



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE INDICADORES
SÍSMICOS EN SISMICIDAD INDUCIDA POR LA MINERÍA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

RODRIGO ANDRÉS ESTAY HUIDOBRO

PROFESOR GUIA:
JAVIER ANDRES VALLEJOS MASSA

PROFESOR GUIA 2:
DIANA COMTE SELMAN

MIEMBROS DE LA COMISION:
JAVIER RUÍZ PAREDES
JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2014

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas y grado de Magíster
en Ciencias, mención Geofísica
POR: Rodrigo Andrés Estay Huidobro
FECHA: 21/10/2014
PROFESORES GUÍA: Javier Vallejos Massa
Diana Comte Selman

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE INDICADORES SÍSMICOS EN SISMICIDAD INDUCIDA POR LA MINERÍA

Los eventos de sismicidad inducida en minas subterráneas han sido reportados como un peligro para los trabajadores, además de ser una interferencia operacional en la capacidad productiva afectando directamente el negocio minero. Es por esto que en minería es necesario establecer procedimientos que permitan manejar y gestionar de una mejor manera las causas y efectos de la actividad sísmica inducida por labores mineras, generando estados de alerta preventivos en caso de un aumento o disminución de la sismicidad. Estos procedimientos se basan en la información entregada por el sistema de monitoreo sísmico instalado en la mina, el que permite calcular indicadores que resumen en tiempo real la respuesta sísmica del macizo rocoso a la minería aplicada.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología de análisis que permita evaluar de manera estándar el comportamiento y desempeño de indicadores sísmicos con la finalidad de minimizar las interferencias operacionales ocasionadas por la sismicidad inducida por la minería.

En esta investigación se estudió el comportamiento y desempeño de cuatro indicadores sísmicos: frecuencia de eventos, tasa genérica de momento sísmico, probabilístico y aglomeramiento espacial. Para el cálculo de estos indicadores se utilizan datos de sismicidad inducida registrados en la Mina RENO, de la división El Teniente de Codelco, Rancagua, Chile para el período 2007-2011 y de la Mina Creighton, ubicada en Sudbury, Ontario, Canadá, en el año 2008. Para cada una de las minas estudiadas, se utilizó un conjunto de los datos para calibrar los parámetros de cada indicador, optimizando su desempeño. El resto de los datos fueron utilizados para verificar los parámetros definidos en la calibración. El desempeño de los indicadores fue cuantificado mediante matrices de contingencia y gráficos ROC.

Los resultados obtenidos para cada indicador son levemente superiores a un desempeño aleatorio. El mejor desempeño se obtuvo con el indicador probabilístico, alcanzando valores de $PSS = 0,44$ en el caso de RENO y $0,19$ en el caso de Creighton, sin embargo, cada indicador posee sus ventajas, desventajas y limitaciones. Por consiguiente, la utilización de estos no es exclusiva de sólo uno, sino que pueden utilizarse de manera conjunta, entregando información adicional a la hora de decretar o no un estado de alarma. Realizar la evaluación del desempeño de los indicadores sísmicos a través de la metodología desarrollada, cuantifica la efectividad que estos poseen, permitiendo tomar líneas de acción en caso que su desempeño sea deficiente y así garantizar de mejor manera la seguridad de los trabajadores y del negocio minero.

- *I'll do a thing.*
- *What thing?*
- *I don't know, it's a thing in progress. Respect the thing. Moving out!*

(Doctor Who)

Dedicada a Lucho
que sin su presencia no
hubiera sido capaz si quiera de empezar.

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a CONICYT por financiar mis dos años de magíster y por apoyar el desarrollo científico aplicado a la industria.

A mis profesores guía Javier y Diana por entregar parte de su tiempo en el desarrollo de esta tesis y que, a pesar de las velocidades de trabajo distintas, me han apoyado (y apurado) todo este tiempo.

A los miembros de la comisión, por los valiosos aportes realizados durante el proceso de corrección de la tesis.

A Felipe Núñez, por colaborar en parte de la programación que se tuvo que realizar.

A mi familia, en particular a mi tío Pancho por financiarme los primeros años de estudio y a mi madre por apoyarme todos estos años... y seguir apoyándome.

A María de los Ángeles que no solo me apoyó física e intelectualmente durante todo el proceso de mi tesis, si no que me ayudó en la redacción y orden de este trabajo.

Finalmente, pero no menos importante, agradecer a mi compañero de sección, de carrera y amigo, Carlos, por todo el tiempo compartido, procrastinado y aprovechado en cosas tan disímiles como series de televisión y proyectos audiovisuales...

Y a todos los que con su constante “bullying” me incentivaban a terminar.

Esta tesis fue desarrollada en el marco de centro de investigación Advanced Mining Technology Center (AMTC)

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	i
Agradecimientos.....	iii
Tabla de Contenido.....	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas.....	x
1. Introducción	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Alcances.....	3
1.3. Contenidos de la tesis	3
2. Antecedentes	4
2.1. Sismicidad inducida y su aplicación a la minería	4
2.2. Indicadores sísmicos	7
2.2.1. Frecuencia de eventos.....	7
2.2.2. Tasa genérica de momento sísmico	8
2.2.3. Aglomeramiento espacial	9
2.2.4. Probabilístico.....	10
3. Descripción de datos	11
3.1. Mina RENO, división El Teniente, CODELCO, Chile	11
3.2. Mina Creighton, Ontario, Canadá.....	16
4. Metodología	18
4.1 Definición de criterio de alerta	18
4.2 Tipos de bandas	19
4.2.1 Banda Poisson	19
4.2.2 Banda poblacional.	20
4.2.3 Banda auto-poblacional.	20
4.2.4 Banda proporcional.....	21
4.3 Filtro de datos	22
4.3.1 Filtro por error de localización del hipocentro	22
4.3.2 Filtro por magnitud de completitud	25

4.4	Calibración y validación	28
4.4.1.	Parámetros a calibrar	30
4.5	Evaluación de desempeño.....	31
4.5.1	Análisis ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>).....	31
4.5.2	Construcción matriz de contingencia	33
5.	Resultados	34
5.1	Criterio frecuencia de eventos (CFE)	34
5.1.1	Calibración	35
5.1.2	Validación.....	39
5.2	Tasa genérica de momento sísmico	41
5.2.1	Calibración	41
5.2.2	Validación.....	43
5.3	Aglomeramiento espacial	44
5.3.1	Calibración	44
5.3.2	Validación.....	45
5.4	Indicador probabilístico	47
5.4.1	Calibración	47
5.4.2	Validación.....	50
5.5	Resumen del desempeño de los indicadores sísmicos	51
6.	Análisis y discusiones	54
6.1	Efecto de la aplicación de los filtros	54
6.1.1	Filtro por error de localización	54
6.1.2	Filtro por M_{\min}	55
6.2	Criterio de frecuencia de eventos.....	56
6.3	Tasa genérica y aglomeramiento espacial.....	57
6.3.1	Datos sesgados al indicador CFE	57
6.3.2	Selección de las bandas	58
6.4	Indicador Probabilístico	59
6.4.1	Efecto de los parámetros de la ecuación de Benjamin	59
6.4.2	Re-calibración período de validación.....	60
6.4.3	Parámetro b como indicador sísmico	62

6.5	Ajuste de una distribución teórica a la distribución de momentos sísmicos	64
6.5.1	Distribución de Weibull	65
6.5.2	Distribución de Cauchy-Lorentz	67
7.	Conclusiones y Recomendaciones	68
Anexo A.	Definición de la dimensión de agrupamiento óptimo.....	70
Anexo B.	Descripción métodos mineros utilizados en Creighton.....	71
Anexo C.	Error de localización promedio por año y por polígono. Mina RENO.....	73
Anexo D.	Gráficos datos filtrados. Mina Creighton	75
Anexo E.	Matriz de contingencia CFE, calibración. RENO.....	77
Anexo F.	Matriz de contingencia CFE, validación. RENO	78
Anexo G.	Matriz de contingencia tasa genérica, calibración. RENO	80
Anexo H.	Matriz de contingencia tasa genérica, calibración. Creighton.....	86
Anexo I.	Matriz de contingencia tasa genérica, validación. RENO.....	92
Anexo J.	Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, calibración. RENO	93
Anexo K.	Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, calibración. Creighton.....	107
Anexo L.	Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, validación. RENO	120
Anexo M.	Gráficos indicador probabilístico, calibración. RENO	121
	Bibliografía.....	122

Índice de Figuras

Figura 2.1. Valores de b para dos conjuntos de datos diferentes.	5
Figura 2.2. Frecuencia de eventos por hora de la mina Kidd Creek después de un evento de magnitud de Nuttli, $M_n = 1,6$	6
Figura 2.3. Representación de lo que cuantifica el indicador aglomeramiento espacial.....	9
Figura 3.1. (a) Mapa geológico del yacimiento El Teniente. (b) Los diferentes sectores de producción que conforman la mina El Teniente.....	11
Figura 3.2. Sección transversal del método de <i>Panel Caving</i> con hundimiento avanzado	12
Figura 3.3. Sistema de monitoreo en RENO (junio 2011)	12
Figura 3.4. Polígonos de control sector RENO	13
Figura 3.5. Numeración de los polígonos de control considerados para esta investigación	13
Figura 3.6. Histograma de magnitud de los eventos micro sísmicos ocurridos entre los años 2003 y 2011 en la Mina RENO	14
Figura 3.7. Distribución de eventos en función de la cota.	14
Figura 3.8. Número de eventos por año para cada polígono	15
Figura 3.9. Frecuencia normalizada por hora de eventos y tronaduras para el año 2009. Mina RENO	15
Figura 3.10. (a) Geología correspondiente al complejo ígneo Sudbury y ubicación de la Mina Creighton. (b) Sección transversal de la geología de la Mina Creighton	16
Figura 3.11. Frecuencia normalizada por hora de eventos y tronaduras Mina Creighton.....	17
Figura 4.1. Diagrama del protocolo de alerta utilizando para los indicadores frecuencia de eventos, tasa genérica de momento sísmico y aglomeramiento espacial	18
Figura 4.2. (a) Ejemplos de la banda Poisson utilizada para el criterio de frecuencia de eventos. (b) Ejemplo de obtención de las bandas superior e inferior	19
Figura 4.3. Ejemplo de la banda poblacional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial	20
Figura 4.4. Ejemplo de la banda auto-poblacional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial	21
Figura 4.5. Ejemplo de banda proporcional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial	21
Figura 4.6. (a) Frecuencia y fracción acumulada ascendente de eventos registrados por número de estaciones sísmicas. (b) Error asociado a la localización del hipocentro como función del número de estaciones. Mina RENO.	23
Figura 4.7. Función acumulada ascendente del porcentaje de número de eventos como función del error de localización para los años 2007-2011. Mina RENO.....	23
Figura 4.8. Metodología utilizada para determinar la variación temporal de la magnitud de completitud o magnitud mínima para la mina RENO	26
Figura 4.9. (a) Variación temporal de la magnitud de completitud desde el año 2003 al 2011. (b) Número de eventos en función de la magnitud de completitud.....	27
Figura 4.10. Distribución de frecuencia – magnitud mina Creighton	28
Figura 4.11. Número de eventos por polígono y año para el período de calibración con $M_w \geq -1,0$ y error de localización ≤ 40 [m]	29
Figura 4.12. Número de eventos por polígono y año con $M_w \geq -1,0$ y error de localización de hipocentro ≤ 40 [m].	29
Figura 4.13. Matriz de contingencia y métricas asociadas	31

Figura 4.14. Diagrama ROC que muestra las distintas alternativas que pueden obtener los indicadores.....	31
Figura 5.1. Gráfico ROC para la variación de percentiles superior (ub) e inferior (lb) de la distribución de Poisson en CFE. Mina RENO.	35
Figura 5.2. Gráfico ROC para la variación de percentiles superior (ub) e inferior (lb) de la distribución de Poisson en CFE. Mina Creighton.	36
Figura 5.3. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función de M_{rel} . (d) Gráfico ROC variando la magnitud de los eventos relevantes	37
Figura 5.4. Variación de (a) TPR, FPR y (c) PSS en función de M_{min} . (d) Gráfico ROC al variar los valores de magnitud mínima.	38
Figura 5.5. Gráficos ROC utilizando la banda (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional para los diferentes valores de ξ . Período de calibración. RENO	41
Figura 5.6. Gráficos ROC para las diferentes bandas de análisis y diferentes valores de ξ . (a) $\xi = 0$, (b) $\xi = 0,5$ y (c) $\xi = 1$. Mina Creighton	42
Figura 5.7. Gráficos ROC utilizando la banda (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional para diferentes valores de D^* . Período de calibración. Mina RENO....	44
Figura 5.8. Gráficos ROC indicador aglomeramiento espacial con diferentes valores de D^* para las bandas (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional. Período de calibración. Mina Creighton.	45
Figura 5.9. Comportamiento del indicador probabilístico para el período de calibración.	47
Figura 5.10. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función de la probabilidad de corte. (d) Gráfico ROC para los valores de probabilidad de corte.	48
Figura 5.11. Comportamiento del indicador probabilístico y del parámetro b de Gutenberg-Richter en la mina Creighton.....	49
Figura 5.12. Gráfico ROC al variar la probabilidad de corte para el período de calibración. Mina Creighton.	49
Figura 5.13. Gráfico ROC con los mejores desempeños de cada indicador. Período de validación. (a) RENO y (b) Creighton.	51
Figura 6.1. Comparación de desempeños para (a) CFE e (b) indicador probabilístico con y sin filtro por error de localización del hipocentro para la Mina RENO. Indicadores (c) CFE y (d) probabilístico para la Mina Creighton. Período de calibración	54
Figura 6.2. (a) Comparación media diaria con banda de Poisson a 7 días. (b) Ejemplo de determinación del límite inferior (LI) y superior (LS) mediante la distribución acumulada de Poisson.....	56
Figura 6.3. Variación del indicador probabilístico para distintos valores de b en función de (a) t_r con n fijo (150 eventos) y (b) n con t_r fijo (7 días). $M_c = -1$ y $\Delta t = 8$ horas.	59
Figura 6.4. Comparación entre los resultados globales obtenidos en la calibración y recalibración del indicador probabilístico. Mina RENO.	61
Figura 6.5. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función del valor de b^* . (d) Gráfico ROC para los valores de b^*	63
Figura 6.6. Aproximaciones de diferentes distribuciones teóricas a los datos empíricos	64
Figura 6.7. (a) Ajuste de la distribución de Weibull a los logaritmos de los momentos sísmicos para $M_w \geq -1,0$. (b) Gráfico cuantil versus cuantil de la distribución de Weibull con el logaritmo de los momentos sísmicos. Mina RENO.	66
Figura 6.8. Ejemplo del efecto de los parámetros α y β en la distribución de Weibull	66
Figura 6.9. Ajuste de la distribución de Cauchy-Lorentz a los logaritmos de momentos sísmicos para $M_w \geq -1,0$. Mina RENO	67

