia temporal de los parámetros sísmicos obtenidos del nuevo historial sísmico de mina RENO para los años 2009-2010. Si en los parámetros independientes graficados en el tiempo se generan saltos, entonces quiere decir que la adquisición de datos durante el monitoreo no es estable debido a cambios en la configuración del sistema sísmico, por ejemplo; software, hardware, posición de los sensores y/o cambios en la cobertura de monitoreo. Al contrario, si no existen dichos saltos en el tiempo el modelo ajustado es capaz de estimar correctamente en el espectro temporal para el periodo comprendido entre el año 2009 y el 2010.

M_W en el Tiempo

Con el objeto de verificar si existe inconsistencia temporal se propone graficar los parámetros sísmicos con los cuales se trabajará para la calibración de un modelo consistente en el tiempo de análisis. A continuación se presenta el parámetro momento magnitud en el tiempo (Figura 78).

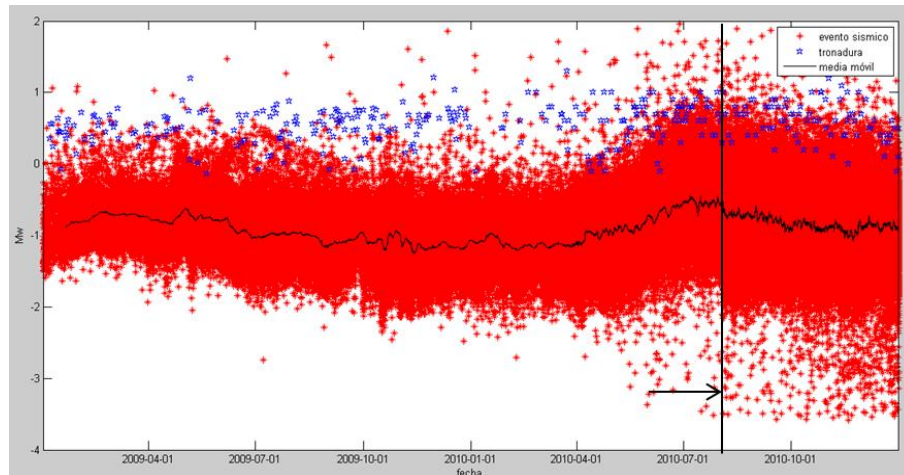


Figura 78. M_W en el tiempo (2009-2010), consistencia de parámetros sísmicos.

En la Figura 78, se observa efectivamente un registro continuo en el tiempo, sin embargo a mediados de 2010 se evidencia una mayor cantidad de registros de eventos sísmicos, lo que genera un efecto de pequeño desfase. El comportamiento de la media móvil es bastante estable en los dos años consecutivos a pesar de la gran cantidad de datos. La siguiente figura muestra una ampliación del periodo en cuestión:

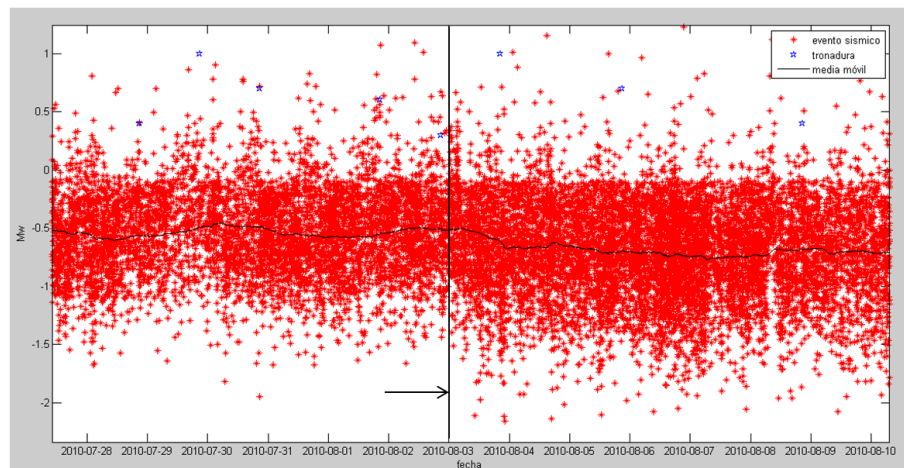


Figura 79. Consistencia de M_W en una escala de tiempo ampliada.

Desde la fecha 03-08-2010, se observa un aumento de frecuencia de eventos, lo cual no representa un salto particular por inconsistencia en la red sísmica, sino más bien un procesamiento mayor de eventos, especialmente de menor magnitud.

E en el Tiempo

Otra variable de la cual importa su continuidad es la energía irradiada, su gráfico respectivo se presenta a continuación:

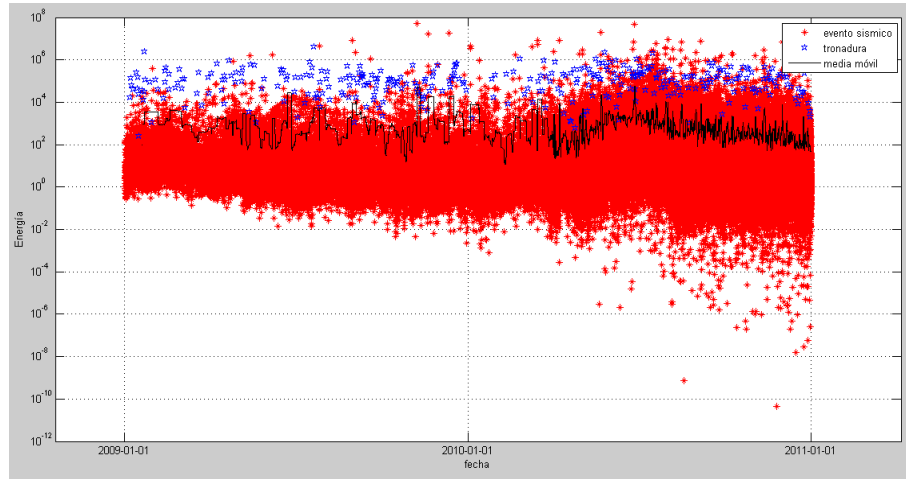


Figura 80. *E* en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

En la figura anterior tomando escala logarítmica en el eje y, se observa que existe una forma similar al gráfico magnitud en el tiempo, la media móvil cambia con más frecuencia a partir del segundo trimestre del 2010.

***f*o en el Tiempo**

El gráfico de frecuencia esquina en el tiempo se presenta a continuación:

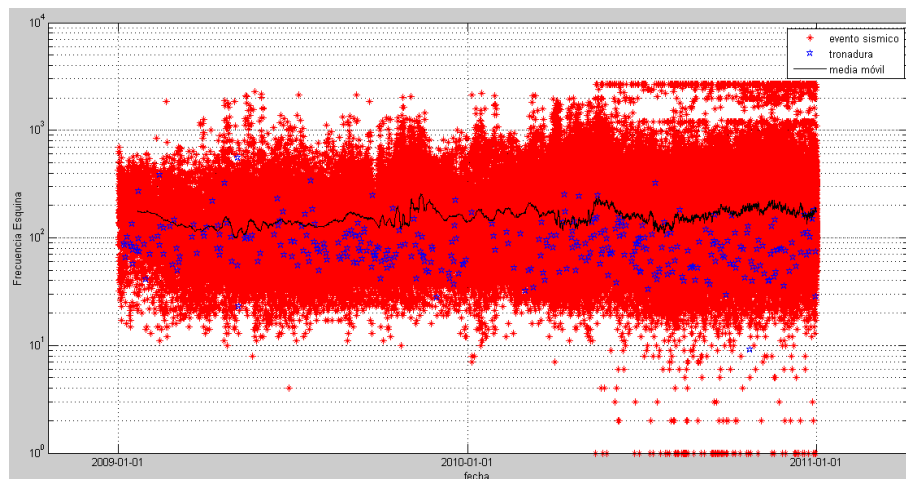


Figura 81. *f*o en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

La Figura 81, muestra una mayor continuidad de los datos en el tiempo, esto representado por la media móvil, efectivamente existen valores altos de esta variable a partir de del segundo trimestre del 2010.

Es/Ep en el Tiempo

El gráfico de Es/Ep en el tiempo se presenta a continuación:

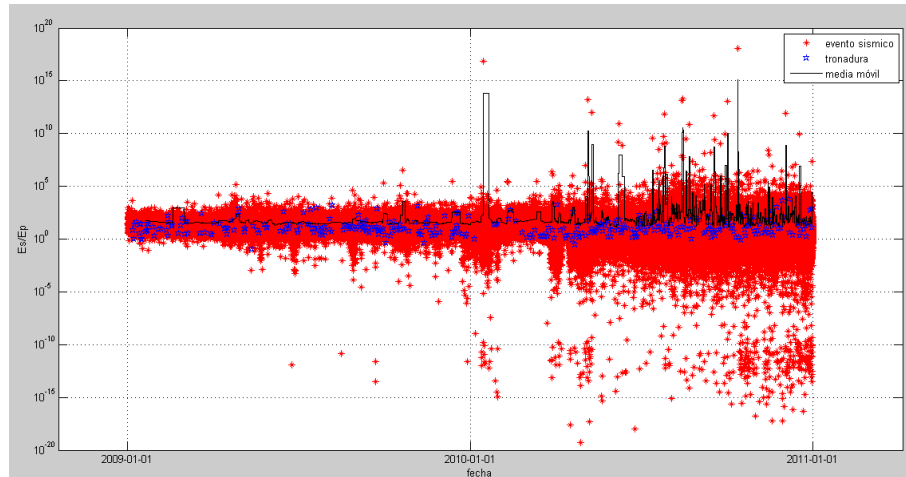


Figura 82. Es/Ep en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

En la Figura 82, si bien se presenta consistencia en el tiempo, se observa un comportamiento de media móvil un poco errática a partir del segundo trimestre del año 2010, generado por valores de Es/Ep extremos.

σA en el Tiempo

El gráfico de esfuerzo aparente en el tiempo se presenta a continuación:

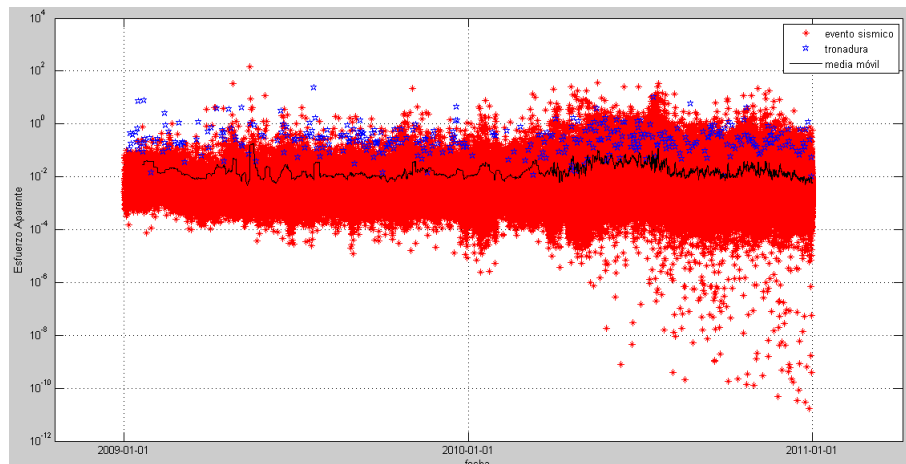


Figura 83. σA en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

r en el Tiempo

El gráfico de radio de ruptura en el tiempo se presenta a continuación:

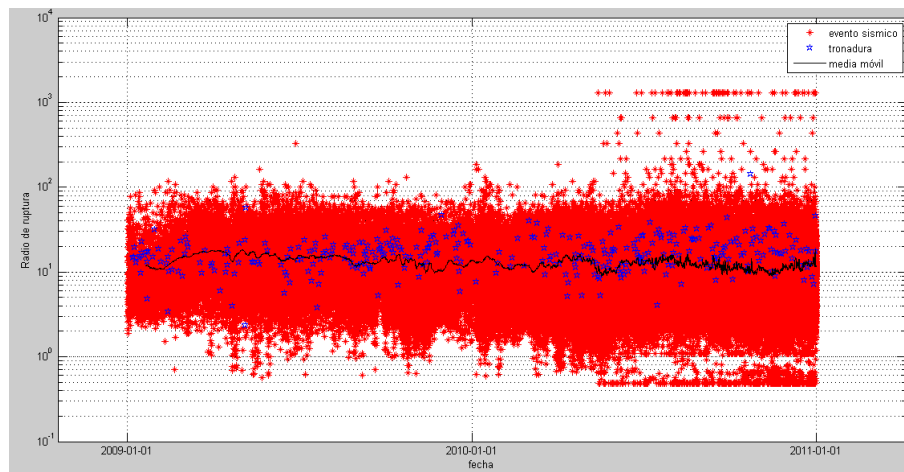


Figura 84. r en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

$\Delta\sigma$ en el Tiempo

El gráfico de caída de esfuerzo en el tiempo se presenta a continuación:

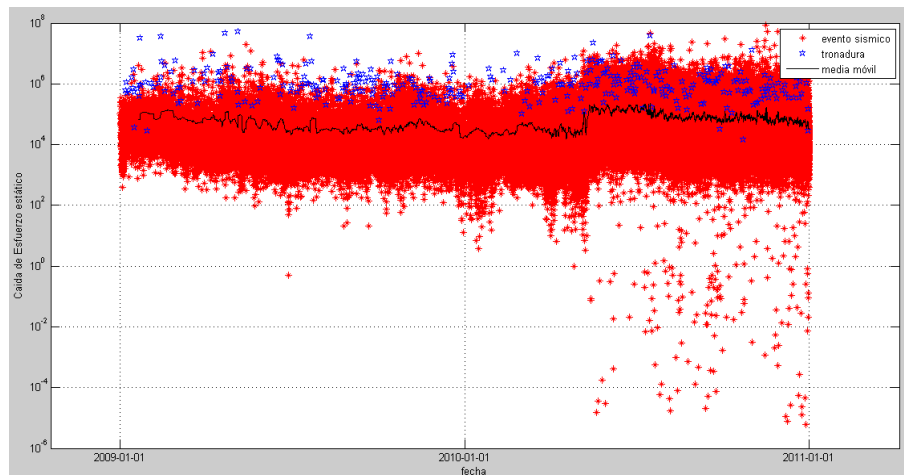


Figura 85. $\Delta\sigma$ en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

VA en el Tiempo

El gráfico de volumen aparente en el tiempo se presenta a continuación:

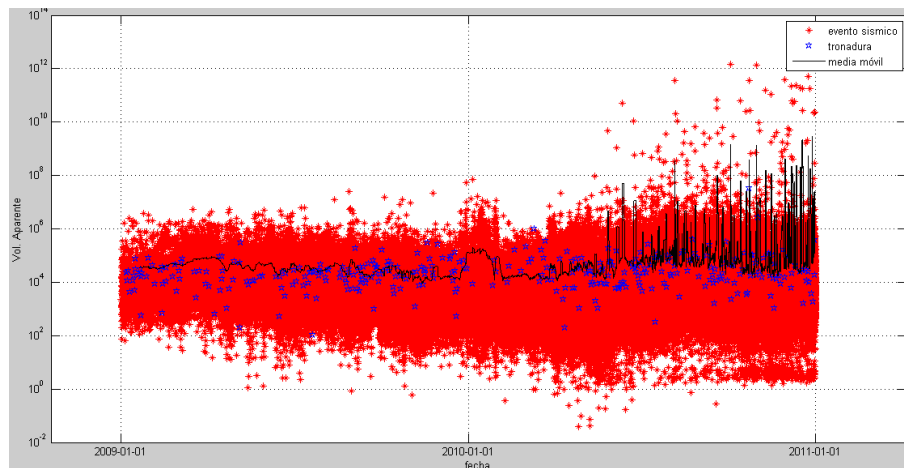


Figura 86. VA en el tiempo, consistencia de parámetros sísmicos.

La Figura 86, presenta igualmente saltos considerables a partir del segundo trimestre del 2010.

Los Gráficos mostrados anteriormente presentan consistencia temporal es decir, no presentan saltos realmente considerables en el tiempo, esta baja variación temporal sugiere la utilización del periodo 2009-2010 completo para la calibración del modelo de clasificación. Sin embargo, se observa la existencia de valores extremos aislados especialmente a partir del segundo trimestre del 2010, la condición anterior del historial conduce a la generación de un filtro que suavice los parámetros sísmicos, sin que estos pierdan la representatividad de la sismicidad registrada en el periodo en cuestión.

4.8.2. Análisis exploratorio de datos

Antes de generar el filtro propuesto en el párrafo anterior, es necesario hacer un estudio exploratorio de datos para conocer el comportamiento entre las variables independientes a introducir en el modelo. Es posible generar las siguientes gráficas de dispersión, mostrando además las tres clases de registros sísmicos existentes en el nuevo catálogo sísmico:

Es/Ep versus Mo

A continuación se presenta un gráfico de razón E_s/E_p versus momento magnitud:

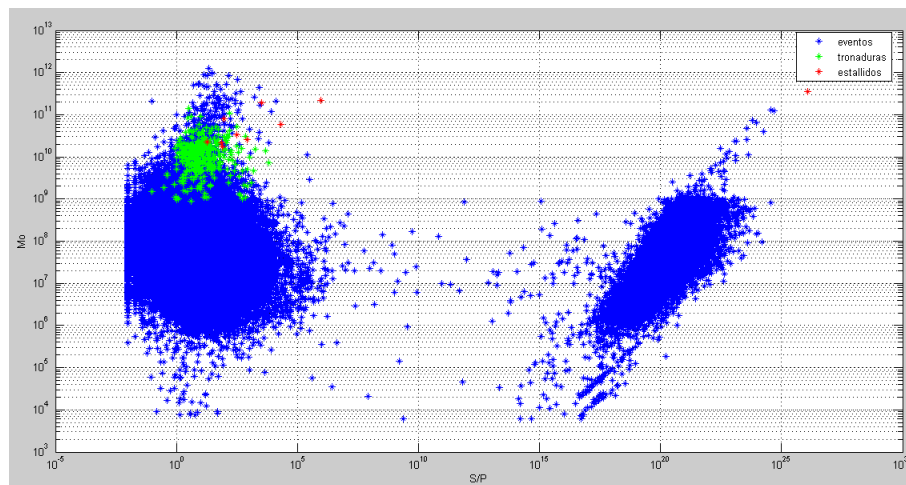


Figura 87. Dispersión de datos, E_s/E_p versus M_o en escala logarítmica.

Se observa en esta Figura 87, que existen dos familias de datos, esto viene dado efectivamente porque existen valores de energía de onda P muy cercanas a cero, y por ende la razón E_s/E_p es muy grande. Además se observa que existen tres clases marcadas de acontecimientos (evento sísmico, tronadura, estallido). De los cuales los estallidos de rocas poseen en general un momento sísmico y razones E_s/E_p alto.

Mo versus E

A continuación se presenta un gráfico de momento magnitud versus energía radiada:

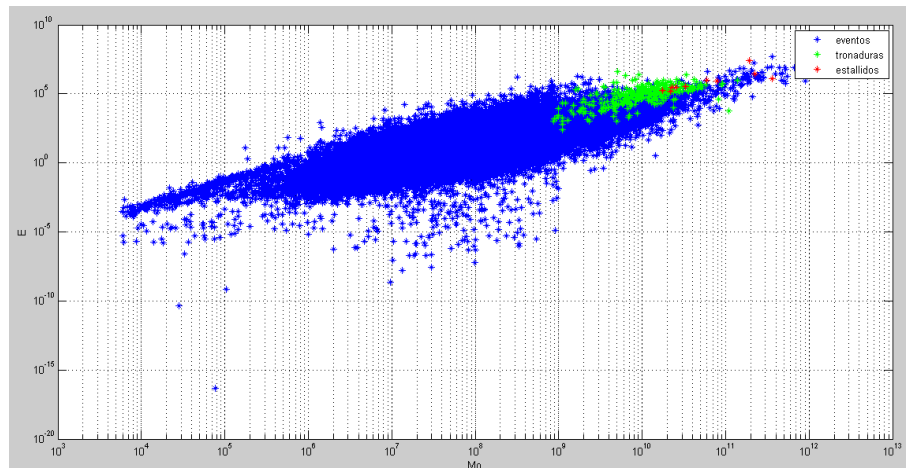


Figura 88. Dispersión de datos, E versus M_o en escala logarítmica.

La Figura 88, muestra la relación directamente proporcional entre momento y la energía. La relación entre E y M_o , se ha evidenciado desde 1992 para mina El teniente debido a la generación de sismicidad inducida por tronaduras en el UCL.

Existen tres clases marcadas, a mayor momento y energía es más probable encontrar un estallido (Figura 88). Las tronaduras presentan un comportamiento intermedio entre un evento sísmico de baja intensidad y un estallido de roca.