Figura D1. Frecuencia y fracción acumulada ascendente del número de estaciones utilizadas para la localización de eventos sísmicos.....	75
Figura D2. Error asociado a la localización del hipocentro como función del número de estaciones para (a) eventos, (b) reportados y (c) tronaduras.....	76
Figura D3. (a) Porcentaje de eventos y (b) porcentaje de energía utilizados en función de la precisión en la localización del hipocentro.....	76
Figura M1. Comportamiento del indicador probabilístico y del parámetro b de Gutenberg-Richter en el período de validación para los polígonos de análisis en RENO.....	121

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Resumen de los contenidos de la tesis.....	3
Tabla 4.1. Porcentajes de eventos con un error de localización menor a 40 metros	24
Tabla 4.2. Porcentajes de energía con un error de localización menor a 40 metros.....	24
Tabla 4.3. Resumen de los resultados obtenidos al filtrar los eventos de la mina Creighton por el error de localización del hipocentro menor a 50 metros.....	25
Tabla 5.1. Caso base de los parámetros a variar en el análisis del desempeño el CFE. Mina RENO	34
Tabla 5.2. Matriz de contingencia del caso base para el CFE. Período de calibración. Mina RENO.	34
Tabla 5.3. Número de eventos de magnitud relevante por polígono y por magnitud de corte.....	37
Tabla 5.4. Matriz de contingencia global del período de validación al considerar los parámetros óptimos obtenidos en el período de calibración.	39
Tabla 5.5. Parámetros utilizados para el CFE. Mina Creighton	40
Tabla 5.6. Percentiles que maximizan el desempeño global (PSS) del indicador tasa genérica de momento sísmico para cada una de las bandas. Periodo de calibración. Mina RENO	41
Tabla 5.7. Resultados de PSS máximo en el período de calibración para el indicador tasa genérica de momento sísmico. Mina Creighton	42
Tabla 5.8. Métricas de desempeño por polígono y globales del indicador tasa genérica de momento sísmico para las diferentes bandas durante el período de validación. Mina RENO	43
Tabla 5.9. Matriz de contingencia para cada banda del indicador tasa genérica de momento sísmico. Período de validación. Mina Creighton.....	43
Tabla 5.10. Percentiles y dimensión de agrupamiento (D^*) que maximizan el desempeño global (PSS) del indicador aglomeramiento espacial para cada una de las bandas. Periodo de calibración. Mina RENO.	44
Tabla 5.11. Parámetros óptimos del indicador aglomeramiento espacial para las distintas bandas. Período de calibración. Mina Creighton.....	45
Tabla 5.12. Métricas de desempeño por polígono y globales del indicador aglomeramiento espacial para las diferentes bandas durante el período de validación. Mina RENO. .	46
Tabla 5.13. Matriz de contingencia para cada banda del indicador aglomeramiento espacial. Período de validación. Mina Creighton.	46
Tabla 5.14. Matriz de contingencia por polígono y globales del indicador probabilístico para el período de validación.....	50
Tabla 5.15. Matriz de contingencia global para los parámetros óptimos y los valores de PSS de cada indicador obtenidos en el período de calibración.....	51
Tabla 5.16. Matriz de contingencia para los mejores desempeños de cada indicador durante el período de validación.....	52
Tabla 6.1. Valores de PSS para el CFE e indicador probabilístico para la Mina RENO y Creighton con y sin filtro por error de localización del hipocentro. Período de calibración.....	55
Tabla 6.2. Matriz de contingencia al re-calibrar el indicador probabilístico con diferentes valores de p^* a los utilizados en el período de calibración original.....	60
Tabla 6.3. Matriz de contingencia utilizando el parámetro b como indicador sísmico	62

Tabla C1.	Resumen de los errores promedios de localización y desviación estándar por polígono, sin considerar filtro por error de localización de hipocentro de 40 metros.....	73
Tabla C2.	Resumen de los errores promedios de localización y desviación estándar por polígono, considerando filtro por error de localización de hipocentro de 40 metros.....	74
Tabla E1.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE durante el período de calibración al variar los percentiles de la distribución de Poisson.....	77
Tabla F1.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base. Período de validación.....	78
Tabla F2.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base con los percentiles $u_b = 98\%$ y $l_b = 5\%$. Período de validación.....	78
Tabla F3.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base con un valor de $M_{rel} = 1,6$. Período de validación.....	79
Tabla G1.	Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda poblacional. Período de calibración.....	80
Tabla G2.	Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda auto-poblacional. Período de calibración.....	82
Tabla G3.	Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda proporcional. Período de calibración.....	84
Tabla H1.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda poblacional.....	86
Tabla H2.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda auto-poblacional....	88
Tabla H3.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda proporcional.....	90
Tabla I1.	Matriz de contingencia del indicador tasa genérica de momento sísmico para el período de validación.....	92
Tabla J1.	Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda poblacional. Período de calibración.....	93
Tabla J2.	Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda auto-poblacional. Período de calibración.....	97
Tabla J3.	Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda proporcional. Período de calibración.....	102
Tabla K1.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda poblacional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.....	107
Tabla K2.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda auto-poblacional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.....	111
Tabla K3.	Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda proporcional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.....	115
Tabla L1.	Matriz de contingencia del indicador aglomeramiento espacial para el período de validación.....	120

1. Introducción

La sismicidad inducida es la respuesta del macizo rocoso al proceso de explotación minera. Durante más de cien años los eventos de sismicidad inducida en minas subterráneas han sido reportados como un peligro para los trabajadores, además de ser una interferencia operacional en la capacidad productiva ya que si no se tiene un adecuado control pueden generarse expulsiones violentas de material rocoso dentro de la mina, conocido como estallido de roca (*rockburst*). Estos reportes provienen mayoritariamente de minas subterráneas en roca dura ubicadas en una variedad de países tales como: Australia, Canadá, Sudáfrica, China, Chile y Perú. El problema no es nuevo, pero se ha intensificado con la progresión de la actividad minera moderna en profundidades cada vez mayores (Potvin et al., 2007).

Según informes del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el año 2011, 20 personas fallecieron en instalaciones subterráneas chilenas debido a diferentes circunstancias, que van desde la mal utilización del explosivo hasta muertes generadas por caídas y desprendimientos de rocas (SERNAGEOMIN, 2011). Por otra parte, en minas sudafricanas en el año 2000, el 50% de las muertes estaban asociadas a accidentes relacionados con desprendimientos de roca y de estos, un 30% fueron provocados por estallidos de rocas (Koldas, 2003).

Dado lo anterior, y con el fin de resguardar la integridad física de los trabajadores, además de instalaciones, equipos y el negocio minero, es necesario establecer procedimientos que permitan manejar y gestionar de una mejor manera las causas y efectos de la actividad sísmica inducida por la minería, identificando oportunamente potenciales daños a labores mineras debido a eventos sísmicos de magnitudes relevantes, es decir, un sismo o una tronadura significativa (por ejemplo, una de socavación o producción) que libere energía suficiente como para producir daño en las instalaciones mineras. Con el uso de la información entregada por el sistema de monitoreo sísmico, es posible desarrollar e implementar indicadores sísmicos que resuman en tiempo real la respuesta del macizo rocoso a la minería aplicada.

Mediante el uso de indicadores sísmicos es posible establecer al menos dos tipos de procedimientos: re-entrada y alerta sísmica. El primero se aplica luego de la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud relevante. Al ocurrir esto, existe un aumento en los niveles de actividad sísmica registrada que decae en el tiempo a niveles de sismicidad normales (Vallejos & McKinnon, 2010a, 2010b, 2011), similar al comportamiento que tienen los terremotos tectónicos y sus posteriores réplicas (Vallejos & McKinnon 2010a). De esta manera, se pueden definir e implementar protocolos de re-entrada a las labores que puedan garantizar la seguridad de trabajadores y la protección de equipos. La alerta sísmica, por otra parte, consiste en realizar un seguimiento a los indicadores sísmicos en el mediano plazo (días y semanas) para entender la respuesta del macizo rocoso a la minería aplicada; el objetivo es generar un estado de alerta cuando se identifican niveles anormales en estos indicadores, que podrían conllevar a una respuesta descontrolada del macizo rocoso. Ambos procedimientos son descritos en el capítulo dos, pero este trabajo se centra en la aplicación de indicadores sísmicos para la alerta sísmica.

A pesar de la gran experiencia adquirida por la industria en minería subterránea, existen evidencias de que los indicadores sísmicos actualmente utilizados en la toma de decisiones podrían no reunir las condiciones óptimas de desempeño y que es necesario mejorar debido a los siguientes factores:

- Los resultados de una encuesta realizada el año 2004 (Hudyma, 2004) a 73 minas subterráneas mecanizadas y de roca dura, principalmente de Australia y Canadá, reveló que aproximadamente 20% de las minas experimentaban eventos sísmicos al menos de 2 en la escala de Richter y al menos 15% reportaba haber sufrido un estallido de roca mayor que dañó su infraestructura.
- Dentro de la experiencia chilena se puede citar que durante los años 2007- 2010 el indicador sísmico actualmente utilizado en la mina Reservas Norte (RENO) de El Teniente estuvo el 30% del tiempo en estado de alerta (Vallejos et al., 2012). Esto no es tiempo efectivo en que la mina estuvo cerrada, simplemente demuestra la falta de optimización que puede existir en los indicadores sísmicos.
- Actualmente, los softwares de visualización y análisis disponibles en el mercado no cuentan con herramientas de gestión que permitan calibrar, testear, evaluar y optimizar el desempeño de sus procedimientos y en particular de los indicadores sísmicos. Existe por lo tanto, en la medida que se aplican los procedimientos actuales, una sub-utilización de los recursos mineros y de seguridad en minas subterráneas con sismicidad inducida.

Son las interferencias operacionales y pérdidas de tiempo asociadas a la sismicidad inducida las que impactan significativamente el negocio minero en términos de su capacidad productiva. Existe, por lo tanto, una necesidad y la oportunidad de desarrollar una adecuada metodología que permita minimizar estas interferencias.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología de análisis que permita evaluar de manera estándar el comportamiento y desempeño de indicadores sísmicos con la finalidad de minimizar las interferencias operacionales ocasionadas por la sismicidad inducida por la minería.

Para este fin, se desea cumplir con los siguientes objetivos secundarios:

- Calibrar los parámetros de cada indicador sísmico, optimizando su desempeño.
- Definir criterios de alerta utilizando distribuciones que puedan representar adecuadamente cada indicador utilizado en esta investigación.
- Evaluar nuevos indicadores sísmicos al utilizado actualmente en la Mina El Teniente.

1.2. Alcances

Varios estudios disponibles en la literatura relacionada con la sismicidad inducida por la minería presentan metodologías para el desarrollo y aplicación de indicadores sísmicos (Cook, 1976; Glowacka and Kijko, 1989; Trifu et al., 1993; Poplawski, 1997; Alcott et al., 1998; Eneva, 1998; Truner and Player, 2000; Cai et al., 2005; Heal et al., 2005; Hudyma, 2004; Mercer and Bwaden, 2005; Trifu and Shumilla, 2005; Malek & Leslie, 2006; Vallejos & McKinnon, 2008, 2010, 2011). Aun así, en ninguno de ellos se realiza una evaluación de su desempeño, es decir, que tan asertivos son al momento de garantizar la ocurrencia o no ocurrencia de un sismo de magnitud mayor dentro de un intervalo de tiempo y espacio.

Por otra parte, existen investigaciones en las que se utilizan indicadores sísmicos para la predicción de eventos de magnitud mayor (Shcherbakov, 2010), sin embargo, dentro de los alcances de esta investigación no estuvo el predecir dichos eventos, sino cuantificar el desempeño de diferentes indicadores.

1.3. Contenidos de la tesis

La estructura y contenidos de esta tesis se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1.1. Resumen de los contenidos de la tesis

Capítulo	Tema	Resumen
2	Revisión bibliográfica en sismicidad inducida	Se revisa la literatura asociada a la aplicación de parámetros sísmicos en la minería subterránea utilizando sismicidad inducida.
3	Descripción de datos	Se presentan los datos utilizados de la mina El Teniente y de la mina Creighton.
4	Metodología	Se describe la metodología utilizada para calcular los indicadores sísmicos y evaluar su desempeño.
5	Evaluación del desempeño	Se muestran los resultados obtenidos al evaluar el desempeño de los indicadores sísmicos utilizados.
6	Análisis de resultados	Se discuten los factores que afectan el desempeño de los indicadores y la posible manera de solucionarlos.
7	Conclusiones y recomendaciones	

2. Antecedentes

2.1. Sismicidad inducida y su aplicación a la minería

La sismicidad inducida es una respuesta del macizo rocoso a la minería aplicada, generando un peligro para trabajadores además de poder generar interferencias en el proceso productivo minero. Este problema no es nuevo, pero se ha intensificado con la progresión de la actividad minera a profundidades cada vez mayores (Cook, 1976). En Australia, por ejemplo, las minas más profundas se encuentran entre los 1000 a 1650 metros de profundidad; en Canadá van entre 1500 a 2500 metros; y en Sudáfrica, donde se encuentran las minas más profundas del mundo, alcanzan entre los 3000 y 3800 metros (Potvin et al., 2007).

En la actualidad es posible instalar sistemas de monitoreo sísmico, el cual consiste básicamente en un arreglo de sensores tipo sismógrafos (geófonos y acelerómetros), un sistema de adquisición de señales y procesamiento de datos. El objetivo del sistema de monitoreo es determinar tres parámetros fundamentales de los eventos sísmicos que ocurren en la mina: cuando ocurrió, donde ocurrió y que tan grande fue (magnitud del sismo). Algunos de estos eventos sísmicos pueden causar una expulsión violenta de material rocoso dentro de las excavaciones, los que son conocidos como estallidos de roca, cuyas consecuencias incluyen lesiones e incluso muerte de trabajadores, pérdida de producción y daños a equipos.

El uso de los parámetros provenientes del análisis de la sismicidad inducida en la minería (hipocentro, momento sísmico y energía) han sido utilizados y aplicados de modo de lograr un mejor entendimiento del comportamiento del macizo rocoso durante las excavaciones mineras.

Muchas investigaciones han usado datos de sismicidad inducida para el desarrollo de técnicas de análisis que permitan cuantificar de manera continua el peligro sísmico. Dentro de estas, Hudyma (2003) y Hudyma & Potvin (2009) describen algunas: estimar el valor de b de la ley de Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1941) que se muestra en la Figura 2.1; el gráfico tiempo-magnitud que es una buena herramienta para indicar el mecanismo de los eventos sísmicos relacionándolos con la variación en el campo de esfuerzo producto de la tronadura o si son independientes de ella, siendo gatillados por fallas estructurales; y la razón S:P en la que se compara la proporción entre la energía de las ondas S y P, que también se relaciona al mecanismo de ruptura de los eventos.