E versus fo

A continuación se presenta un gráfico de energía radiada versus frecuencia esquina:

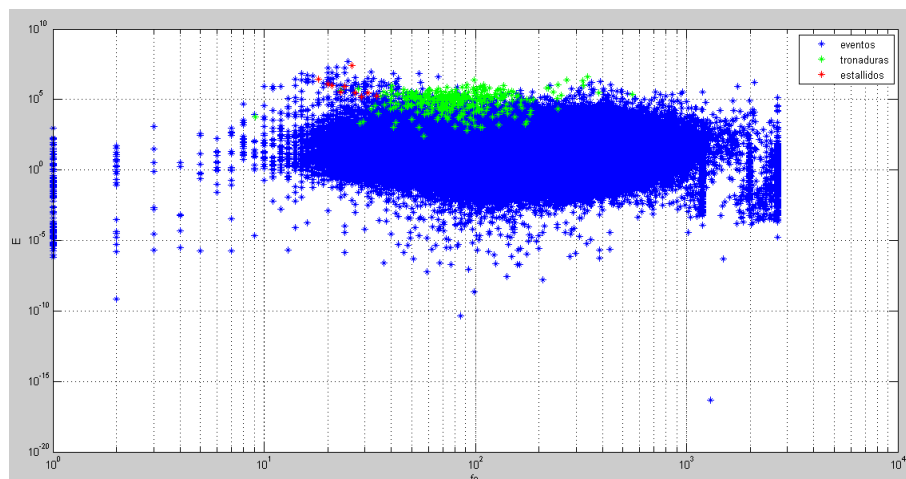


Figura 89. Dispersión de datos, E versus f_o en escala logarítmica.

Existe una leve relación inversa entre la energía y la frecuencia esquina para las tres clases de registros, lo cual es consistente con la literatura, ya que es de esperar que generalmente a frecuencias bajas se libere más energía y se genere un mayor daño.

Es/Ep versus E

A continuación se presenta un gráfico de razón E_s/E_p versus energía radiada:

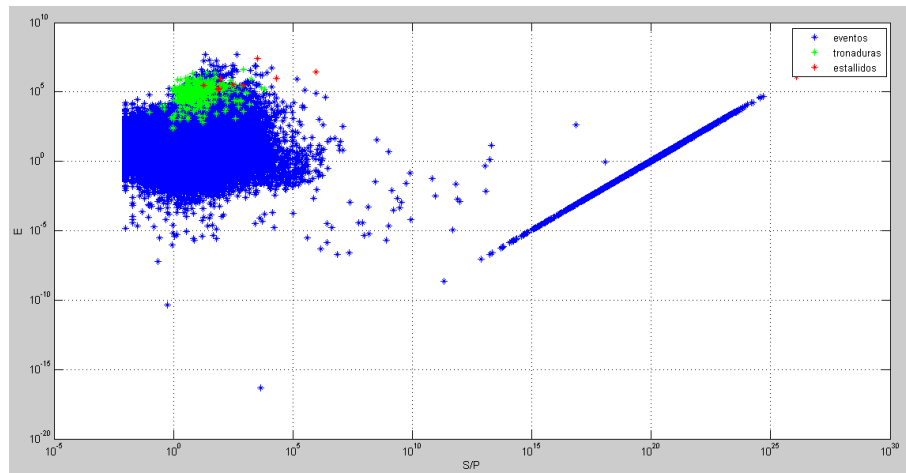


Figura 90. Dispersión de datos, E versus S/P en escala logarítmica.

Cabe destacar la relación marcada de la familia eventos en la parte derecha de la Figura 90. Estos datos conforman un conjunto de datos sospechosos debido a su alineamiento en la dispersión, luego para generar el análisis y hacer que el estudio sea más consistente se eliminarán de la data.

4.8.3. Filtro

Tomando en consideración el comportamiento de los parámetros sísmicos en el tiempo y el estudio exploratorio expuesto anteriormente, es posible efectivamente plantear un filtro que genere una base de datos consistente sin perder la representatividad de los datos ni disminuir la cantidad de estos. Por lo general los filtros planteados respetan condiciones físicas lógicas, por ejemplo: si un evento sísmico existe en la base de datos, el valor de la energía radiada o el momento no pueden ser igual a cero.

Las restricciones utilizadas en la base de datos se muestran a continuación:

1. Número de Estaciones > 4 . Esta variable se restringe debido a que es necesario mantener cierta consistencia del número mínimo de estaciones que capta la señal, un N alto tiene una mayor probabilidad de captar señales confiables, debido al ruido del sistema. Las señales poco confiables pueden generar una localización deficiente y parámetros sísmicos incorrectos (Joughin, 2007).

2. $M_w \geq -1,05$. Esta variable se restringe debido a que para mina El Teniente, considera un análisis manual estandarizado de las señales de ondas hasta un $M_w \geq -1$. Una señal procesada automáticamente por el sistema generalmente presenta un cálculo de los parámetros sísmicos poco confiable.
3. $E > 0$. Esta restricción se considera debido a que es inconsistente considerar parámetros cuya medición de energía radiada es nula.
4. $M_o > 0$. Esta restricción se considera debido a que es inconsistente considerar parámetros cuya medición de momento sísmico es nulo.
5. $f_o > 0$. Esta restricción se considera debido a que es inconsistente considerar parámetros cuya medición de frecuencia esquina sea nula.
6. $E_s/E_p > 0,001$. Esta variable se restringe debido a que no puede ser nula, pero puede ser pequeña para valores altos de E_p .
7. $E_p > 0,01$. Esta variable se restringe debido a que si es nula, la razón E_s/E_p se indefine.
8. Eliminar del historial sísmico la categoría estallidos de roca. Se eliminan los estallidos, debido a que su población es comparativamente (con respecto a la cantidad de tronaduras y eventos sísmicos) muy baja, con un total de sólo 10 registros. El presente estudio pretende identificar tronaduras con respecto a un evento sísmico entonces no es necesario contar con esta clase de registros.

Si bien la mayoría de las restricciones poseen justificación lógica, existen puntos como el 6 y el 7 en los cuales la eliminación de datos puede afectar la cantidad representativa de estos. Entonces es posible mediante gráficos de distribución acumulada (Figura 91) conocer efectivamente si la cantidad de eventos que se extraen es considerable.

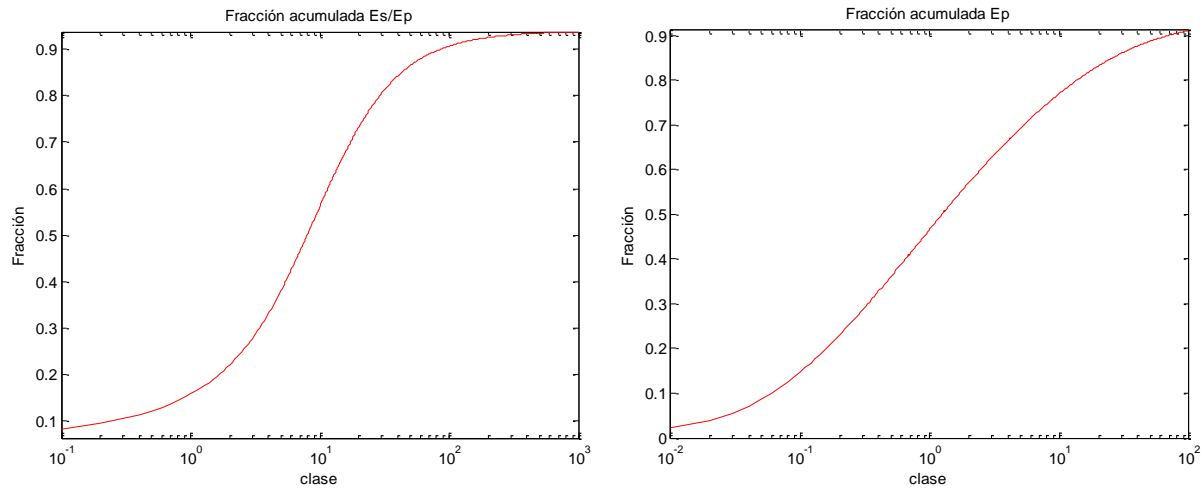


Figura 91. Distribución acumulada de: Es/Ep y Ep .

A partir de las distribuciones acumuladas anteriores (Figura 91), es posible justificar los filtros 6 y 7, debido a que: un $Es/Ep > 0,001$ sólo equivale a un 6,9% de los datos y un $Ep > 0,01$ equivale a un 2,21% de los datos, manteniendo una cantidad representativa de estos.

Luego del filtro se cuenta con 211.373 datos de un universo de 355.416 sin filtrar. Las categorías con la cantidad de datos se muestran a continuación:

Tabla 7. Cantidad de datos según categoría

Categoría	Cantidad
Eventos Sísmicos	210.883
Tronaduras	380
Estallidos de Roca	10

4.8.4. Independencia

Debido a que para generar un modelo mediante regresión logística se necesita que las variables sean independientes, es posible hacer un estudio de correlación entre éstas de modo tal de no tomar los parámetros sísmicos con alta correlación para calibrar el modelo.

Los parámetros sísmicos presentes en el historial sísmico presentan la siguiente matriz de correlación, luego de la aplicación del filtro:

Tabla 8. Matriz de correlación luego de la aplicación del filtro propuesto.

	$\log E$	M_w	f_0	$\log E_s/E_p$	$\log \sigma_A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
$\log E$	1	0,72	0,19	0,17	0,86	-0,11	0,75	-0,29
M_w	0,72	1	-0,19	-0,08	0,26	0,33	0,31	0,45
f_0	0,19	-0,19	1	0,03	0,41	-0,50	0,49	-0,51
$\log E_s/E_p$	0,17	-0,08	0,03	1	0,29	-0,01	0,03	-0,32
$\log \sigma_A$	0,86	0,26	0,41	0,29	1	-0,39	0,6	-0,67
r	-0,11	0,33	-0,50	-0,01	-0,39	1	-0,54	0,59
$\log \Delta\sigma$	0,75	0,31	0,49	0,03	0,6	-0,54	1	-0,55
$\log VA$	-0,29	0,45	-0,51	-0,32	-0,67	0,59	-0,55	1

De la Tabla 8, es posible observar que los valores en rojo corresponden a valores de $R \geq 0,7$ y $R \leq -0,7$. La mayor correlación se observa entre el $\log E$ y el $\log \sigma_A$ cuyo valor es 0,86 (Tabla 8). Se debe prestar atención a la incorporación de estas variables en el modelo.

4.8.5. Regresión logística

En esta sección se procede a ajustar un modelo de regresión logística, basado en la metodología propuesta en la sección 3.6, donde la variable de referencia es que el registro sea un evento sísmico (mayor proporción de datos). También se incluyen las métricas de eficiencia del modelo, junto con la cantidad de datos necesarios para que éste se establezca, es decir la cantidad de tiempo que transcurre a partir de comienzos del 2009 para que los parámetros del modelo sean relativamente constantes.

4.8.5.1. Estabilización del modelo

Se calibra el modelo partiendo desde un 10 % hasta un 70% de los datos con el objeto de conocer con qué porcentaje los parámetros beta que acompañan a las variables independientes en el modelo estabilizan su valor. A continuación se muestran los parámetros Beta que acompañan a las variables independientes versus el porcentaje de datos incorporados al modelo (Figura 92).

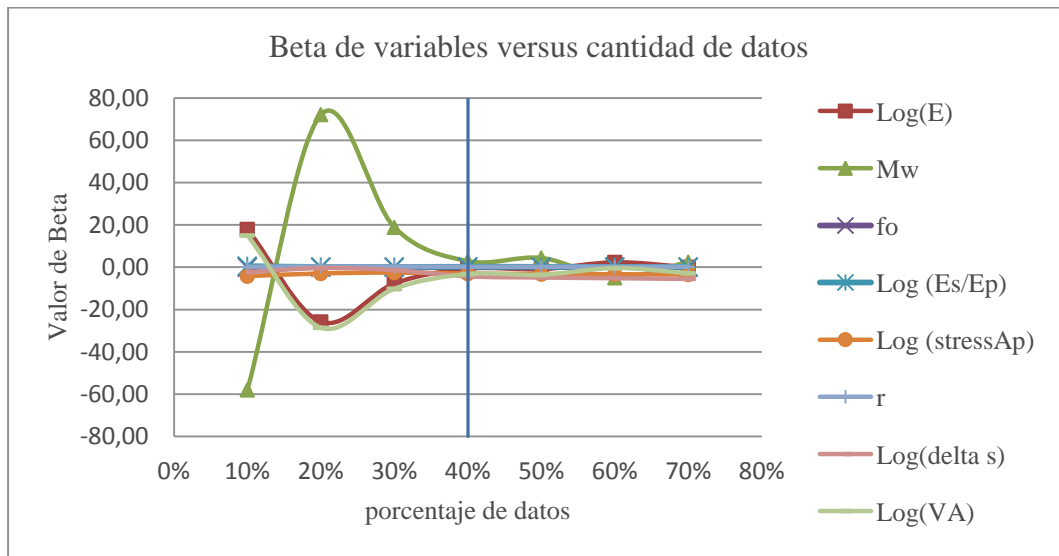


Figura 92. Parámetros Beta del modelo de regresión logística en función del porcentaje de datos utilizados en el ajuste.

De la Figura 92, es posible aseverar que dicha estabilización se logra con la utilización de un 40% de los datos, es decir a partir del 12-07-2010 a las 16:32:06 pm. Para el 40% de los datos equivalentes a 84.516 registros, las variables significativas seleccionadas del total de variables iniciales, se muestra en la siguiente tabla (Tabla 9):

Tabla 9. Valores Prob>Chi2, test de significancia de variables.

α	$\log E$	M_W	fo	$\log Es/Ep$	$\log \sigma A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
0,26	0,86	0,80	<,0001	0,07	<,0001	<,0001	<,0001	0,39
<,0001	-	0,49	<,0001	0,07	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
<,0001	-	-	<,0001	0,03	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Tabla 10. Estadísticas básicas de variables consideradas en el modelo, 40% de los datos.

Estadístico	$\log E$	M_W	fo	$\log Es/Ep$	$\log \sigma A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
\bar{X}	1,33	-0,68	119,11	0,98	-2,32	16,11	4,32	4,15
σ	0,89	0,30	104,07	0,66	0,66	11,26	0,64	0,70

Se observa en la última fila de la Tabla 9, que sólo quedan las variables con un Prob>Chi² menor igual al 5%.

4.8.5.2. Calibración

El modelo Logit propuesto se calibra con el 70% de los registros equivalentes a 147.941 registros, los valores de Prob>Chi² y beta del modelo, se presentan a continuación:

Tabla 11. Valores Prob>Chi2, test de significancia de variables.

α	$\log E$	M_W	fo	$\log Es/Ep$	$\log \sigma A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
0,12	1,00	0,78	<,0001	0,21	<,0001	<,0001	<,0001	0,33
<,0001	-	0,03	<,0001	0,21	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
<,0001	-	0,005	<,0001	-	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

Tabla 12. Valores Beta del modelo propuesto.

Variables	β_i
α	36,87
M_W	3,02
fo	0,05
$\log \sigma A$	-3,48
r	0,15
$\log \Delta\sigma$	-5,76
$\log VA$	-3,10

Además es posible generar la siguiente curva ROC (Figura 93):

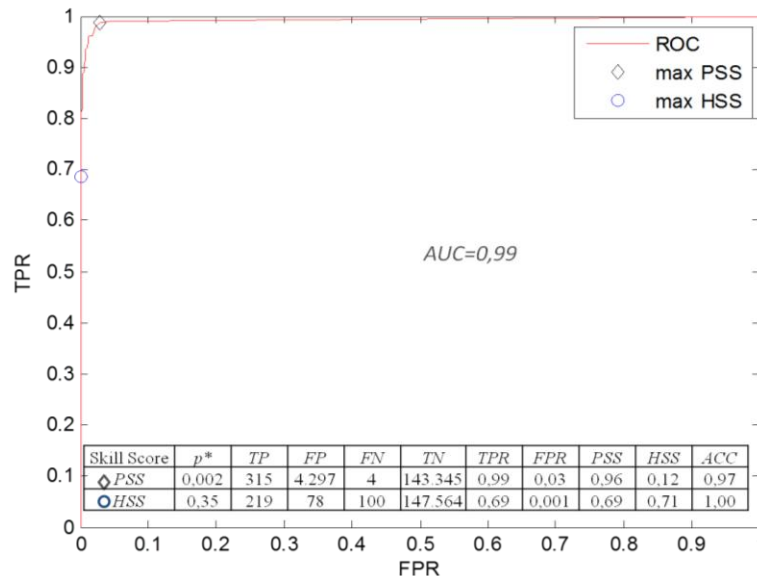


Figura 93. Gráfico ROC, calibración con el 70% de los datos.

Maximizando los valores de PSS Y HSS (sección 3.6.2), es posible obtener un umbral de decisión $p^*=0,002$ y $p^*=0,35$, respectivamente. Los valores anteriores se mantienen constantes para obtener la matriz de contingencia y métricas de desempeño del estimador para cada caso.

4.8.5.3. Verificación

En esta sección se verifica el estimador con el 30% de los datos. Para cada caso: $p^*= 0,002$ y $p^*= 0,35$, se presenta la matriz de contingencia y las métricas de desempeño, obtenidas en la verificación del modelo (Tabla 13).

Tabla 13. Matriz de Contingencia y Métricas de desempeño del modelo para calibración y verificación.

		Matriz de contingencia				Métricas de desempeño					
Caso	p^*	<i>TP</i>	<i>FP</i>	<i>FN</i>	<i>TN</i>	<i>TPR</i>	<i>FPR</i>	<i>PSS</i>	<i>HSS</i>	<i>ACC</i>	<i>AUC</i>
		Calibración (147.643 eventos sísmicos/319 tronaduras)									
<i>Max PSS</i>	0,002	315	4.297	4	143.345	0,99	0,03	0,96	0,12	0,97	0,99
<i>Max HSS</i>	0,35	219	78	100	147.564	0,69	0,0005	0,69	0,71	1,00	0,99
		Verificación (63.350 eventos sísmicos/61 tronaduras)									
<i>Max PSS</i>	0,002	55	1.606	6	61.745	0,90	0,03	0,88	0,06	0,97	0,96
<i>Max HSS</i>	0,35	32	21	29	63.330	0,52	0,0003	0,52	0,56	1,00	0,99

A partir de la Tabla 13, es posible afirmar que el modelo propuesto genera una estimación eficiente y exacta del 30% de datos restantes, esto se observa a partir de las métricas de rendimiento y matriz de contingencia para cada caso analizado.

5. DISCUSIÓN

5.1. Parámetros sísmicos de tronaduras

Con respecto al análisis de ondas, se evidencia que las señales registradas por sensores durante el monitoreo de tronaduras tienen una forma de onda particular y distinta a la de un evento sísmico. Esto se debe a que las señales de ondas asociadas a tronaduras, consideran los retardos del procedimiento de detonación del material explosivo, mostrándose en el sismograma como un gran número de pulsos.

Las tronaduras de batea normal poseen un M_W menor que las tronaduras de socavación y batea alta. Para valores de $E > 10^5$, las distribuciones acumuladas de esta variable son relativamente semejantes entre tipos de tronaduras.

5.2. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras

La Figura 31, muestra que existe una pequeña porción de tronaduras simultáneas, las cuales se encuentran distanciadas a menos de 100 m. La mayor cantidad de las tronaduras se encuentran a menos de 400 m de distancia, y una diferencia de tiempo menor igual a 50 hrs.

Por su parte, la Figura 32 muestra que a 200 m existe un 10% más de tronaduras superpuestas, si se considera un tiempo de 24 hrs en vez de 23,75 hrs. A 23,75 hrs, entre 100 y 200 m la fracción de tronaduras que se superponen se mantiene relativamente constante, sin embargo la cantidad de eventos sísmicos que ingresan en el análisis aumenta desde 18.327 a 81.734 respectivamente, considerando los registros del año 2009 y del 2010. Luego, 23,75 hrs es la opción más viable como candidato a ser la ventana de tiempo para aislar la sismicidad alrededor de las tronaduras.

5.3. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos sísmicos.

Existe agrupamiento de eventos sísmicos en un espacio-tiempo cercano a los tres tipos de tronaduras para el año 2009 a partir de $M_W \geq 0$. Para el 2010 en cambio, este comportamiento no es tan claro al menos en el espacio cercano. En el tiempo existe una alta probabilidad de encontrar eventos con $M_W \geq 0,5$ a menos de 1,5 horas para tronaduras de batea alta, 2 hrs para tronaduras batea normal y de 3 hrs para tronaduras de socavación, lo que indica que una tronadura de socavación tiene dos veces más tiempo de exposición al proceso de re-equilibrio del macizo rocoso que una tronadura de batea alta.

La clusterización temporal se evidencia en los tres tipos de tronaduras para todo el periodo de análisis. Este tipo de agrupamiento se genera debido a reajustes de esfuerzo por cambios geométricos del frente de hundimiento.

Cabe destacar que la totalidad de los eventos con $M_W \geq 0,5$, se encuentran a menos de 100 m de las tronaduras, independiente del tipo durante el 2009 (Figura 33 a), Figura 35 a) y Figura 37 a)). Para el 2010 en cambio, el total de eventos con $M_W \geq 0,5$ se encuentran a menos de 180 m aproximadamente. A medida que aumenta la magnitud de corte M_W , mayor es el agrupamiento cercano a las tronaduras. Para $M_W < -0,5$, existe una distribución casi equidistante espacio-tiempo.