Alcott et al. (1998) utiliza los parámetros sísmicos energía, esfuerzo aparente y momento sísmico para discutir y desarrollar metodologías para evaluar el peligro micro sísmico y así tener criterios que permitan tomar buenas decisiones sobre el proceso minero al momento de enfrentar alguna situación de aumento de sismicidad en la mina.

También se han considerado otros tipos de metodologías que permiten evaluar el peligro sísmico. Glowacka (1993) recurre a un análisis Bayesiano para medir la probabilidad de que

ocurra un evento de mayor magnitud al superarse un cierto umbral de energía sísmica, mientras que Eneva (1998) evalúa la relación existente entre la micro sismicidad y los eventos de magnitudes mayores, utilizando parámetros sísmicos asociados al grado de aglomeramiento espacial que poseen los eventos y su distribución temporal, para así obtener herramientas válidas que permitan monitorear de manera adecuada el comportamiento de la micro sismicidad.

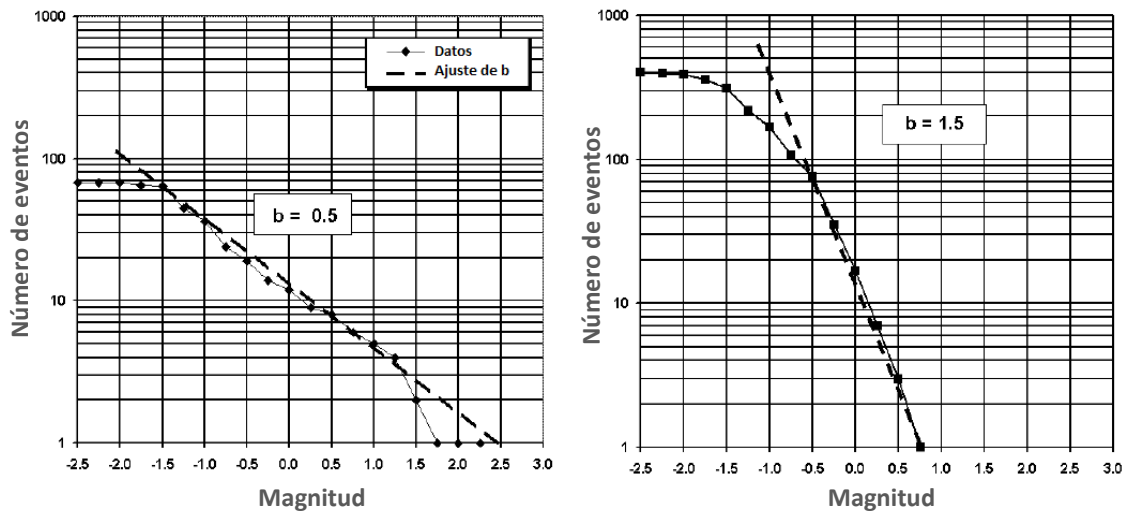


Figura 2.1. Valores de b para dos conjuntos de datos diferentes. En la figura de la izquierda se tiene una mayor cantidad de eventos de magnitudes superiores que en el caso del gráfico de la derecha. Luego, un menor valor de b sería indicador de un mayor riesgo que existan eventos de magnitudes más elevadas, a diferencia de un valor de b más grande en que esa posibilidad disminuye (modificado de Hudyma, 2003).

Se pueden definir al menos dos procedimientos que permiten manejar y gestionar de manera objetiva la información que se obtiene a través de la sismicidad inducida. Estos son el criterio de alerta y los protocolos de re-entrada. El primero de estos fue desarrollado en extenso en este trabajo y se describe en los capítulos siguientes.

En cuanto a los protocolos de re-entrada, el desarrollo de metodologías es abordado profusamente por los trabajos de Vallejos & McKinnon (2008, 2009, 2010a, 2010b, 2011). En ellos se presentan algunas prácticas de re-entrada utilizadas principalmente en minas de Ontario, Canadá (Vallejos y McKinnon, 2008) en las que predominan los indicadores de energía/momento y el de frecuencia de eventos. Algunos autores como Malek & Leslie (2006) han recurrido a otros tipos de indicadores como el trabajo sísmico, aglomeramiento espacial y tasa de deformación.

En los trabajos de Vallejos & McKinnon, se analiza el comportamiento en el tiempo de la sismicidad inducida luego de ocurrido un evento de magnitud relevante o de una tronadura. En ellos se concluye que el decaimiento de la cantidad de eventos en el tiempo puede ser descrito por la Ley de Omori modificada (Omori, 1894), la cual se refiere a la tasa de ocurrencia de las réplicas de un sismo como función del tiempo que ha transcurrido luego del evento principal (Utsu et al., 1995; Vallejos & McKinnon, 2010a), como se observa en la Figura 2.2.

La aplicación de esta ley a la sismicidad inducida permite definir el punto de máxima curvatura (T_{MC}), correspondiente al tiempo donde la tasa de eventos comienza a disminuir y que podría ser utilizado como un adecuado valor preliminar de reentrada (Vallejos & McKinnon, 2009a, 2009b, 2010a, 2010b). En este análisis no se considera la magnitud de los eventos, únicamente su frecuencia en el tiempo.

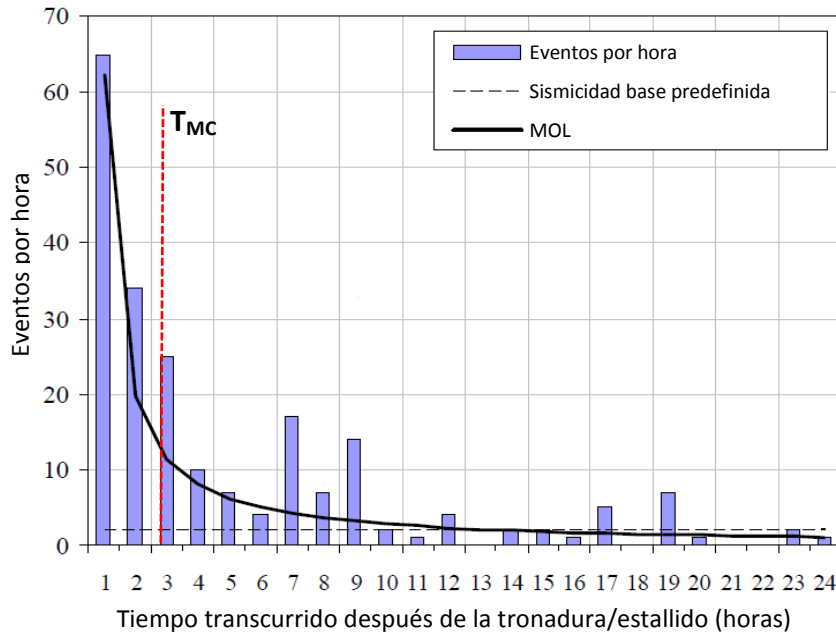


Figura 2.2. Frecuencia de eventos por hora de la mina Kidd Creek después de un evento de magnitud de Nuttli (fase Lg de la magnitud de cuerpo, M_b), $M_n = 1,6$; también conocida como magnitud regional. La curva negra muestra el ajuste de la Ley modificada de Omori (MOL). La línea punteada negra corresponde al nivel base de sismicidad previo al evento de magnitud 1,6, mientras que la línea punteada roja indica el valor de T_{MC} (modificado de Vallejos & McKinnon, 2009a).

Cabe destacar que todas las investigaciones mencionadas anteriormente no efectúan ningún tipo de evaluación del desempeño de los indicadores utilizados.

2.2. Indicadores sísmicos

Los indicadores sísmicos sirven para monitorear la respuesta en el tiempo del macizo rocoso a la minería aplicada, recurriendo a diferentes parámetros que se obtienen de los registros de la sismicidad inducida por medio de geófonos/acelerómetros instalados en la mina. Su objetivo es generar una situación de alerta cuando se identifican niveles anormales que podrían indicar una respuesta descontrolada del macizo.

Algunos de los indicadores más utilizados son:

- Frecuencia de eventos (Dunlop & Gaete, 1997; Vallejos et al., 2012; Vallejos & McKinnon, 2008, 2010, 2011)
- Tasa genérica del momento sísmico (Shcherbakov, 2010)
- Aglomeramiento espacial (Malek & Leslie, 2006)
- Probabilístico (Benjamin, 1968)
- Modelo epidémico (Ogata, 1988, 1989, 1999, 2001)

A continuación se detallan los primeros cuatro indicadores mencionados anteriormente y a los cuales se les evaluó el desempeño al aplicar la metodología desarrollada en esta tesis.

2.2.1. Frecuencia de eventos

El indicador frecuencia de eventos está dado por:

$$\mu_{\Delta t} = \frac{N_{\Delta t}}{\Delta t}$$

donde $N_{\Delta t}$ corresponde al número de eventos ocurridos en un período de tiempo Δt , que para este trabajo fue considerado igual a un día. En otras palabras, este indicador es un conteo diario de eventos.

2.2.2. Tasa genérica de momento sísmico

La tasa genérica de momento sísmico queda definida por:

$$r = \frac{\Omega_{\Delta t}}{\Delta t}$$
$$\Omega_{\Delta t} = \sum_{i=1}^k (M_{oi})^{\xi}$$

donde Δt es el periodo de análisis de interés, k es el número total de eventos en Δt , M_{oi} es el momento sísmico del evento i , y ξ es un coeficiente entre 0 y 1 que controla la contribución relativa de momento sísmico para eventos de distintas magnitudes.

Si $\xi = 0$, se tiene que $\Omega_{\Delta t}$ corresponde al número de eventos en un periodo Δt , descrito en el punto anterior, mientras que para $\xi = 1$ se tiene el momento sísmico en un periodo Δt con lo que toda la contribución al indicador está dada por la energía liberada por el sismo.

El caso intermedio corresponde a $\xi = 0,5$ y se conoce en la industria minera como trabajo sísmico o *Benioff strain* (Malek & Leslie, 2006; Shcherbakov et al., 2010; Vallejos & McKinnon, 2011). En este escenario, el indicador considera parte del momento sísmico sin darle todo el peso a éste, como sucede con $\xi = 1$.

Para emplear este parámetro como indicador sísmico, es necesario establecer los límites inferior y superior de la banda de alerta en el tiempo y el valor de ξ óptimo.

2.2.3. Aglomeramiento espacial

El indicador aglomeramiento espacial cuantifica el ordenamiento espacial de la sismicidad. El algoritmo de cálculo es el siguiente:

- Definir la dimensión de agrupamiento óptimo D^* (Anexo A) y el número de eventos k a utilizar en la ventana móvil.
- Determinar número de eventos vecinos n_i para cada evento i dentro de la dimensión D^* .
- Calcular la fracción de aglomeramiento que queda dado por:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k(k-1)} \in [0,1]$$

Para utilizar este parámetro como indicador sísmico se requiere establecer los límites inferior y superior de la banda de alerta en el tiempo y D^* . En la Figura 2.3 se muestra un esquema de lo que el indicador representa.

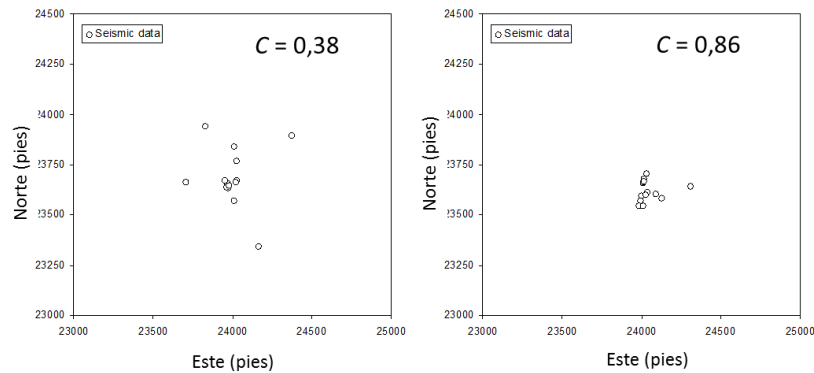


Figura 2.3. Representación de lo que cuantifica el indicador aglomeramiento espacial (C). Un mayor valor (izquierda) indica una concentración de eventos sísmicos dentro del agrupamiento y la ventana de tiempo definidos previamente. Un valor menor de C (derecha) indica una dispersión mayor de los eventos.

2.2.4. Probabilístico

El indicador probabilístico está relacionado con el peligro sísmico. La probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de magnitud mayor a M^* en un periodo de tiempo futuro Δt en una zona de estudio, puede ser expresada mediante (Benjamin, 1968):

$$P(M > M^*, \Delta t) = 1 - \left(\frac{t_R}{t_R + \Delta t \times P(M > M^*)} \right)^{n+1}$$

donde n es el número de eventos con magnitud mayor a M_c en un periodo de registro t_R . La probabilidad que ocurra un evento de magnitud mayor a M^* queda dado por:

$$P(M > M^*) = \begin{cases} 1 & \text{si } M^* \leq M_c \\ e^{-\beta(M^* - M_c)} & \text{si } M^* > M_c \end{cases}$$

con $\beta = b \times \ln(10)$, donde b es la pendiente de la relación Gutenberg-Richter (1942), dada en su versión acumulativa por:

$$\log N = a - b(M - M_c)$$

en la que M es la magnitud; M_c es la magnitud de corte considerada (Wiemer & Wyss, 2000; Woessner & Wiemer, 2005) a partir de la cual todos los eventos sísmicos son registrados consistentemente; a y b son parámetros determinados del catálogo sísmico; y N es el número total de eventos con magnitud mayor a M .

Para el cálculo del indicador se procede de la siguiente manera:

1. Definir número de eventos n con los que se calculará el indicador. En el caso de este trabajo, el valor de n corresponderá al número de eventos semanales promedio.
2. Estimar parámetro b de la ecuación de Gutenberg-Richter. Es importante señalar que el valor de n tiene que ser suficientemente grande como para tener una estimación del valor de b estadísticamente confiable. Según Felzer (2006), con más de 2000 eventos sísmicos de buena calidad se obtiene un intervalo de confianza del 98% con errores menores a un 0,05.
3. Cálculo de probabilidad $P(M > M^*)$.
4. Determinar t_R en función del valor de n . En promedio, el valor de t_R es una semana.
5. Cálculo del indicador $P(M > M^*, \Delta t)$, con $\Delta t = 8$ horas (equivalente a un turno).
6. Se actualiza con un evento y el proceso se repite desde el punto 3 hasta que se recorra todo el catálogo.