5.3.1. Distribución de eventos sísmicos en el espacio

En esta sección es posible corroborar lo expuesto en el punto anterior, debido a que a mayor magnitud, mayor es el agrupamiento en el espacio. Para el año 2009 los eventos sísmicos con $M_W \geq 0,7$ se encuentran cercanos al nivel de producción y hundimiento, para el 2010 en cambio, la distribución de eventos se encuentran sobre la cota 2200, en dirección al frente H_W Sur (Figura 40 y Figura 41). Para las tronaduras de socavación durante los años 2009-2010, en dicho sector se utilizaron diseños de perforación John Wayne.

5.4. Estadísticas espacio-tiempo entre tronaduras y eventos de magnitud relevante

Para el 2009, existe cierto agrupamiento espacial de eventos de magnitud relevante cercanos a tronaduras. Sin embargo para el 2010 esta tendencia no se manifiesta evidente. En general, existe una mayor cantidad de eventos de magnitud relevante relacionados con tronaduras de socavación para el 2009. En el 2010 en cambio, las tronaduras de batea normal generaron una mayor cantidad de este tipo de eventos, siendo las bateas altas las que menos generan esta clase de registros. Con respecto al 2009, las tronaduras de socavación, batea normal y batea alta generaron a menos de 100 m: 9, 6 y 3 eventos de magnitud relevante respectivamente.

5.5. Aislación y superposición de la sismicidad asociada a tronaduras

Una manera de analizar la sismicidad alrededor de cada polvorazo es superponiendo las secuencias aisladas por tipo de tronadura. Los gráficos de magnitud en el tiempo muestran la sismicidad antes y después de t_0 . En estos se evidencia una acumulación de eventos sísmicos cercanos en tiempo luego de la tronadura (Figura 48 y Figura 49).

Para el año 2009 (Figura 48), se evidencia una concentración de eventos luego de t_0 , tal que los estallidos de roca se encuentran muy cercanos en tiempo a la tronadura. Las tronaduras de batea normal registran una mayor cantidad de estallidos. Para el año 2010 el análisis es similar: a pesar de que existe una mayor cantidad de eventos sísmicos registrados en el historial, la mayor parte de los eventos de magnitud relevante se encuentran muy cercanos en tiempo a las tronaduras (Figura 49), no registrándose para este periodo estallidos de roca.

5.6. Frecuencia de eventos

El conteo de eventos sísmicos por hora muestra que para el año 2009 las tronaduras de socavación presentan un máximo del número de eventos sísmicos en el intervalo 1-2 hrs después de t_0 . Las tronaduras de este año generan una respuesta del sistema que se encuentra desfasada con respecto al t_0 . Como estas tronaduras se llevan a cabo para generar el corte basal, el desfase puede ser explicado porque el cambio geométrico del frente de hundimiento no reacciona de inmediato a la tronadura y por ende, transcurre cierto tiempo en la redistribución de los esfuerzos. Si bien el alto ruido sísmico es una constante para todos los tipos de tronaduras (evidenciado por la media móvil), las de socavación presentan una mayor tendencia de decaimiento potencial que los otros tipos de polvorazos a partir de t_0 y a distintos M_W , para los años 2009 y 2010 (Figura 50 y Figura 51). Lo anterior se explica debido a que la generación del corte basal mediante tronaduras de socavación consideran una perturbación en el medio que desencadena un proceso de re-equilibrio, el cual se rige por la ley de potencia propuesta por Omori.

Para las tronaduras de batea normal y alta, existe un máximo del número de eventos en el contenedor temporal de 0 - 1 hrs luego de t_0 . En general las tronaduras de socavación poseen una mayor productividad de eventos sísmicos en un tiempo cercano a la tronadura, comparativamente con los otros dos tipos de polvorazos.

En el 2009 existe una alta actividad sísmica de eventos con $M_W \geq 0$ para tronaduras de socavación. Para el mismo año, las bateas alta y normal poseen una mayor cantidad de eventos por hora que para el 2010 ($M_W \geq 0$). Lo anterior ocurre incluso a pesar de que el año 2010 contenga 3 veces más registros que el año 2009, con una ventana de análisis de 23,75 hrs y un radio de 200 m.

La sismicidad inducida por tronaduras de batea alta para el año 2010 no presenta un decaimiento potencial. Dicha tendencia se pierde para magnitudes menores a cero, incluso no se registra producción de eventos de magnitud relevante en este periodo (Figura 55). Una situación similar ocurre con las tronaduras de batea normal para el mismo año y para $M_W \geq 0$. Cabe destacar a partir de lo anterior que las tronaduras de bateas no conforman un diseño que asegure de forma sustentable el rendimiento de la incorporación de área desde un punto del peligro sísmico, por su efecto en el corte basal.

5.7. Distribución frecuencia magnitud

El comportamiento sísmico del número de eventos acumulados versus el momento magnitud a partir de un $M_w > 0,2$ es distinto y singular antes y después de las tronaduras de socavación (Figura 57). Existe una mayor cantidad de eventos grandes que pequeños después de la tronadura, entonces $b_+ \leq b_-$. Para las tronaduras de batea normal y alta, ocurre algo similar a $M_w > 0$ (Figura 59 y Figura 61). Lo anterior verifica que el cambio geométrico provocado por las tronaduras de incorporación de área influye en la condiciones de ruptura del macizo. Entonces el peligro sísmico asociado a los procesos de extracción es menor que el peligro asociado a la generación de tronaduras de incorporación de área después de t_0 .

El valor de b_- que alcanza un máximo de 3,3 a un $M_{WC}=0$ para tronaduras batea normal, es el más elevado de los tres tipos de tronaduras. El cambio más pronunciado en pendiente ($b_- - b_+$), considerando la dispersión que puede alcanzar b , es para el caso de tronaduras de socavación, seguido por tronaduras de batea normal y alta. Diferencias considerables entre b_- y b_+ se observan a partir de un $M_{WC} \geq -0,2$. La mayor variación que se experimenta en b es: 1,37 a un $M_{WC}=0,2$; 1,2 a un $M_{WC}=0$ y 0,7 a un $M_{WC}=0,2$, para tronaduras de socavación, batea normal y batea alta respectivamente.

Por su parte, la disminución de b después de t_0 se debe a que luego de las tronaduras existe una redistribución de esfuerzos debido al cambio de geometría del sistema. Este hecho concuerda con la literatura, que explica que la sismicidad es generada por cambios de esfuerzos cuando b está en el rango de 1,2 a 1,5. La disminución de b luego de la tronadura también se puede explicar a partir de que existe una disminución de la rigidez en el volumen de análisis y el esfuerzo inducido se incrementa luego del evento principal.

Los valores de a son mayores después de la tronadura e independientes del tipo y del valor de M_{WC} . Sin embargo sólo para tronaduras de socavación a un $M_{WC} \geq 0$, dicho comportamiento no se cumple. El hecho de que a cambie su valor resulta razonable debido al cambio de inclinación de la cantidad de eventos, versus la magnitud antes y después de t_0 .

En general se tiene que si M_{WC} aumenta, Δb también lo hace antes y después de t_0 . En cambio R es más fluctuante al aumento de M_{WC} , siendo menor la calidad del ajuste luego de generado el polvorazo a partir de un $M_{WC} \geq -0,4$, independiente del tipo de tronadura (Figura 62).

5.8. Ley de Omori modificada

Existe una evidente diferencia con respecto a la productividad sísmica luego de tronaduras de socavación con respecto a las tronaduras de batea normal y alta. Lo anterior se observa, por ejemplo, cuando $R=200$ m y $T_B=24$ hrs. En este caso, el conteo de eventos cercanos en tiempo a la tronadura, es decir en el intervalo de 0 a 1 hrs, corresponde a más de 2.300 por hora, luego disminuyendo a niveles base de sismicidad de 600 eventos por hora aproximadamente. Para el caso de batea normal y alta en el intervalo de 0 a 1 hrs, los eventos por hora son un poco mayores a 1.000 y 800 respectivamente. Los niveles de sismicidad base para tronaduras de batea no son tan claros debido al alto ruido sísmico antes y después de t_0 , aunque su número de eventos por hora fluctúa en valores cercanos a 500.

La variable p , que controla la velocidad de decaimiento para tronadura de socavación, es mayor que para tronaduras de batea normal, al menos para un $T_B \geq 4$ hrs. Los parámetros p y c aumentan con la disminución de T_B , sin embargo el valor de K es relativamente constante con el cambio de esta variable temporal.

A valores de $T_B < 4$ hrs se observa que el comportamiento del parámetro p es más errático, incluso crece bastante a un $T_B = 2$ hrs. Los valores de p para tronaduras de socavación son al menos el doble que para tronaduras de batea al utilizar un $T_B \geq 4$ hrs (Figura 72). Lo anterior concuerda con la observación empírica que el periodo crítico post-tronadura es de 4 hrs, aislándose la zona afectada como mínimo dicha cantidad de horas (llegando al doble o al triple dependiendo de la criticidad del sector). De las curvas graficadas de la ley de potencia de Omori se observa que a menor T_B más cerca se encuentra el ajuste a los datos en los primeros intervalos de tiempo, en especial para el intervalo de 0 a 1, y por lo tanto, menos relevancia poseen los intervalos alejados de t_0 . Entonces se puede afirmar que a menor T_B menos importancia tiene el ruido de los datos en el ajuste, especialmente el visualizado entre las 15 y 24 hrs luego del evento principal.

Con respecto a la variación de R es posible observar que, el parámetro p aumenta considerablemente con la disminución de éste, el parámetro c aumenta con la disminución de R sólo para tronaduras de socavación y batea alta manteniéndose relativamente constante para tronaduras de batea normal. El valor de K aumenta al aumentar R , siendo el K para tronaduras de socavación el que más crece con dicha variación.

Cabe destacar que el parámetro p para tronaduras de batea alta es semejante al de tronaduras de batea normal a valores de $R \geq 120$ m, y semejante a tronaduras de socavación a un $R \leq 50$ m, encontrándose bajo este análisis un comportamiento mixto para este tipo de tronaduras. El efecto en la sismicidad inducida por tronaduras de batea alta es semejante a las tronaduras de socavación cuando el estudio se realiza en un ambiente cercano a los niveles de hundimiento y producción.

Por otra parte el aumento en la variable M_{WC} , genera disminución en el parámetro K y aumento en el parámetro p . El parámetro c posee un mínimo en $M_{WC}=-0,6$ y en $M_{WC}=-0,8$, para tronaduras de batea y socavación, respectivamente.

En general se puede afirmar que el comportamiento de la sismicidad inducida para las tronaduras de batea normal y alta, es semejante y difiere para tronaduras de socavación. Además es posible demostrar que una disminución de R y un aumento de M_{WC} poseen un efecto en la atenuación del ruido sísmico. Los valores de p dependen de la magnitud de corte, la ventana de tiempo y en mayor medida del radio de análisis. A mayor cercanía espacio-tiempo del evento principal, mayor es el valor de dicho parámetro.

A medida que R disminuye mayor es el valor de $AIC1$, mientras que a menor t^* menor es el valor dicho indicador. El valor de t^* que minimiza $AIC1$ depende del radio de aislación. El valor $AIC1$ alcanza su valor mínimo a un t^* de 2, 4 y 3 hrs y a un $R=200$ m, para tronaduras de socavación, batea normal y alta, respectivamente. Los parámetros p , c y K que se estiman a partir de los valores de t^* antes mencionados, se observan en la siguiente tabla:

Tabla 14. Parámetros p , c y K , correspondiente al mejor ajuste de las secuencias superpuestas.

Tronadura	R	$t^*(hrs)$	p	c	K	$AIC1$	$AIC2$
Socavación	200	2	0,49	0,06	1.549	-237.112	-236.776
Batea normal	200	4	0,54	0,14	741	-131.625	-131.306
Batea alta	200	3	0,35	0,04	620	-129.653	-129.516

La Tabla 14 muestra que $AIC1 > AIC2$ para cualquier tipos de tronaduras. Entonces la aplicación conjunta de un modelo de Omori más uno continuo posee mejor ajuste que un modelo de Omori completo, para 24 hrs y un $R=200$ m.

5.9. Clasificación de registros sísmicos

5.9.1. Consistencia temporal de parámetros sísmicos

Las variables necesarias para el ajuste del modelo de clasificación presentan consistencia temporal en el periodo comprendido entre los años 2009 y 2010. Luego, es posible la utilización de la totalidad de parámetros sísmicos para el ajuste del modelo.

El análisis de consistencia no sólo sirve para verificar la continuidad temporal de las variables sino que también para visualizar los valores extremos de los parámetros de fuente sísmica. La variabilidad de media móvil da indicios de que los registros poseen más dispersión con respecto a la media a partir del segundo trimestre del 2010.

5.9.2. Análisis exploratorio de datos

Se observan tres clases marcadas de registros: eventos sísmicos, estallidos de roca y tronaduras. La primera clase, en general presenta una mayor energía radiada. Por su parte, las tronaduras evidencian un comportamiento intermedio entre evento y estallido. Lo anterior da cuenta, de que a priori es posible clasificar tronaduras eficientemente a partir de un modelo de regresión logística.

Por otro lado, se observan datos sospechosos debido a que existen valores muy extremos, y tendencias lineales, por ejemplo, para el caso de E_s/E_p versus E existe una porción de eventos alineados con valores altos de E_s/E_p (Figura 90).

5.9.3. Filtro

Las restricciones generadas al conjunto de datos proponen una justificación lógica, y límites a variables con valores extremos, en general se cumple con no afectar considerablemente el universo de datos para el ajuste, de manera que se represente efectivamente el periodo de registro del año 2009 al 2010.

5.9.4. Independencia

Las correlaciones más importantes entre variables no son consideradas en el modelo, por su baja significancia durante la calibración (Tabla 8 y Tabla 11).

5.9.5. Regresión logística

5.9.5.1. Estabilización del modelo

El modelo de regresión logística se estabiliza a partir de la incorporación del 40% de los datos, entonces a partir dicha cantidad el modelo es robusto. Las variables más significativas con el 40% de los registros son: f_0 , E_s/E_p , σ_A , r , $\Delta\sigma$, VA , con más de un 95% de probabilidad de ser significativas (Tabla 9). Dichas variables dan cuenta de que no sólo importa la razón energética de las ondas S y P o la frecuencia radiada predominante del origen del acontecimiento, sino también la liberación de esfuerzo y la geometría de la fuente, para la predicción de tipo de registro

5.9.5.2. Calibración

El PSS y el HSS , se maximizan a un umbral de decisión de 0,002 y 0,35 respectivamente, la elección del criterio óptimo depende de la necesidad del usuario en la utilización del modelo. Por ejemplo; si se necesita minimizar las falsas alarmas (FP) entonces es posible utilizar un $p^*=0,35$, en cambio si el objetivo es reducir el número de fallidos (FN) entonces es posible utilizar un $p^*=0,002$ (Tabla 13).

Las variables más significativas para el modelo calibrado con el 70% de los registros son: M_w , f_0 , σ_A , r , $\Delta\sigma$, VA , con más de un 95% de probabilidad de ser significativas (Tabla 11).

La área bajo la curva ROC, es muy cercana a 1, lo que implica que el modelo presenta un alto desempeño en la predicción de tronaduras con respecto a eventos sísmicos. De la matriz de contingencia a un $p^*=0,002$ y a un $p^*=0,35$, se observa que: las falsas alarmas (FP) son 4.297 y 78 de un universo de 147.961 registros, las tasas de falsas alarmas (FPR) son de 0,03 y 0,0005, y las tasas de aciertos (TPR) son de 0,99 y 0,69, respectivamente.

5.9.5.3. Verificación

Utilizando el 30% restante de los datos, es posible a un $p^*=0,002$ y a un $p^*=0,35$, observar que el PSS alcanza valores de 0,88 y 0,52, mientras que el HSS alcanza valores de 0,06 y 0,56, respectivamente, el AUC es de 0,96 lo que implica que el desempeño del indicador en la verificación es alto. Las falsas alarmas (FP) son 1.606 y 21, los fallidos (FN) son 6 y 29, para un $p^*=0,002$ y un $p^*=0,35$, respectivamente, a pesar de lo anterior sigue siendo un resultando aceptable (Tabla 13).

El modelo en general, es bastante eficiente en la predicción de tronaduras con respecto a eventos sísmicos, tal que es factible de utilizar a tiempo real con el objeto de diferenciar registros clasificándolos con un alto desempeño.

6. CONCLUSIONES

Es posible concluir del estudio que las tronaduras poseen mecanismos de generación distintos a eventos sísmicos. Los sismogramas registrados por la detonación del proceso poseen retardos y por ende las señales son pulsos propagados desde la fuente y detectados por un gran número de estaciones.

El espacio-tiempo escogido desde un punto de vista de minimización de la superposición de tronaduras es de 200 m y 23,75 hrs. El radio y la ventana de tiempo de análisis seleccionado no sólo permiten considerar una cantidad de datos suficiente para el presente estudio, sino también disminuyen la mezcla de la sismicidad entre los eventos principales (tronaduras).

Los gráficos magnitud versus tiempo dan cuenta explícita de la cercanía temporal de los eventos de gran magnitud a las tronaduras (a menos de 4 hrs). Para el 2009, a diferencia del 2010, se evidencian estallidos de roca. A partir de la Figura 40 y la Figura 41, se tiene que para el 2009, los eventos de $M_w \geq 0,7$ se generan cercanos a los niveles de producción y hundimiento, mientras que para el 2010 estos se generan en altura. Lo anterior da cuenta de la diferencia en la actividad sísmica para ambos periodos.

Las tronaduras de socavación generan una mayor cantidad de eventos por hora cercanos a la tronadura, el comportamiento de las bateas alta y normal con respecto a la productividad es bastante similar, a distintos M_w . A esto se agrega que a un $M_w \geq 0,7$, las tronaduras de socavación generan el doble de eventos por hora en el intervalo de 0 a 1 hrs, que las tronaduras de batea normal y alta, para ambos años, por lo tanto el proceso de re-equilibrio para este tipo de tronaduras es más evidente.

A medida que aumenta la magnitud de corte M_w , mayor es el agrupamiento espacio-tiempo cercano a las tronaduras. Para $M_w \geq 0,5$, es evidente el agrupamiento espacio-tiempo para cualquier tipo de tronadura en el año 2009. Para el año 2010 en cambio, el agrupamiento espacial cercano a la tronadura es discutible y sólo se observa para tronaduras de batea alta.

La sismicidad se encuentra más contenida y restringida en un espacio-tiempo cercano a la tronadura, en especial para eventos de alta magnitud durante el 2009. Los eventos de magnitud relevante evidencian un agrupamiento cercano a la tronaduras de socavación y batea normal (a distancias menores a 100 m) para el 2009; para el 2010 en cambio la distribución de esta clase de eventos es más distribuida (equidistante) en el espacio.

Existe un comportamiento distinto de la sismicidad antes y después de las tronaduras de incorporación de área para $M_w \geq 0,2$, tal que existe una mayor cantidad de eventos de gran magnitud luego de las tronaduras. Este hecho se refleja en el valor de b_+ , el parámetro anterior disminuye debido al aumento de esfuerzo luego de la tronadura por cambios geométricos del frente de hundimiento; esta idea se sostiene debido a que los valores de b_+ se encuentran entre 1,2 y 1,5, además de la existencia de clusterización temporal para el periodo en cuestión.

El valor de a_+ es bastante mayor a a_- después de t_0 independiente del tipo de tronadura. La mayor actividad sísmica se presenta para tronaduras de socavación seguida por batea normal y alta. Por su parte, las tronaduras de batea poseen altos valores de b antes y después de t_0 . El cambio del valor de b ($b_- - b_+$) es considerable para tronaduras de incorporación de área a partir de un $M_{WC} \geq -0,2$, alcanzándose un máximo de 1,37 para tronaduras de socavación a un $M_{WC} = 0,2$.

El análisis mediante la ley de Omori modificada a secuencias superpuestas, sugieren que las tronaduras de socavación tienen un comportamiento sísmico distinto a las de batea. Las primeras obedecen más a la ley de Omori como proceso de re-equilibrio que las tronaduras de batea alta, debido a que las tronaduras de socavación poseen valores de p comparativamente más altos.

A medida que se disminuye R y T_B , mayor es el efecto en los parámetros de p y c , la variable K se ve afectada en mayor medida por cambios en R y M_{WC} . Con respecto al parámetro p , las tronaduras de batea alta poseen un comportamiento semejante a las de socavación si se analiza la sismicidad inducida cerca de los niveles de hundimiento y producción ($20 \text{ m} \leq R \leq 60 \text{ m}$), si el $R \geq 120 \text{ m}$ entonces el comportamiento es similar a las tronaduras de batea normal.

El mejor ajuste de la ley de potencia se genera mediante la utilización de un modelo conjunto entre uno de Omori y un modelo continuo. El valor $AIC1$ se minimiza a un t^* de 2, 4 y 3 hrs y a un $R=200 \text{ m}$, para tronaduras de socavación, batea normal y alta, respectivamente.