3. Descripción de datos

3.1. Mina RENO, división El Teniente, CODELCO, Chile

La mina El Teniente ($39^{\circ}05'S - 70^{\circ}21'W$) se encuentra ubicada en la zona precordillerana a 50 km al noreste de Rancagua, Provincia de Cachapoal, VI Región, a una altura entre los 2.000 y 2.700 metros (Leiva, 2010). Es uno de los depósitos de pórfido cupríferos más grandes del mundo, con un contenido de Cu total estimado en 93,5 Mt (16.756 Mt, 0,558% de Cu; CODELCO 2010). Su explotación se remonta a 1904 y es actualmente operado por la División El Teniente de CODELCO-CHILE. Posee un área de aproximadamente 4 km² y una extensión vertical mayor a 1.000 metros. Está dividida en sectores ubicados en torno a la Brecha Braden (Figura 3.1a). Esta investigación, particularmente, se centra en el sector Reservas Norte (Figura 3.1b).

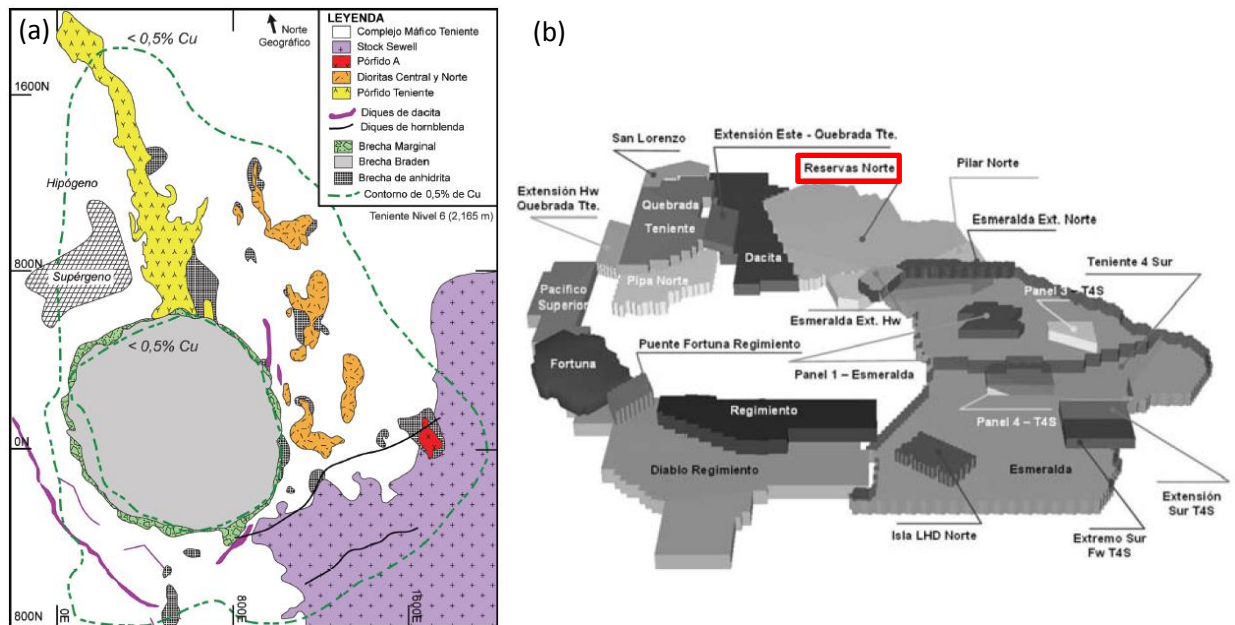


Figura 3.1. (a) Mapa geológico del yacimiento El Teniente con unidades litológicas principales (Muñoz, 2011). (b) Los diferentes sectores de producción que conforman la mina El Teniente (Díaz & Morales, 2008). En rojo se destaca la mina en que se centra este estudio.

Durante el período de análisis de este trabajo, RENO era explotado mediante un método por hundimiento conocido con *Panel Caving* con hundimiento avanzado (Karzulovic, 1998; Rojas et al., 2000), en el que la socavación en el nivel de hundimiento (UCL) se realiza sobre un nivel de producción (NP) parcialmente desarrollado, dejando las galerías de zanja y bateas para ser excavadas bajo el área hundida (Figura 3.2)

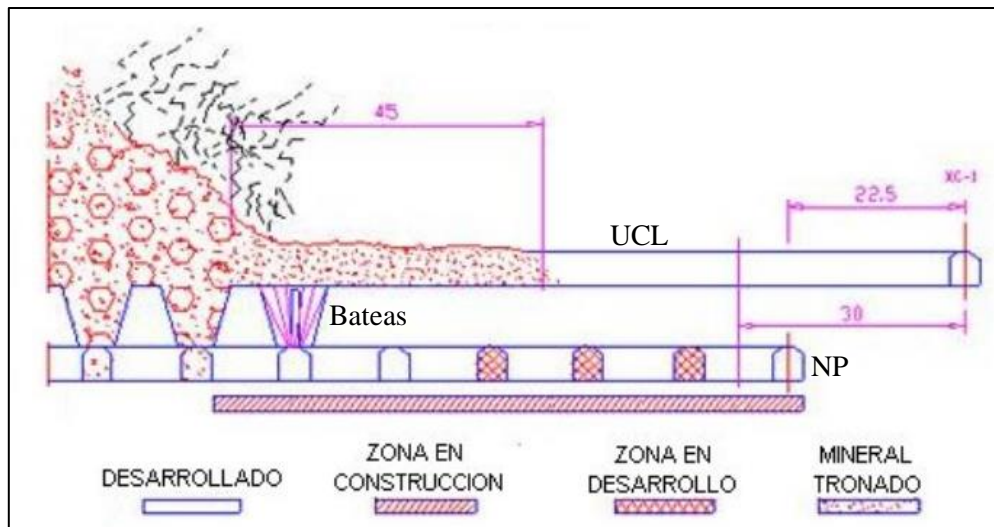


Figura 3.2. Sección transversal del método de *Panel Caving* con hundimiento avanzado (Jofré et al., 2000). Medidas en metros.

El sistema de monitoreo sísmico en RENO comprende 23 geófonos uniaxiales, 11 geófonos triaxiales de 4,5 Hz, 2 geófonos triaxiales de 14 Hz y 4 acelerómetros triaxiales de 2,3 kHz, abarcando un área de 1.000 x 900 m² aproximadamente (Figura 3.3).

El período de tiempo utilizado en el análisis corresponde al comprendido entre 2003 y 2011. Se definieron polígonos de control de la actividad sísmica, determinados por el grupo de geomecánica de la mina en base a criterios operacionales, geológicos y geotécnicos. En la Figura 3.4 se muestran los diferentes polígonos que han ido variando durante la etapa de estudio.

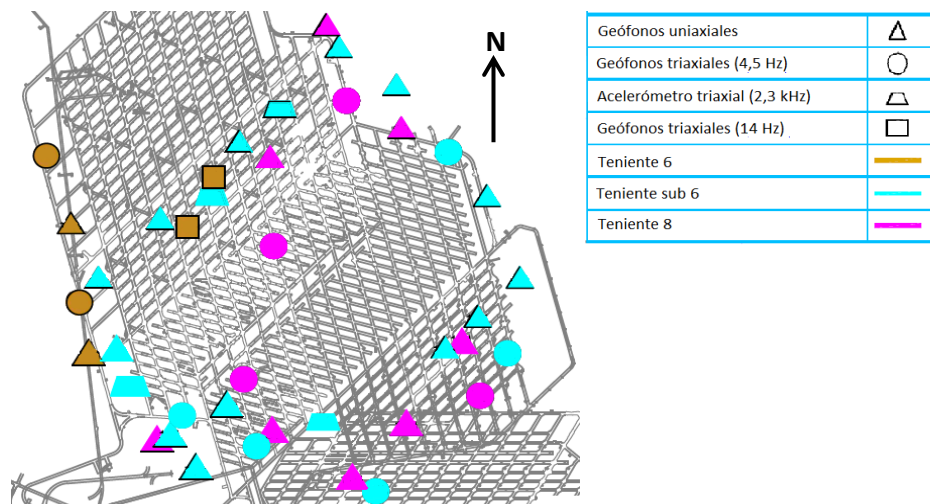


Figura 3.3. Sistema de monitoreo en RENO (junio 2011). Escala 1:125.

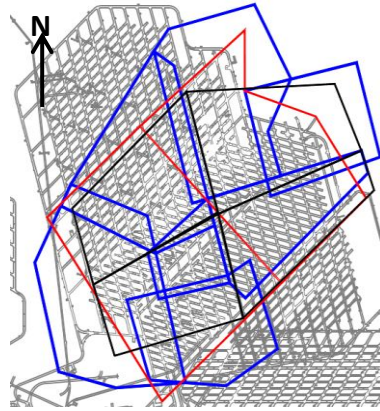


Figura 3.4. Polígonos de control sector RENO. En rojo polígono años 2003-2006, en negro años 2007-2011 (25-04-2011) y en azul desde el 26-04-2011 a la actualidad. Escala 1:125.

La numeración con la que se identificaron los polígonos a lo largo de la investigación se muestran en la Figura 3.5.

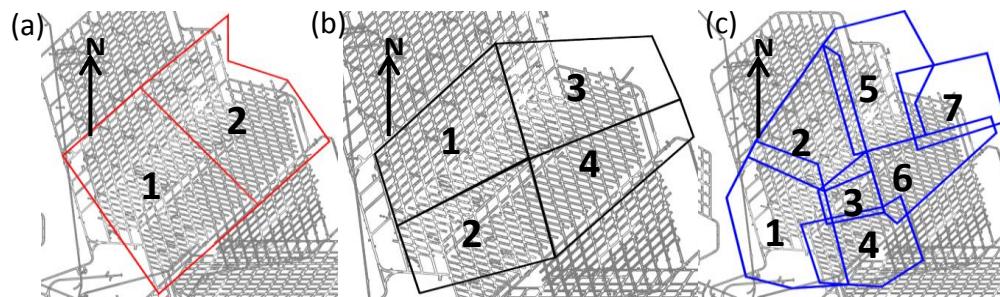


Figura 3.5. Numeración de los polígonos de control considerados para esta investigación. (a) Polígonos desde el 01-01-2003 al 31-12-2006; (b) polígonos desde el 01-01-2007 al 25-04-2011; (c) polígonos desde el 26-04-2011 al 31-12-2011. Escala 1:125.

En la Figura 3.6 se muestra el histograma de las magnitudes de la micro sismicidad ocurrida entre los años 2003 y 2011 en RENO. Notar que las magnitudes van desde los -4 hasta los 3, observándose claramente el cambio de escala con respecto a la sismicidad tectónica.

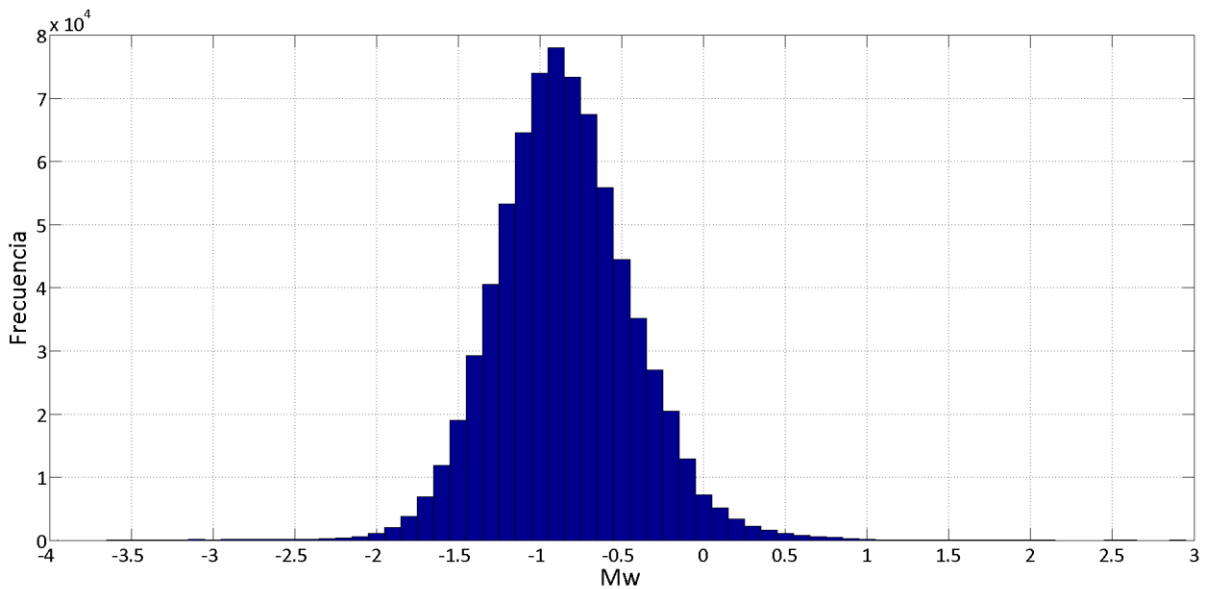


Figura 3.6. Histograma de magnitud de los eventos micro sísmicos ocurridos entre los años 2003 y 2011 en la Mina RENO, para un radio de 520 metros y sin filtro de altura.

La cota de análisis se consideró desde el nivel 1900 al nivel 2400, que equivalen a 220 metros bajo el nivel de hundimiento y 280 metros sobre éste. Entre estos niveles se encuentra el 90% de los datos en RENO y es donde se concentran la mayor cantidad de eventos con magnitud mayor a 0 (Figura 3.7).

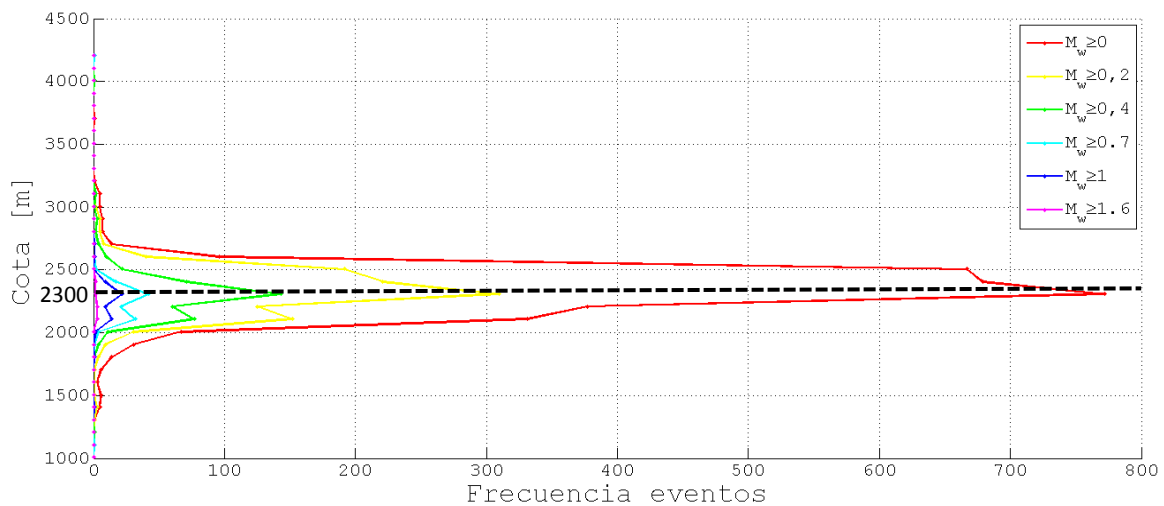


Figura 3.7. Distribución de eventos en función de la cota.