En general las tronaduras de socavación poseen un decaimiento potencial más marcado que las tronaduras de batea alta y normal, esto indica que las tronaduras de batea alta comparativamente con las de socavación, no conforman un diseño que asegure de forma eficiente y sustentable el proceso de incorporación de área con respecto al control del peligro sísmico, debido a que el proceso de liberación de energía en el sistema no es eficiente.

Las dos metodologías utilizadas anteriormente logran caracterizar la sismicidad inducida post-tronadura, ya que los resultados demuestran un diferencia comparativa entre los tipos de tronaduras de incorporación de área y además concuerdan con las evidencias empíricas y estadísticas corroboradas en mina RENO.

En definitiva es posible afirmar que la sismicidad inducida por las tronaduras de incorporación de área generan un aumento del esfuerzo por a cambios geométricos del frente de hundimiento. Las tronaduras de socavación generan un impacto en el macizo bastante particular, diferenciándose de tronaduras de batea alta. Estas últimas no parecen conformar una alternativa factible a las de socavación en el proceso de corte basal en la búsqueda de la disminución del peligro sísmico.

Por otro lado, es posible calibrar un modelo de regresión logística capaz de predecir la ocurrencia de una tronadura con respecto a un evento sísmico, considerando que los datos presentan consistencia temporal en un periodo de dos años de monitoreo sísmico. Si bien existen pequeñas fluctuaciones de los datos en el tiempo, son efectivamente despreciables para el modelamiento, debido a que representan cambios en la cantidad de datos procesados y no cambios en la configuración.

La verificación cuenta con el 30% de los datos (2009-2010), en donde los "skill scores" de Peirce's (*PSS*) y Heidke (*HSS*) alcanzan valores de 0,88 y 0,06, a un $p^*=0,002$, 0,52 y 0,56, a un $p^*=0,35$, respectivamente. Lo cual indica un correcto desempeño del modelo independiente del caso utilizado por el usuario.

La factibilidad de generar un modelo como el anterior da cuenta de que existe evidencia cierta de que las características de un evento sísmico versus una tronadura son totalmente distintas, no tan sólo en su geometría de falla o a nivel de concentración de esfuerzos luego del suceso, sino que también a un nivel de la frecuencia radiada, magnitud y razón energética entre la onda S y la onda P de la señal mecánica.

Cabe destacar que para el modelo de clasificación, el M_W es significativo, luego es importante controlar la magnitud del suceso, utilizando un diseño de tronadura eficiente que controle la fuerza o el impacto que se genera en el sistema. Con respecto a lo anterior, es totalmente recomendable contar con una base de datos de parámetros sísmicos de tronaduras procesados manualmente, más aún si existe evidencia latente de que ciertas tronaduras, como las que se consideran en la incorporación de área, inducen eventos sísmicos de alta magnitud y conforman una fuente de generación de sismicidad específica.

Las tronaduras de incorporación de área, ya sea de socavación o de batea, son esenciales para garantizar la producción e ir acorde con la planificación minera. Los procesos de hundimiento generados en sistemas mineros de Panel/Block Caving necesitan de éste tipo de tronaduras para la iniciación de la propagación del caving en búsqueda de mantener niveles de extracción constante.

Cualquier acontecimiento que cause daño a las instalaciones mineras o a los trabajadores, genera estancamiento en los procesos de extracción y por ende pérdidas en la capacidad productiva. Lograr un avance en el estudio de la sismicidad inducida y eventos de magnitud relevante en espacio-tiempo, en función del tipo de tronadura, es de suma importancia en el comportamiento del peligro sísmico y la prevención de accidentes al interior mina, por lo cual la investigación desarrollada se presenta como una herramienta propositiva de análisis ante dicha problemática.

7. REFERENCIAS

- [1] Codelco Chile, División El Teniente, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, (2010). *Plan de Negocios y Desarrollo: Informe Plan Minero PND 2011*, SDS-I-033/2010.
- [2] Díaz, G., Morales, E., (2008). *Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day - El Teniente mine - Codelco Chile*. 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Luleå, p. 54-95.
- [3] Constanzo, H., Lopez, S., Videla, J., (2013). *State of The Art in Cave Mining*. Mine Planning 2013, 3rd International Seminar on Mine Planning. SIN Div. El Teniente-Codelco Chile.
- [4] Riquelme, O., (2012). *Análisis y Evaluación Empírica del Comportamiento Geomecánica de las Bateas Altas en Mina Reservas*. Trabajo de Titulación para obtener el título de Ingeniero Civil en Minas. Universidad de Santiago de Chile.
- [5] Hudyma, M., (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.
- [6] Dunlop, R., Gaete, S., (1999). *Sismicidad Inducida y Estallidos de Roca en Mina El Teniente*. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia General Planificación Minco.
- [7] McCreary, R., Hudyma, M., Ecobichon, D., (1991). *A case study of mine-induced seismicity in a nonbursting mine with implications for mine design*. In Proceedings of the 93rd CIM AGM, Vancouver, B.C.
- [8] Potvin Y., Hudyma M., Allison D., (2007). *Seismic Monitoring of the Northparkes Lift 2 Block Cave – Part I Undercutting*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 1st International Symposium on Block and Sub-Level Caving Cave Mining, Johannesburg, p. 304-330.
- [9] Hudyma, M., (2008). *Analysis and Interpretation of Clusters of Seismic Events in Mines*. Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Civil and Resource Engineering University of Western Australia.
- [10] Gibowicz, S., Kijko A., (1994). *An introduction to mining seismology*. 1st ed. San Diego: Academic Press.
- [11] Hudyma, M., (2007). *Mine Seismology Concepts*. Appendix A, Mine Seismology. Itasca Consulting Canada, p. 2-34.
- [12] Mikula, P., Heal, D., Hudyma, M., (2008). *Generic Seismic Risk Management Plan for Underground Hardrock Mines*. Technical Report, Australian Centre for Geomechanics, Australia, Broadway Nedlands WA 6009, p. 6-49.
- [13] Dunlop, G., Gaete, S., (1995). *Seismicity at El Teniente Mine*. Mine Planning and Equipment Selection 1995, Singhal et al. (eds). Balkema, Rotterdam. Sepcia. Gral. Minco, Rgua, Chile, p. 865-969.
- [14] Dunlop, G., Gaete, S., (1997). *Controlling Induced Seismicity at El Teniente Mine: The Sub6 sector case history*. Rockbursts and Seismicity in Mines, Gibowicz & Lasocki (eds). Balkema, Rotterdam. Codelco Chile, División El Teniente, Rancagua, Chile, p 233-235.

- [15] Dunlop, R., (2007). *Sismicidad en mina El Teniente*. La geofísica y su aporte en la reducción de riesgos de desastres naturales, Santiago, p. 44-45.
- [16] Aleksander, M., van Aswegen, G., Mountfort, P., (1999). *A Guide to Seismic Monitoring in Mines*. A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mine, The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC), Johannesburg, p. 4-14.
- [17] Gibowicz, S. J., Kijko, A., (1994), *An Introduction to Mining Seismology*. San Diego: Academic Press, ISBN: 0-12-282120-3.
- [18] Larsson, K., (2004). *Seismicity in Mine*. Technical Report, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Rock Mechanics, Luleå, p. 45-47.
- [19] Hanks, T., Kanamori, H., (1979). *Moment magnitude scale*. Journal of Geophysical Research, vol. 84(B5), p. 2348–2350.
- [20] Mendecki, A. J., (1997). *Seismic Monitoring in Mine*. Chapman & Hall, Londres, p. 178-213.
- [21] Hedley, D., (1992). *Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines*. CANMET Special Report SP92-1E. p. 305.
- [22] Brune, J., (1970). *Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes*. J. Geophys. Res., vol. 75, p. 4997-5009.
- [23] Shearer, P., (1999), *Introduction to Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press ISBN: 0-521-66023-8.
- [24] Butcher, R., (2003). *Caving Geomechanics*. ACG Seminar, Perth.
- [25] Codelco Chile, División El Teniente. *Desarrollo Informe de Socavación Reno*. Gerencia de Minas Superintendencia Mina Norte Unidad Reservas Norte, (2012).
- [26] Mendecki, A., Lunch, R., Malovichko, D., (2010). *Routine Micro-Seismic Monitoring in Mines*. Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference Perth, Western Australia, p. 2-27.
- [27] Joughin, W., (2007). *Course on Mine Seismology*. Course notes, Newcrest Mining Ltd. and Cadia Valley Operations, Northlands, p.35-45.
- [28] Geotechnical Superintendents, (2006). *Geotechnical Engineering Standard Operating Procedure*. Seismic Data Processing, Perilya Southern Operations, GESOP-02A, p. 3-32.
- [29] Vallejos, J., McKinnon, S. (2011). *Correlations Between Mining and Seismicity for Re-entry Protocol Development*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 48, no. 4, p.616-625.
- [30] Aki, K., (1965). *Maximum Likelihood Estimate of b in the Gutenberg Richter Formula and Confidence Limits*. Earthquake Research Institute. vol. 43, p. 237-239
- [31] Frohlich, C., Davis, S., (1993), *Teleseismic b values—or, much ado about 1.0*, J. Geophys. Res. 98. B1, p. 631–644.
- [32] Kgarume, T., Spottiswoode, S., Durrheim, r., (2009). *Statistical Properties of Mine Tremor Aftershocks*. Pure and Applied Geophysics, DOI 10.1007/s00024-009-0004-5, p. 1-11.
- [33] Legge, N., Spottiswood, S., (1987). *Fracturing and Microseismicity Ahead of a Deep Gold Mine Stope in The Pre-Remnant Stages of Mining*, In *Proceeding of the 6th Int. Congress on Rock Mech.*, Montreal, p. 1071-1077.

- [34] Hudyma, M., Milne D., Grant, D., (1995). *Geomechanics of sill pillar mining in rockburst prone conditions*. Final report: sill pillar monitoring using conventional methods. Mining Research Directorate, p.2-104
- [35] Hudyma, M., Heal, D., Mikula, P., (2004). *Seismic monitoring in mines – Old technology – New Applications*. Australian Centre for Geomechanics, University of Western Australia and Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, p. 1-17.
- [36] Mendecki, A., Van Aswegen, G., Mountfort, P., (1999). *A Guide to Routine Seismic Monitoring in Mines*. A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines. A J Jager and J A Ryder, ed., South Africa, p. 3-30.
- [37] Omori, F., (1894). *On the after-shocks of earthquakes*. The Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, vol. 7, p. 111-200.
- [38] Utsu, T., (1961). *A Statistical Study of the Occurrence of Aftershocks*. Geophysical Magazine, vol. 30, p. 521-605.
- [39] Vallejos, J., McKinnon, S. (2009). *Scaling Laws and Their Implications for Re-entry Protocol Development*. The 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Dalian, p. 1-8.
- [40] Utsu, T., Ogata, Y., Matsu'ura, R., (1995). The centenary of the Omori formula for a decay law of *aftershock activity*. Journal of Physics of the Earth, vol. 43, no.1, p. 1-33.
- [41] Dieterich, J., (1994). *A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering*. Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 2601-2618.
- [42] Enescu, B., Ito, K. (2002). *Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake*. Earth Planets Space, vol. 54, p. 847-859.
- [43] Gross, S., Kisslinger, C., (1994). *Test of models of aftershock rate decay*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 84, p. 1571-1579.
- [44] Narteau, C., Shebalin, P., Holschneider, M., (2002). *Temporal limits of the power law aftershock decay rate*. Journal of Geophysical Research, vol. 107, B12, ESE12.1-ESE12.14.
- [45] Cornejo, J., Landeros, P., (2011). *Aplicación de Criterio Sísmico para Estimación de la Interferencia Operacional Asociada a Tronadura*. Codelco Chile – División El Teniente, Superintendencia Geomecánica. Minas Diablo Regimiento y Reservas Norte, SGM-I-034/2011.
- [46] Ogata, Y., (1983). *Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure*. Journal of Physics of the Earth, vol. 31, p. 115-124.
- [47] Spottiswoode, S., (2000). *Aftershocks and foreshocks of mine seismic events*. 3rd International Workshop on the Application of Geophysics to Rock and Soil Engineering, Melbourne, Australia. p. 1-6.
- [48] Vallejos, J., (2010). *Analysis of Seismicity in Mines and Development of Re-entry Protocols*. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, p. 403.
- [49] Vallejos, J.A., McKinnon, S.D., (2013). *Logistic regression and neural network classification of seismic records*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 49, p.86-95.

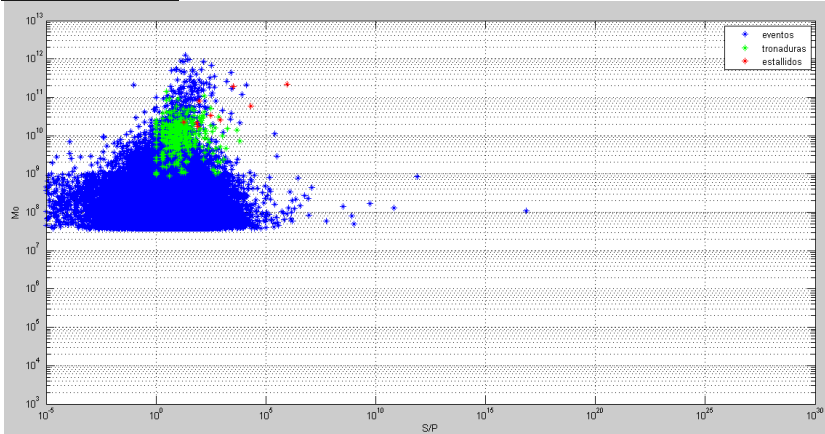
- [50] Hosmer, D., Lemeshow S., (2000). *Applied Logistic Regression*. Second edition. New York: John Wiley & Sons.
- [51] Peng, C.Y. J., Lee, K.L. Ingersoll, G.M., (2002). *An Introduction to Logistic Regression Analysis and Reporting*. The Journal of Educational Research, vol. 96, no. 1, p. 3-11.
- [52] Heal, D., Potvin, Y., Hudyma, M., (2006). *Evaluating Rockburst Damage Potential in Underground Mining*. ARMA/USRMS, paper 06 - 1020, p. 1-12.
- [53] McCullagh, P., Nelder, J. A., (1990). *Generalized Linear Models*. Chapman & Hall, New York.
- [54] Fawcett. T., (2005). *An introduction to ROC analysis*. Elsevier, vol. 27, no. 8, p. 861-873.
- [55] Heidke P. *Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst*. Geogr Ann 1926;8:301–49 In German.
- [56] Peirce CS. *The numerical measure of the success of predictions*. Science 1884;4:453–4
- [57] Gilat, A., (2006). *Matlab, Una introducción con ejemplos prácticos*. Editorial Reverté. España, Barcelona.
- [58] Brady, B., Hoek, E., (2004). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Kluwer Academic Publishers, New York, p. 518-538.

ANEXO

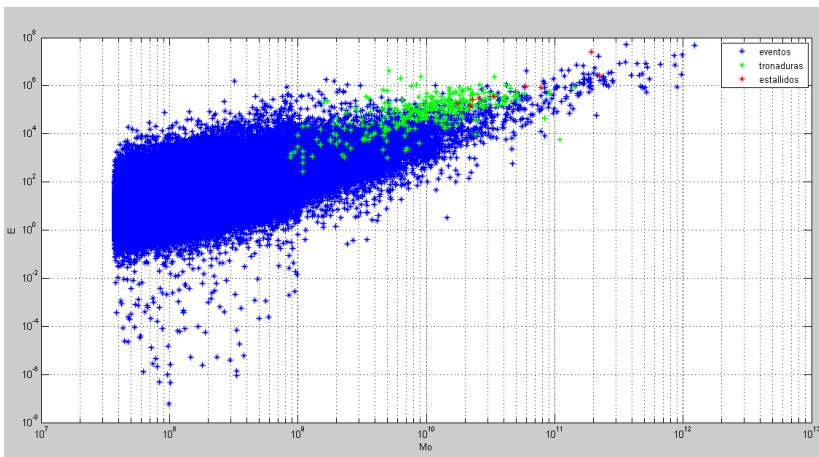
Estudio Exploratorio de datos

Como resultado del filtro los gráficos de la sección 4.8.3, cambia a lo siguiente:

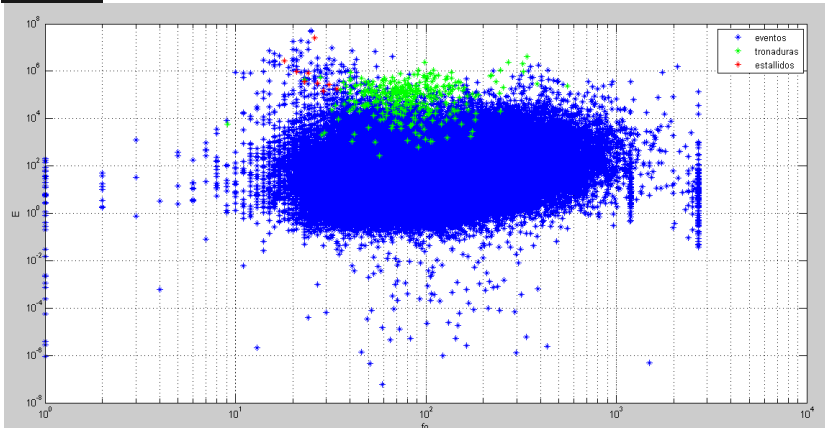
E_s/E_p v/s M_o



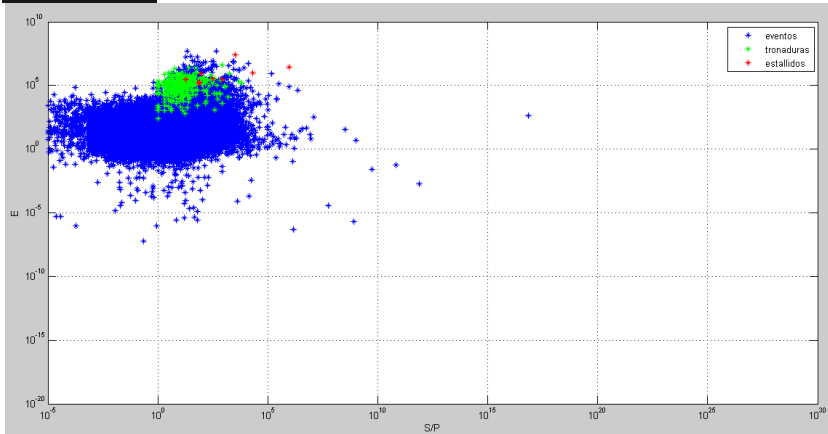
M_o v/s E



E v/s f_o



Es/Ep v/s E



Estabilización del modelo de Regresión Logística

10%									
Prob>Chi ²	α	log E	M _w	fo	log Es/Ep	log σA	r	log $\Delta\sigma$	log VA
	1,00	1,00	0,99	0,06	0,15	0,07	<,0001	0,07	1,00
	0,79	0,23	0,00	0,03	0,15	0,07	<,0001	0,06	-
	0,87	-	<,0001	0,03	0,02	<,0001	<,0001	0,37	-
	<,0001	-	<,0001	0,02	0,01	<,0001	<,0001	-	-

20%									
Prob>Chi ²	α	log E	M _w	fo	log Es/Ep	log σA	r	log $\Delta\sigma$	log VA
	0,00	0,01	0,01	0,02	0,42	0,00	<,0001	0,57	0,00
	0,00	0,00	0,01	0,01	0,35	0,00	<,0001	-	0,00
	0,00	0,01	0,01	0,01	-	0,00	<,0001	-	0,00

30%									
Prob>Chi ²	α	log E	M _w	fo	log Es/Ep	log σA	r	log $\Delta\sigma$	log VA
	0,08	0,14	0,23	0,00	0,39	<,0001	<,0001	0,06	0,05
	0,08	0,16	0,24	<,0001	-	<,0001	<,0001	0,03	0,05
	<,0001	0,00	-	<,0001	-	<,0001	<,0001	0,03	<,0001

50%									
Prob>Chi ²	α	log E	M _w	fo	log Es/Ep	log σA	r	log $\Delta\sigma$	log VA
	0,14	0,78	0,66	<,0001	0,10	<,0001	<,0001	<,0001	0,28
	<,0001	-	0,17	<,0001	0,10	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
	<,0001	-	-	<,0001	0,01	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001

60%									
Prob>Chi²	α	$\log E$	M_W	fo	$\log Es/Ep$	$\log \sigma A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
	0,54	0,46	0,60	<,0001	0,18	<,0001	<,0001	<,0001	0,90
	0,00	<,0001	<,0001	<,0001	0,18	<,0001	<,0001	<,0001	-
	0,00	<,0001	<,0001	<,0001	-	<,0001	<,0001	<,0001	-

70%									
Prob>Chi²	α	$\log E$	M_W	fo	$\log Es/Ep$	$\log \sigma A$	r	$\log \Delta\sigma$	$\log VA$
	0,12	1,00	0,78	<,0001	0,21	<,0001	<,0001	<,0001	0,33
	<,0001	-	0,03	<,0001	0,21	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
	<,0001	-	0,00	<,0001	-	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001