En la Figura 3.8 se muestra la frecuencia de eventos por año, correspondiente a los polígonos señalados previamente para el período de estudio: desde enero del 2003 a diciembre del 2011. Durante el año 2010 se observa un aumento en la sismicidad principalmente debido al preconditionamiento realizado el 2008 y el inicio en la socavación de Pilar Norte (ver Figura 3.1a) en agosto del 2009.

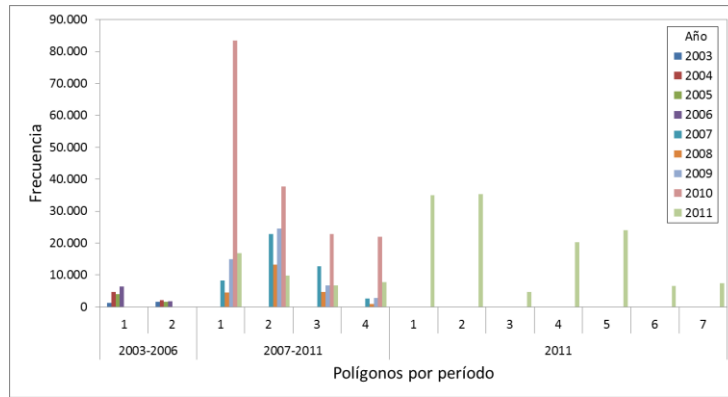


Figura 3.8. Número de eventos por año para cada polígono definido en cada periodo de tiempo. Se debe notar que debido a la creación de nuevos polígonos el año 2011, se incluye en este dos conjuntos de polígonos. El último periodo abarca desde el 26-04-2011 hasta el 31-12-2011.

En la Figura 3.9 se muestra la distribución horaria de eventos para el año 2009. En ella se observa una mayor cantidad de tronaduras a las 15 horas (turno A) con un posterior aumento en los eventos con magnitud mayor a 0,7 que luego decae 4 – 5 horas después. Lo mismo se puede observar para las tronaduras realizadas a las 23 horas (turno B) y de menor manera para las tronaduras realizadas a las 7 (turno C).

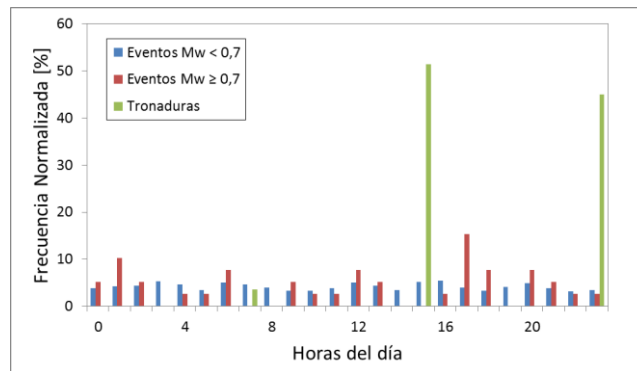


Figura 3.9. Frecuencia normalizada por hora de eventos y tronaduras para el año 2009. Mina RENO.

3.2. Mina Creighton, Ontario, Canadá

La Mina Creighton está ubicada en la ensenada Creighton, en el borde exterior del cordón sur del complejo ígneo Sudbury (Figura 3.10a) y corresponde a un yacimiento de cobre-níquel. En profundidad, la zona mineral posee un rumbo este-oeste con un pronunciado manteo hacia el norte. Está caracterizada por varias fallas de rumbo tardías. Dependiendo de la estructura, las zonas de corte varían en espesor de unos pocos centímetros a decenas de metros.

El sector de estudio corresponde a la zona profunda de Creighton, entre los niveles 6600 y 7800 (entre 1.828 y 2.377 metros bajo superficie, Figura 3.10b).

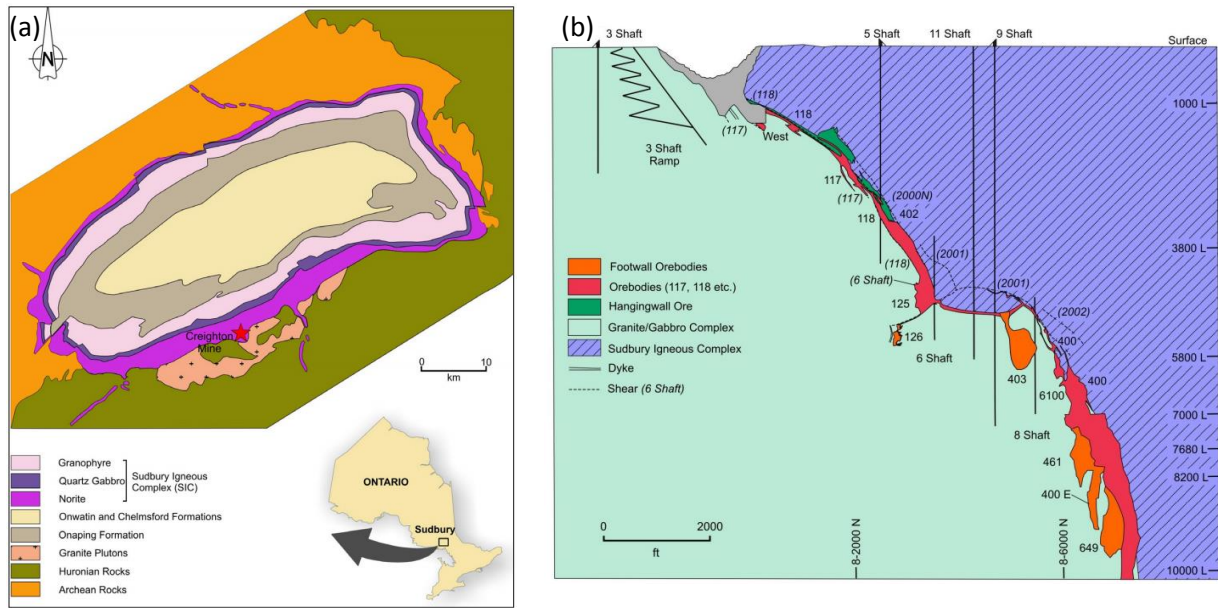


Figura 3.10. (a) Geología correspondiente al complejo ígneo Sudbury y ubicación de la Mina Creighton. (b) Sección transversal de la geología de la Mina Creighton.

La Mina Creighton ha utilizado diferentes métodos de explotación, como *Shrinkage*, *Block Caving*, *Cut and fill*, *Vertical Crater Retreat (VCR)* y *slot-and-slash* (variante de VCR). Para el período de estudio de este trabajo, en la parte profunda de la Mina Creighton, los métodos de explotación utilizados consisten principalmente en VCR y *slot-and-slash*. La descripción de los métodos se encuentra detallada en el Anexo B

El monitoreo micro sísmico que cubre esta área consiste en 24 geófonos uniaxiales y 7 acelerómetros triaxiales (Vallejos, 2010).

En el catálogo sísmico de la mina Creighton se encuentran claramente identificados a qué corresponden cada uno de los registros; se dividen en tres tipos: eventos (e); tronaduras (b); y reportados (r). Los últimos corresponden a aquellos eventos de magnitud relevante que son

registrados por el sistema micro sísmico y la red sismológica que se halla en la superficie, los que posteriormente son informados por el GSC (*Geological Survey of Canada*).

Para el período de investigación (enero a diciembre del 2008) se tiene un total de 21.463 eventos micro-sísmicos en el volumen de estudio, los cuales se distribuyen en 20.563 eventos sísmicos, 215 reportados y 685 tronaduras.

En la Figura 3.11 se observa la distribución horaria de eventos para el año 2008, en donde se aprecia que la mayor cantidad de tronaduras son durante el turno de noche y a las 16 horas. Además, se observa una mayor cantidad de eventos catalogados como reportados en esos mismos horarios.

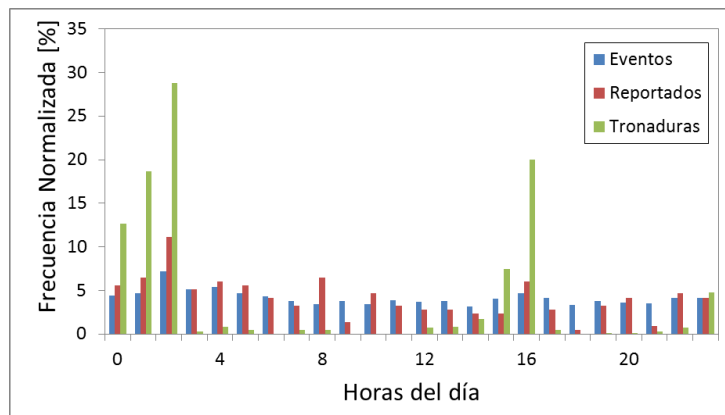


Figura 3.11. Frecuencia normalizada por hora de eventos y tronaduras para el año 2008. Mina Creighton.

4. Metodología

4.1 Definición de criterio de alerta

El propósito del criterio de alerta sísmica es monitorear en el tiempo la respuesta del macizo a la minería realizada, con el objeto de generar una situación de alerta cuando se identifican niveles anormales en los indicadores sísmicos, que podrían conllevar a una respuesta descontrolada del macizo. Una condición de estas características implica que debe efectuarse un seguimiento del indicador sísmico para tomar acciones sobre el proceso minero, y modificar así la respuesta sísmica del sistema. Para definir los rangos normales del indicador, se requiere la especificación de los límites superior e inferior. Esto dependerá del indicador que se utilice.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama para definir el criterio de alerta para los indicadores frecuencia de eventos (Dunlop y Gaete, 1997), Tasa genérica de momento sísmico y Aglomeramiento espacial. En cada uno de estos casos, el criterio de alerta consiste en comparar el indicador sísmico $I_{\Delta t_1}$ ocurrido en un periodo de tiempo Δt_1 , con una banda sísmica que define el nivel "normal" de sismicidad. Los límites superior (ub) e inferior (lb) de la banda se definen utilizando el indicador $I_{\Delta t_2}$, ocurrido en un periodo de tiempo Δt_2 ($\Delta t_2 > \Delta t_1$) y los percentiles de la distribución que es utilizada para cada indicador y que son detalladas en la sección 4.2. Si $I_{\Delta t_1}$ se sale de los límites señalados anteriormente implica que el sistema se encuentra en estado de alerta. Los valores utilizados para Δt_1 (media diaria) y Δt_2 (media semanal) son de 1 y 7 días respectivamente. La tasa de actualización (t_a) de la frecuencia de eventos se realiza cada 15 minutos.

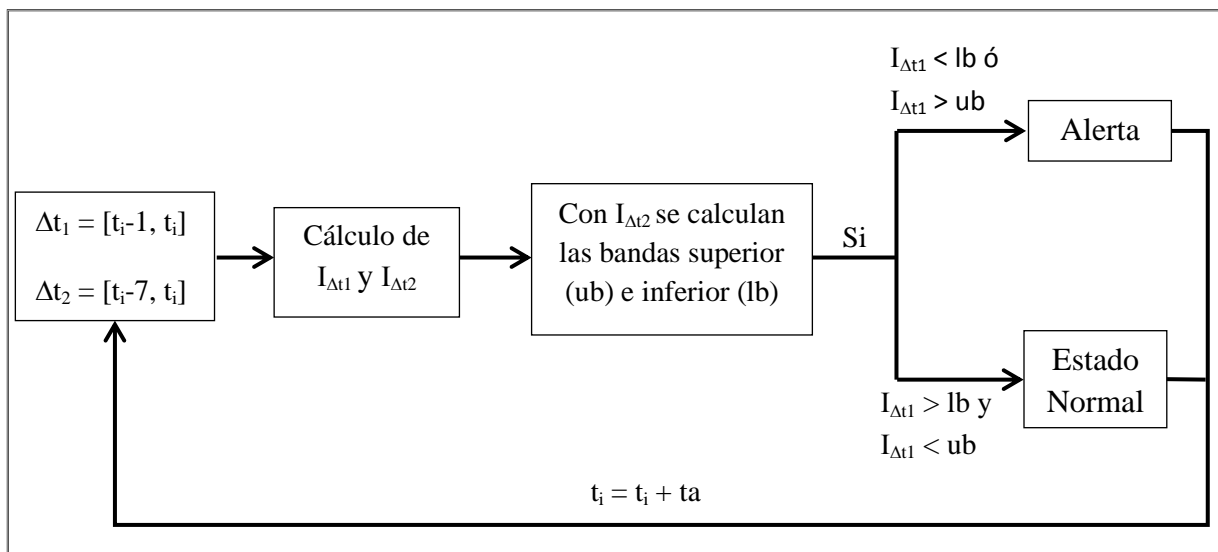


Figura 4.1. Diagrama que muestra el protocolo de alerta utilizando para los indicadores frecuencia de eventos, Tasa genérica de momento sísmico y Aglomeramiento espacial.

En el caso del indicador probabilístico, se realizan los siguientes pasos definir un estado de alerta:

1. Definir una probabilidad de corte (p^*) constante en el tiempo. Mediante un período de calibración del indicador, se busca el valor de p^* que optimice el desempeño.
2. Se define un estado de alerta cuando $P(M > M^*, \Delta t) > p^*$, donde $P(M > M^*, \Delta t)$ fue definido en la sección 2.2.4. En caso contrario se está en estado normal.

4.2 Tipos de bandas

4.2.1 Banda Poisson

Para la construcción de esta banda se utilizan los percentiles de la distribución acumulada de Poisson del indicador semanal, como se indica en la Figura 4.2.

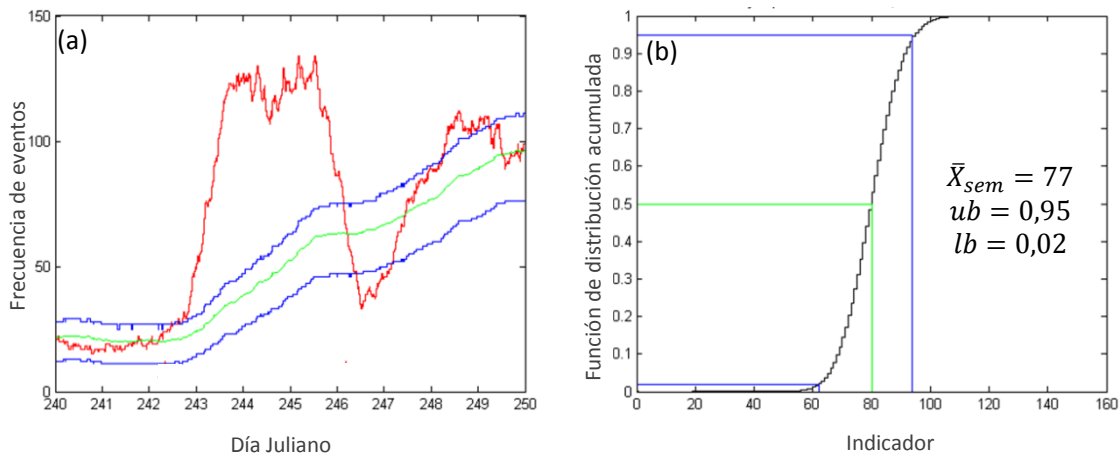


Figura 4.2. (a) Ejemplos de la banda Poisson utilizada para el criterio de frecuencia de eventos. En rojo la media diaria, en verde la media semanal y en azul el número de eventos al percentil 2% (banda inferior, lb) y 95% (banda superior, ub) de la distribución de Poisson. (b) Ejemplo de obtención de las bandas superior e inferior utilizando una media semanal de 77 eventos (línea verde). En azul los valores obtenidos para el indicador utilizando los percentiles 2% (64 eventos/semana) y 95% (90 eventos/semana).

El principal supuesto para utilizar esta banda es considerar que la distribución temporal de la sismicidad inducida sigue una distribución del tipo Poisson. Debido a esto es que solo el indicador frecuencia de eventos utilizará esta banda para el criterio de alerta. Para los otros indicadores no es posible utilizar esta distribución ya que los valores a evaluar, en el caso de la tasa genérica de momento sísmico, son muy grandes (del orden de $10^7 - 10^{11}$ [Nm]) por lo que las bandas serían muy amplias. Además, la distribución de Poisson describe variables discretas, y el momento sísmico corresponde a una variable continua.

Por otra parte, el indicador aglomeramiento espacial no corresponde a un proceso Poisson - proceso con igual probabilidad de ocurrencia - que permita utilizar esta distribución para definir las bandas de alerta.

Dado lo anterior, se definieron las bandas poblacional, auto-poblacional y proporcional para utilizarlas con los indicadores tasa genérica y aglomeramiento espacial.

4.2.2 Banda poblacional.

En este caso se utilizan percentiles de la distribución acumulada de la población del indicador semanal (Figura 4.3).

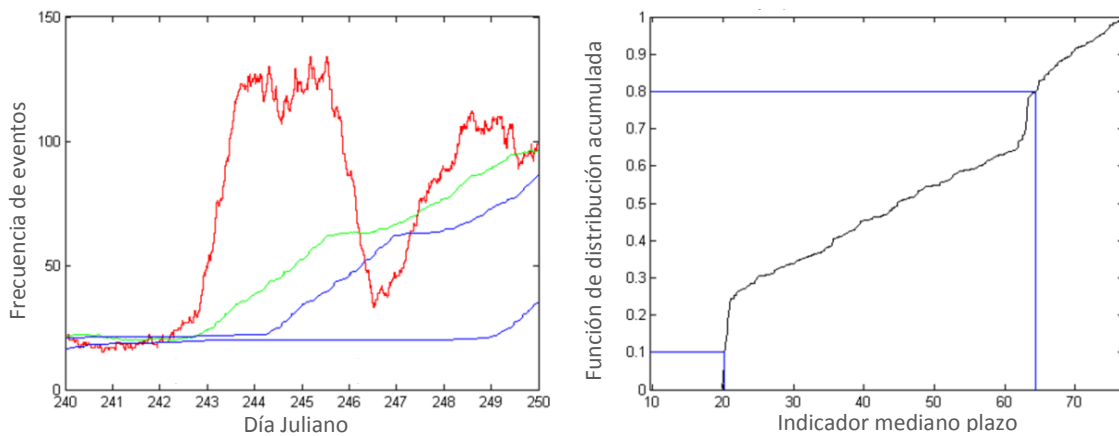


Figura 4.3. Ejemplo de la banda poblacional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial. En rojo el indicador diario, en verde el indicador semanal y en azul las bandas superior e inferior.

Es necesario destacar que para esta banda, existe la posibilidad de que el indicador semanal salga de las bandas. Esto puede ocurrir ya que si se considera una sección creciente del indicador el valor máximo se obtiene en el punto donde se tiene que calcular la banda, entonces, al hacer la distribución empírica, este valor equivaldrá al percentil 100%. Con esto, si tomamos percentiles menores que 100% para definir las bandas (90% y 10% por ejemplo) los valores obtenidos serán menores y el indicador semanal estará fuera de las bandas.

4.2.3 Banda auto-poblacional.

Para definir la banda auto-poblacional se utilizan percentiles de la distribución acumulada de la población del indicador diario (Figura 4.4).

Esta banda, al utilizar una población precedente del indicador diario, produce que las bandas reaccionen tardíamente al aumento o disminución de sismicidad, generándose el efecto

que se muestra en la Figura 4.4, con el indicador en un estado de alerta constante pudiendo generarse una mayor tasa de falsas alarmas.

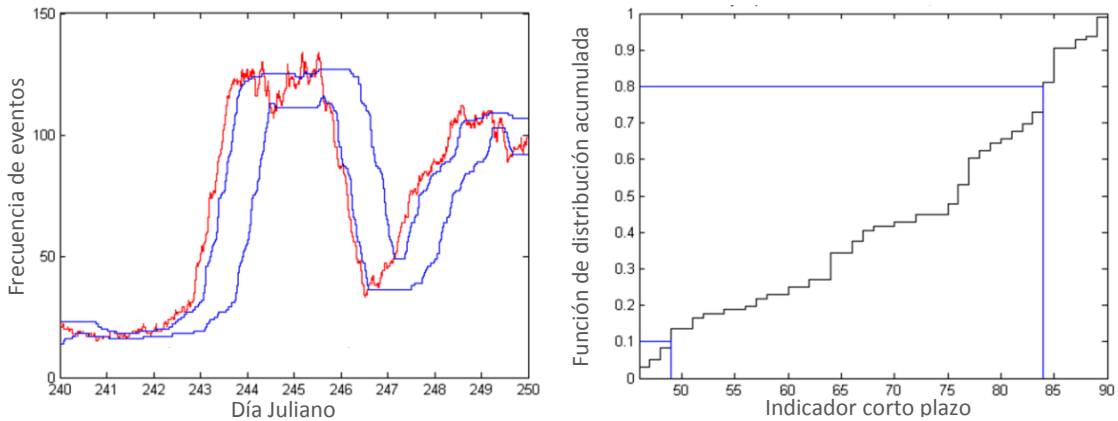


Figura 4.4. Ejemplo de la banda auto-poblacional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial. En rojo el indicador diario, en verde el indicador semanal y en azul las bandas superior e inferior.

4.2.4 Banda proporcional.

Esta banda es definida como un porcentaje del indicador semanal. En la Figura 4.5 se muestra un ejemplo de este tipo de banda, en donde $ub = \bar{X}_{sem}(1 + up)$ y $lb = \bar{X}_{sem}(1 + lp)$, con up y lp los porcentajes con los que se generan la banda superior e inferior respectivamente.

Los valores utilizados de up y lp fueron 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5.

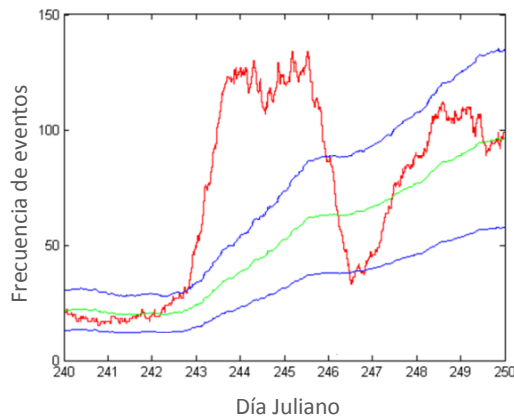


Figura 4.5. Ejemplo de banda proporcional utilizada para los indicadores de tasa genérica y aglomeramiento espacial. En rojo el indicador diario, en verde el indicador semanal y en azul las bandas superior e inferior.

En este caso, al existir un aumento en el indicador de corto plazo, se produce un “ensanchamiento” (proporcional al incremento de sismicidad) en el estado de sismicidad “normal”.

4.3 Filtro de datos

4.3.1 Filtro por error de localización del hipocentro

Una de las tareas más importantes en sismología es la correcta localización de la fuente sísmica, identificando los parámetros espaciales (latitud, longitud y profundidad) y tiempo de origen (Lay y Wallace, 1995). La precisión y consistencia en la estimación de los parámetros de localización, dependen de los siguientes factores (Vera, 2003):

- Número y distribución espacial de las estaciones con respecto al sismo.
- Cantidad y calidad de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas.
- Precisión del modelo de velocidades usado.
- Correcta elección de los tiempos de llegada de las ondas P y S en el sismograma.

De lo anterior, la principal fuente de error en la localización de hipocentros en la Mina RENO se puede asociar al último punto, en el que existe intervención humana durante el proceso, corrigiendo de manera manual, en caso de que se estime necesario, las llegadas de las ondas P y S que son detectadas automáticamente por el sistema. Sin embargo, este error no pudo corregirse para el análisis realizado en esta investigación dado que no se realizó una relocalización de hipocentros.

Por otra parte, se estudió el efecto del número de estaciones en el error de localización entregado por el sistema de monitoreo. En la Figura 4.6a se observa que el 55% de los datos se obtiene con 6 o menos estaciones y que a mayor cantidad de estaciones para la localización, menor es el error asociado (Figura 4.6b). Sin embargo, a pesar de un alto número de estaciones utilizadas para la localización, existen aún errores de más de 1.000 metros. Por lo anterior, es necesario y recomendable filtrar por el error mismo y no por el número de estaciones.

La metodología de filtrado es descrita por Vallejos y McKinnon (2008), en donde se construye una distribución acumulada ascendente normalizada por el número de eventos y energía como función del error de localización. Esta metodología permite elegir un nivel de error en la localización de los hipocentros, manteniendo un porcentaje pre definido de eventos y energía (estimada a través del momento sísmico) en la base de datos.

Para la Mina RENO, mediante la inspección de gráficos similares al mostrado en la Figura 4.7 realizado para cada polígono, se consideró un error de localización de 40 metros, obteniéndose en la mayoría de los casos porcentajes superiores al 90% tanto en la cantidad de eventos (Tabla 4.1) como en la energía (Tabla 4.2).

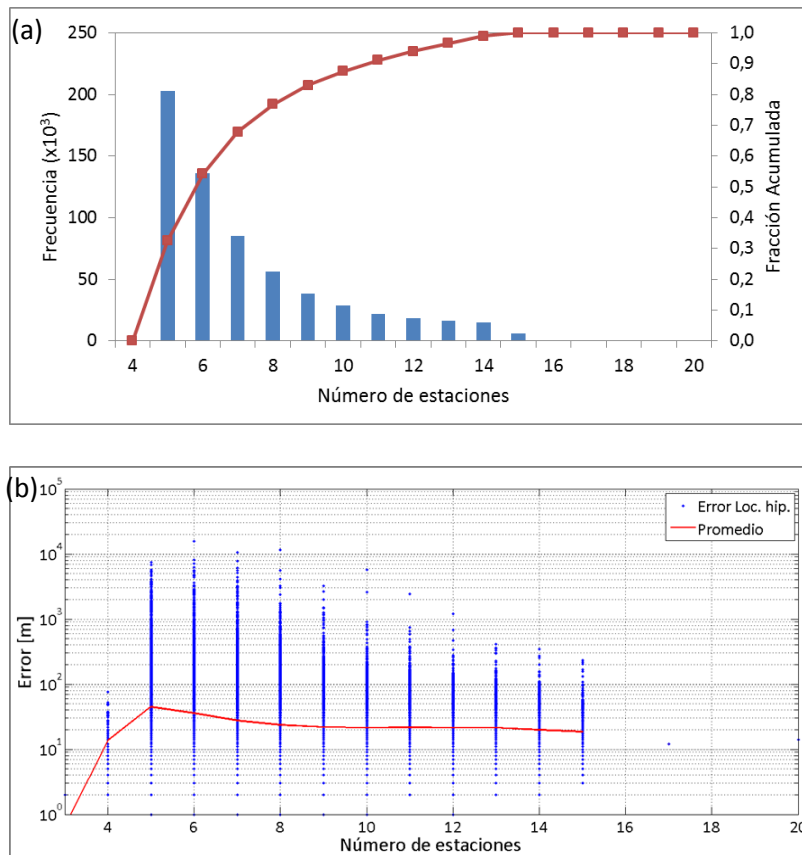


Figura 4.6. (a) Frecuencia y fracción acumulada ascendente de eventos registrados por número de estaciones sísmicas. (b) Error asociado a la localización del hipocentro como función del número de estaciones. Mina RENO.

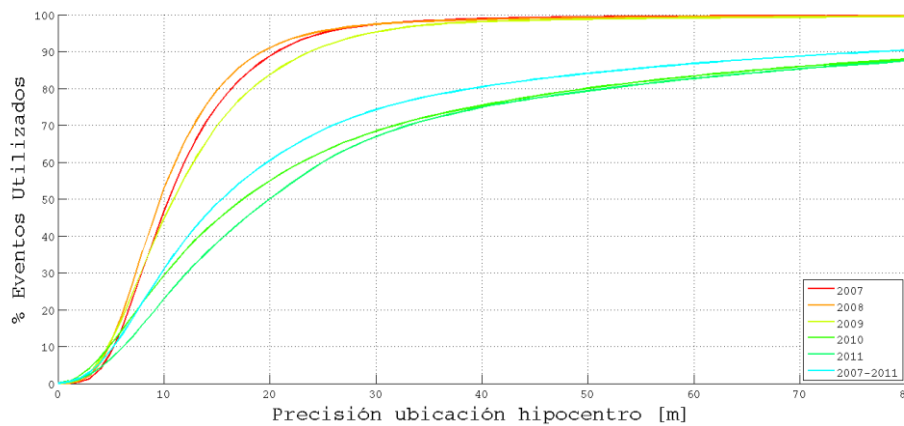


Figura 4.7. Función acumulada ascendente del porcentaje de número de eventos como función del error de localización para los años 2007-2011. Mina RENO.

En los años 2010 y 2011 se observa que existió un aumento en el error de localización, que se debe al aumento de la sismicidad en esos años (Figura 3.8). Aun así, se logra una disminución importante en el error de localización promedio y la desviación estándar para cada uno de los polígonos, llegando a un valor medio para todo RENO de 14 ± 8 metros (Anexo C).

Se utilizó el mismo procedimiento de filtrado descrito anteriormente para el caso de la Mina Creighton. Se determinó que el máximo error de localización fue de 50 metros, tanto para los eventos como para los reportados. En la Tabla 4.3 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 4.1. Porcentajes de eventos utilizados con un error de localización menor a 40 metros. Los valores en rojo representan porcentajes menores al 90%.

Polígono/Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1	91,1	97,0	93,8	98,3	-	-	-	-	-
2	99,2	98,9	97,4	99,3	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	98,4	98,3	98,1	79,9	73,7
2	-	-	-	-	99,3	99,0	98,9	79,1	69,7
3	-	-	-	-	99,1	98,8	97,7	68,5	61,2
4	-	-	-	-	97,9	96,8	97,5	74,8	75,4
1	-	-	-	-	-	-	-	-	73,5
2	-	-	-	-	-	-	-	-	76,5
3	-	-	-	-	-	-	-	-	63,7
4	-	-	-	-	-	-	-	-	75,4
5	-	-	-	-	-	-	-	-	77,3
6	-	-	-	-	-	-	-	-	57,6
7	-	-	-	-	-	-	-	-	53,2

Tabla 4.2. Porcentajes de energía utilizados con un error de localización menor a 40 metros. Los valores en rojo representan porcentajes menores al 90%.

Polígono/Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1	82,0	95,1	75,4	98,3	-	-	-	-	-
2	100,0	99,2	98,4	99,1	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	97,2	98,0	98,3	80,7	69,0
2	-	-	-	-	99,3	99,0	99,1	75,2	69,4
3	-	-	-	-	75,2	98,9	97,0	49,2	48,4
4	-	-	-	-	95,3	96,5	99,2	81,3	82,5
1	-	-	-	-	-	-	-	-	74,3
2	-	-	-	-	-	-	-	-	78,0
3	-	-	-	-	-	-	-	-	55,8
4	-	-	-	-	-	-	-	-	66,0
5	-	-	-	-	-	-	-	-	69,2
6	-	-	-	-	-	-	-	-	71,7
7	-	-	-	-	-	-	-	-	36,0

Tabla 4.3. Resumen de los resultados obtenidos al filtrar los eventos de la mina Creighton por el error de localización del hipocentro menor a 50 metros. En rojo resultados menores a un 90%.

Err. Loc. ≤ 50 m.	% Eventos	% Energía	Sin Filtro		Con Filtro	
			Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.
Eventos	93,7	72,4	26	22,7	23,4	8,2
Reportados	94,4	86,7	25	14,3	22,3	8,2
Tronaduras	93,0	90,1	29	19,7	25,1	8,4

En el anexo D se encuentran las figuras correspondientes al análisis de la mina Creighton.

4.3.2 Filtro por magnitud de completitud

Se establece la magnitud de completitud (M_c) o magnitud mínima (M_{min}) (Wiemer & Wyss, 2000; Woessner & Wiemer, 2005) que es capaz de monitorear en el tiempo la red sísmica de RENO y en el espacio la mina Creighton.

Se construyó la distribución de frecuencia-magnitud de momento utilizando bins de 0,1. La magnitud fue estimada mediante la fórmula de Hanks y Kanamori (1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 6,1$$

conocida como la magnitud de momento (M_w) y M_o el momento sísmico en unidades de Newtonmetro.

La magnitud de completitud se determinó en el bin con la mayor frecuencia de eventos de la distribución (Wiemer & Wyss, 2000; Woessner & Wiemer, 2005).

Como los datos utilizados para la mina RENO van desde el año 2003 al 2011, se determinó la variación temporal de M_c , empleando el siguiente procedimiento (Figura 4.8):

- En un tiempo t_1 se utilizaron n eventos pasados para construir la distribución de frecuencia-magnitud, a partir de la cual se estima la M_c asociado a ese t_1 .
- Posteriormente, la ventana avanza en Δn eventos, se estima el t_2 correspondiente y se vuelve a estimar M_c con n eventos pasados.
- El proceso se repite hasta terminar el catálogo de eventos.

La Figura 4.9 muestra la variación en el tiempo de M_c de la Mina RENO, utilizando $n=1000$ y $\Delta n=10$ eventos entre los años 2003 y 2011. Desde el 2003 a finales del 2006 se observa que M_c varía en torno a 0,4 mientras que a partir del año 2007, la sensibilidad de la red aumenta, oscilando en torno a -1. Desde junio del año 2009 y junio del 2010, la sensibilidad aumenta otro poco, alcanzando un valor de -1,1. Finalmente, a partir de agosto del 2010 la sensibilidad de la red se estabiliza en torno a -0,9.

En la Figura 4.9 también se puede observar cómo ha sido la campaña de instalación de estaciones sísmicas en la mina RENO (línea negra), existiendo una directa relación entre la mayor cantidad de estaciones operando y el aumento de la sensibilidad de la red, obteniéndose una menor magnitud de corte.

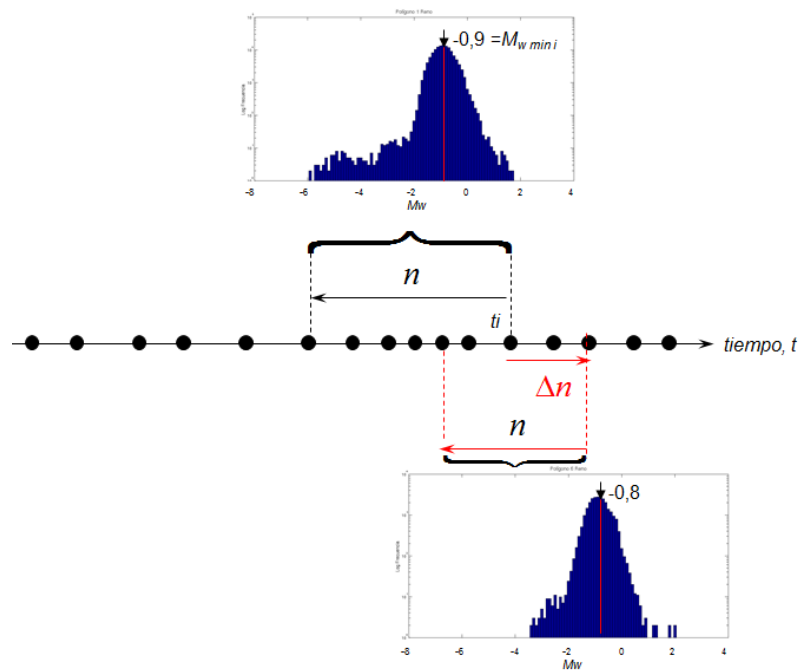


Figura 4.8. Metodología utilizada para determinar la variación temporal de la magnitud de completitud o magnitud mínima para la mina RENO. Cada punto negro representa un evento ocurrido en el tiempo.

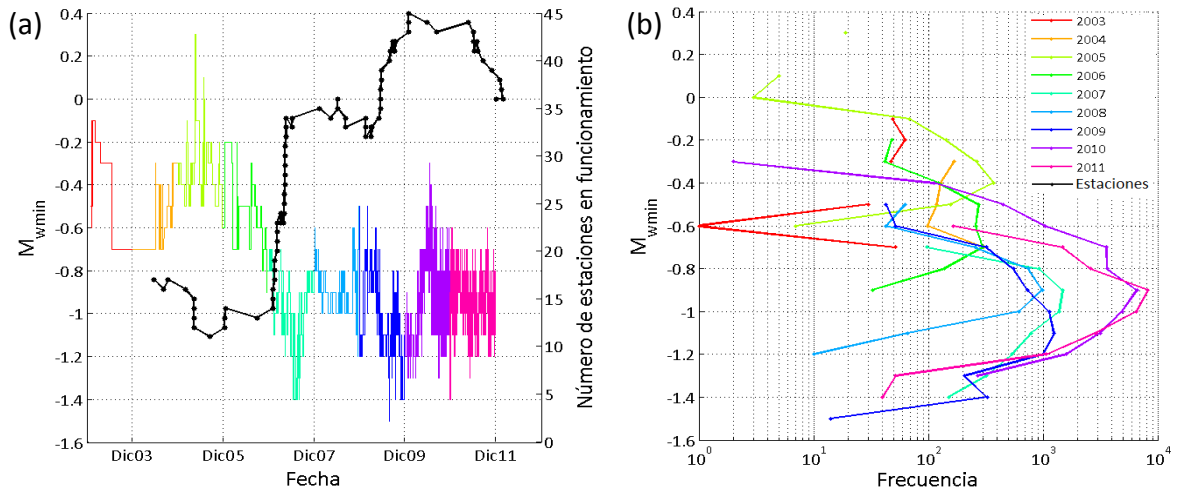


Figura 4.9. (a) Variación temporal de la magnitud de completitud desde el año 2003 al 2011. La línea negra muestra la cantidad de geófonos instalados durante ese período de tiempo en la mina RENO. (b) Número de eventos en función de la magnitud de completitud. Cada color corresponde a un año en particular.

Debido a la fuerte variación en la sensibilidad de la red sísmica que existió a partir del año 2007, es que de aquí en adelante el análisis que se realizará al sector de RENO será entre los años 2007 y 2011.

Para la Mina Creighton la distribución de las magnitudes se muestran en la Figura 4.10. Se observa que las magnitudes de los eventos registrados comprenden entre -2,5 y -0,1 con la mayor frecuencia en el bin de magnitud -1,5, correspondiente a la magnitud de completitud para la mina Creighton durante el año 2008. Además, en la misma figura se puede observar las diferentes distribuciones que tienen los eventos reportados y las tronaduras, por lo que se afirma el hecho de trabajar con las 3 poblaciones de manera separada. Notar que los eventos reportados corresponden a aquellos de mayor magnitud, pero que existen también con magnitudes menores a cero. Además como es solo un año de datos, no se calculó la variación temporal de M_c .

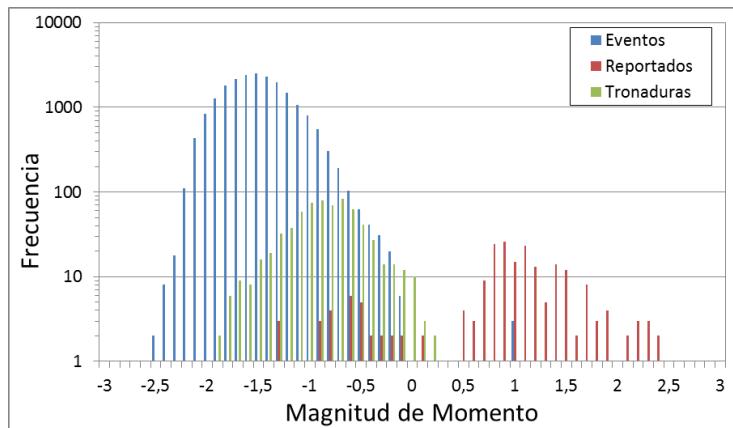


Figura 4.10. Distribución de frecuencia – magnitud para el año 2008 en la mina Creighton. Se muestran por separado los eventos registrados, los eventos reportados y las tronaduras.

4.4 Calibración y validación

Se definen 2 períodos de estudio: calibración y validación. En el primero se ajustarán los parámetros óptimos a cada indicador mientras que en el segundo se aplicarán estos parámetros al conjunto de datos, verificándose el correcto ajuste de los parámetros obtenidos en el período de calibración.

Para la Mina RENO, el período de calibración es desde el 01-01-2007 al 25-05-2010, el cual corresponde al intervalo de tiempo en el que ocurrieron el 70% de los sismos de magnitud mayor a 0,7 entre los años 2007 - 2011. Entre esas fechas los polígonos de análisis corresponden a aquellos descritos en la Figura 3.5b. Las variables para evaluar el desempeño de cada indicador serán estudiadas y definidas en este período para luego ser aplicadas en el período de validación.

La Figura 4.11 presenta el número de eventos por polígono y año para este período.

Por otra parte, el período de validación es desde el 26-05-2011 al 31-12-2011. Durante este período se tienen 2 definiciones de polígonos. La primera que corresponde al período 26-05-2010 al 25-04-2011 (validación 1) y que es la misma que para la calibración mientras que la segunda (validación 2) es desde el 26-04-2011 al 31-12-2011 (ver Figura 3.5c). En esta etapa se aplicarán las variables que optimizan el desempeño del indicador obtenidas en el período de calibración. Con esto se comprueba que dichas variables tengan un buen comportamiento para todo el conjunto de datos y no corresponda necesariamente a un resultado sesgado a los mismos.

La Figura 4.12 presenta el número de eventos por polígono y año para el período de validación.

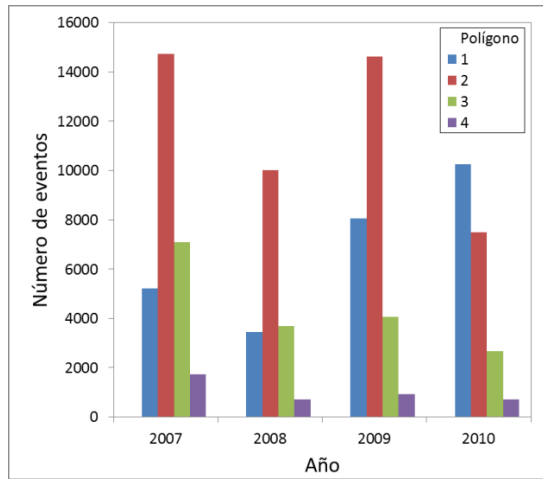


Figura 4.11. Número de eventos por polígono y año para el período de calibración con $M_w \geq -1,0$ y error de localización ≤ 40 [m].

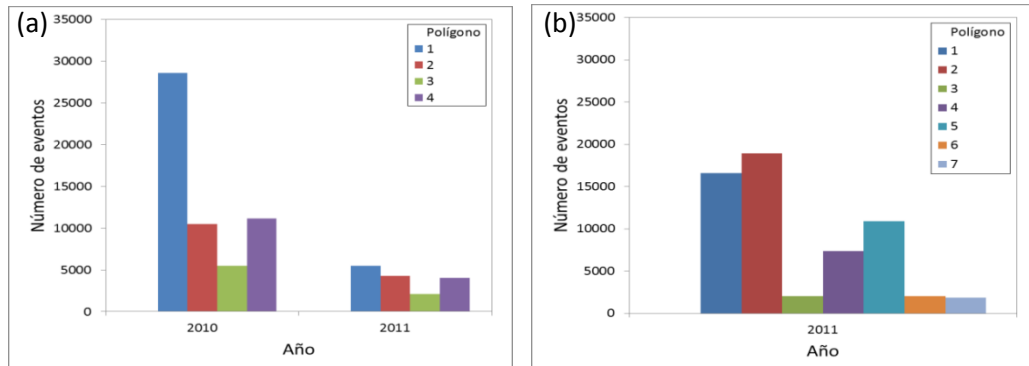


Figura 4.12. Número de eventos por polígono y año con $M_w \geq -1,0$ y error de localización de hipocentro ≤ 40 [m] para el período de validación (a) 26-05-2010 al 25-04-2011 y (b) 26-04-2011 al 31-12-2011.

En el caso de la Mina Creighton, los períodos de calibración y validación fueron definidos de la misma manera que para la Mina RENO. Estos corresponden desde el 01-01-2008 al 26-08-2008 desde el 27-08-2008 al 31-12-2008 respectivamente.

4.4.1. Parámetros a calibrar

Los parámetros que fueron calibrados para cada uno de los indicadores fueron los que se detallan a continuación.

- Criterio de Frecuencia de Eventos.
 - Percentiles de la distribución de Poisson
 - Cotas
 - Magnitud de eventos relevantes (M_{rel})
 - Magnitud de completitud o magnitud mínima (M_{min})
- Indicador probabilístico.
 - Probabilidad de corte.
- Tasa genérica de momento sísmico.
 - Valor de ξ .
 - Percentiles de las bandas poblacional, auto-poblacional y fracciones de la banda proporcional.
- Aglomeramiento espacial.
 - Dimensión de agrupamiento (D^*).
 - Percentiles de las bandas poblacional, auto-poblacional y fracciones de la banda proporcional.

4.5 Evaluación de desempeño

4.5.1 Análisis ROC (*Receiver Operating Characteristic*)

El análisis ROC, desarrollado por Fawcett (2005), permite cuantificar el desempeño de los indicadores por medio de matrices de contingencia y de métricas asociadas a esta (Figura 4.13).

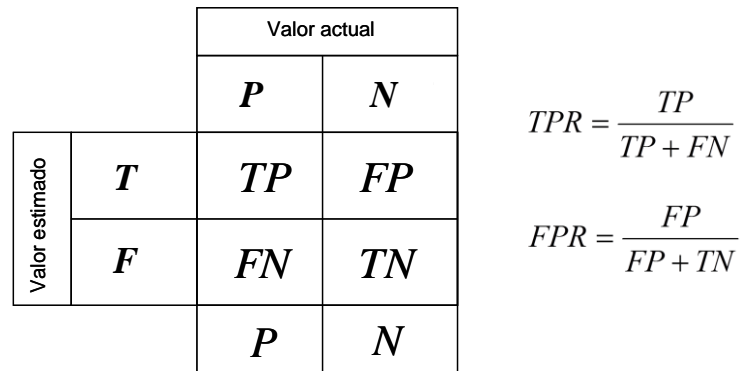


Figura 4.13. Matriz de contingencia y métricas asociadas (modificado de Fawcett, 2005). TP: *True Positive* (Acierto), FP: *False Positive* (Falsa alarma), FN: *False Negative* (Fallido), TN: *True Negative* (Negativo correcto)

Las matrices de contingencia sirven para clasificar los indicadores de acuerdo al valor actual (o real) y al estimado (o esperado) que estos van adquiriendo o se espera que adquieran. Con las métricas TPR (Tasa de aciertos, *True Positive Rate* en inglés) y FPR (Tasa de falsas alarmas, *False Positive Rate* en inglés) se puede construir el diagrama ROC (Figura 4.14), el que ayuda a visualizar y comparar el desempeño de cada indicador.

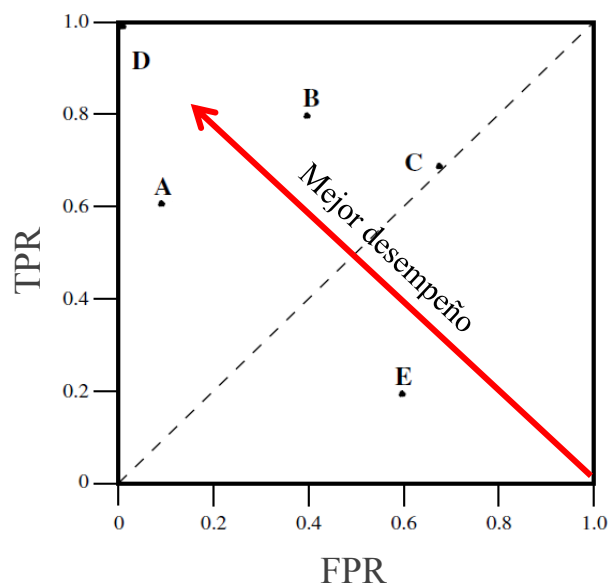


Figura 4.14. Diagrama ROC que muestra las distintas alternativas que pueden obtener los indicadores (modificado de Fawcett, 2005).

Si los resultados se encuentran más cercanos a la esquina superior izquierda del diagrama, implica que se tienen indicadores con una alta tasa de aciertos y una baja tasa de falsas alarmas, lo que indicaría un buen desempeño de este. En el caso contrario, si el indicador se encuentra cercano al punto E de la Figura 4.14, correspondería a un mal desempeño con una alta tasa de falsas alarmas y baja tasa de aciertos. Los indicadores que se encuentren en la diagonal (punto C, Figura 4.14) muestran un desempeño aleatorio con un aumento sostenido en los aciertos, pero también con un aumento en las falsas alarmas.

Lo interesante es la comparación que existe entre los puntos A y B de la Figura 4.14. Aunque el punto B posee una mayor tasa de aciertos, la cantidad de falsas alarmas sigue siendo alta; distinto es lo que ocurre con el punto A que, si bien se tiene una menor tasa de aciertos, las falsas alarmas son mucho menores que en el caso anterior. Fawcett (2005) plantea el primero como “liberal” (punto B) y el segundo (punto A) como “conservador”.

Adicionalmente, los siguientes *Skill Scores* facilitan la evaluación de la efectividad del protocolo de alerta:

$$PSS = TPR - FPR$$

$$HSS = \frac{2(TP \times TN - FP \times FN)}{(TP + FN)(FN + TN) + (TP + FP)(FP + TN)}$$

donde *PSS* y *HSS* son los *Skill Scores* propuestos por Peirce (1884) y Heidke (1926), respectivamente. Estas métricas ofrecen una comparación directa entre el método utilizado y uno aleatorio, adquiriendo valores entre -1 y 1. Valores iguales a 1, 0 y -1, indican que el método usado es perfecto, aleatorio, o peor que aleatorio, respectivamente, siendo un aporte adicional al análisis que se realiza con el diagrama ROC.

4.5.2 Construcción matriz de contingencia

El desempeño de los diferentes indicadores será evaluado mediante matrices de contingencia y diagramas ROC (Fawcett, 2005). La metodología utilizada para la construcción de estas se detalla a continuación (Vallejos et al., 2012):

1. En un tiempo t_i se determina si el indicador se encuentra en alerta o no
2. Se verifica la ocurrencia de algún evento de magnitud relevante en un tiempo $t_i + \Delta t_f$.
3. Se asigna un valor igual a uno al escenario correspondiente de la matriz de contingencia, según los siguientes criterios:
 - 3.1. Si el indicador se encuentra en estado de alerta en t_i y ocurre un evento de magnitud relevante en $t_i + \Delta t_f$, entonces $TP_i = 1$.
 - 3.2. Si el indicador se encuentra en estado normal en t_i y ocurre un evento de magnitud relevante en $t_i + \Delta t_f$, entonces $FN_i = 1$.
 - 3.3. Si el indicador se encuentra en estado de alerta en t_i y no ocurre un evento de magnitud relevante en $t_i + \Delta t_f$, entonces $FP_i = 1$.
 - 3.4. Si el indicador se encuentra en estado normal en t_i y no ocurre un evento de magnitud relevante en $t_i + \Delta t_f$, entonces $TN = 1$.
4. Se actualiza el tiempo, es decir, $t_i = t_i + \Delta t$, y se vuelve al punto (1).

Mediante este método es posible asignar puntajes a los escenarios de la matriz de contingencia que dependen del número de veces que se repite cada escenario en la ventana Δt_f , sumando el total de valores TP_i , FN_i , FP_i y TN_i obtenidos. Para el caso de la mina RENO y la mina Creighton se utilizaron valores de $\Delta t_f = 8$ horas (correspondientes a un turno) y $\Delta t = 15$ minutos.

La evaluación del desempeño de los indicadores sísmicos se realizó de la misma manera para la Mina RENO y Creighton con la diferencia que en este último caso no se utilizaron polígonos de control y no se consideraron las tronaduras.

5. Resultados

A continuación se presentan el desempeño de los 4 indicadores en estudio para la Mina RENO y Creighton. Los resultados obtenidos por los indicadores frecuencia de eventos y probabilístico consideran un filtro por error de localización del hipocentro de 40 metros (ver capítulo 4), mientras que la tasa genérica de momento sísmico y el aglomeramiento espacial no consideran este filtro. En el capítulo 6 se discutirá el efecto que tiene dicho filtro en el desempeño. Para la Mina Creighton los 4 indicadores poseen un filtro por error de localización menor a 50 metros.

5.1 Criterio frecuencia de eventos (CFE)

El CFE corresponde al indicador utilizado en la mina El Teniente (Dunlop & Gaete, 1997). Los parámetros utilizados se resumen en la Tabla 5.1 y que corresponderán al caso base. En la Tabla 5.2 se detalla la matriz de contingencia de este caso.

Tabla 5.1. Caso base de los parámetros a variar en el análisis del desempeño el CFE. Mina RENO.

Parámetro	Valores
Percentiles [ub – lb]	0,95 - 0,02
M_{rel}	0,7
M_{min}	-1

Tabla 5.2. Matriz de contingencia del caso base para el CFE. Período de calibración. Mina RENO.

ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS
0,95	0,02	599	97087	1139	374263	0,34	0,21	0,14

Este mismo indicador se aplicó a la mina Creighton, en el cual se fijaron los valores de la magnitud relevante y la magnitud mínima. La magnitud relevante se obtuvo como el mínimo valor mayor a cero en que se obtienen eventos reportados y fuera de la distribución de magnitudes de las tronaduras (Figura 4.10). La magnitud mínima se definió en la sección 4.3.2, e igual a -1,5.

5.1.1 Calibración

5.1.1.1 Variación de percentiles

Se variaron los percentiles superior e inferior con valores de 0,8; 0,85; 0,9; 0,95 (caso base) y 0,98 para el caso de la banda superior (ub) y 0,02 (caso base); 0,05; 0,1; 0,15 y 0,2 para la banda inferior (lb), realizando todas las combinaciones posibles. Los resultados se muestran en la Figura 5.1.

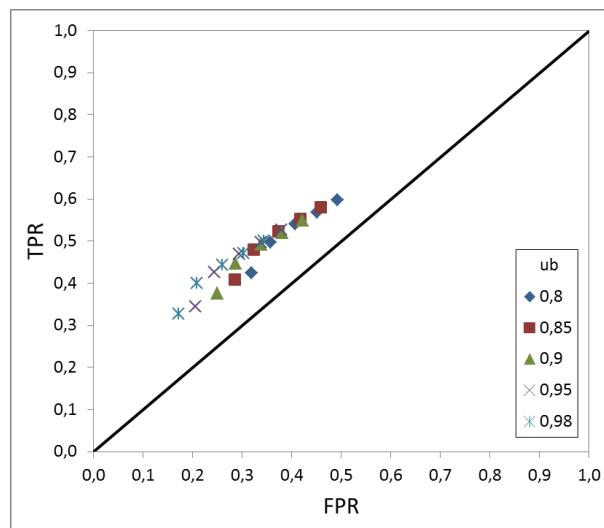


Figura 5.1. Gráfico ROC para la variación de percentiles superior (ub) e inferior (lb) de la distribución de Poisson en CFE. Mina RENO.

Los resultados obtenidos están por sobre la línea bisectriz del gráfico, lo que indica un comportamiento mejor que aleatorio, sin embargo, independiente del percentil utilizado, el desempeño del indicador no mejora sustancialmente. El mejor resultado se obtiene para el par 0,98 y 0,05, con un PSS de 0,19. El detalle de la matriz de contingencia se muestra en el anexo E.

Para definir los percentiles en el caso de la mina Creighton, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente. Los percentiles que entregaban un mayor valor del PSS son 0,8 y 0,15 para los percentiles superior e inferior respectivamente, con un valor de PSS = 0,04. En la Figura 5.2 se muestra el gráfico ROC de este análisis.

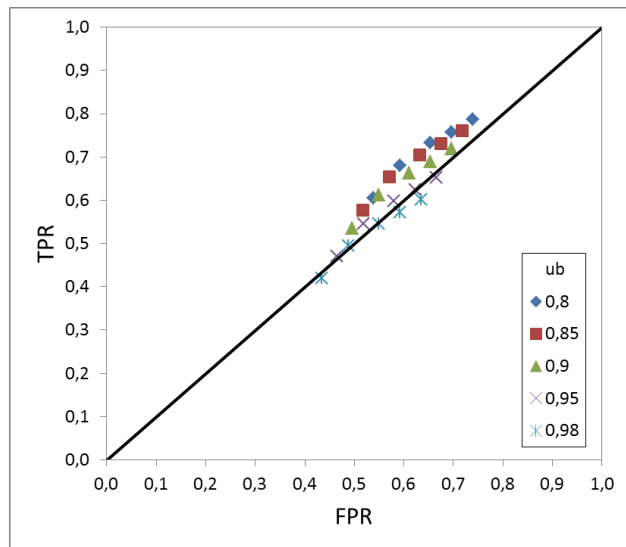


Figura 5.2. Gráfico ROC para la variación de percentiles superior (ub) e inferior (lb) de la distribución de Poisson en CFE. Mina Creighton.

5.1.1.2 Variación M_{rel}

Los eventos sísmicos a considerar con magnitud relevante serán aquellos que posean una magnitud mayor o igual a los siguientes valores: 0; 0,2; 0,4; 0,7 (caso base), 1 y 1,6. Los resultados se muestran en la Figura 5.3. Al igual que el caso anterior, el desempeño del indicador resulta invariable al cambio de la magnitud de eventos relevantes, manteniendo su desempeño constante (PSS entre 0,13 y 0,14) excepto para el caso de $M_{rel} = 1,6$ en donde se obtiene un PSS = 0,44 con una tasa de falsas alarmas similar a los otros casos, pero con mayor tasa de aciertos. En la Tabla 5.3 se muestran la cantidad de eventos relevantes por polígono y por magnitud de corte utilizada.

En el caso de la mina Creighton, el valor de M_{rel} no se varió y se mantuvo constante en el análisis e igual a 0,5.

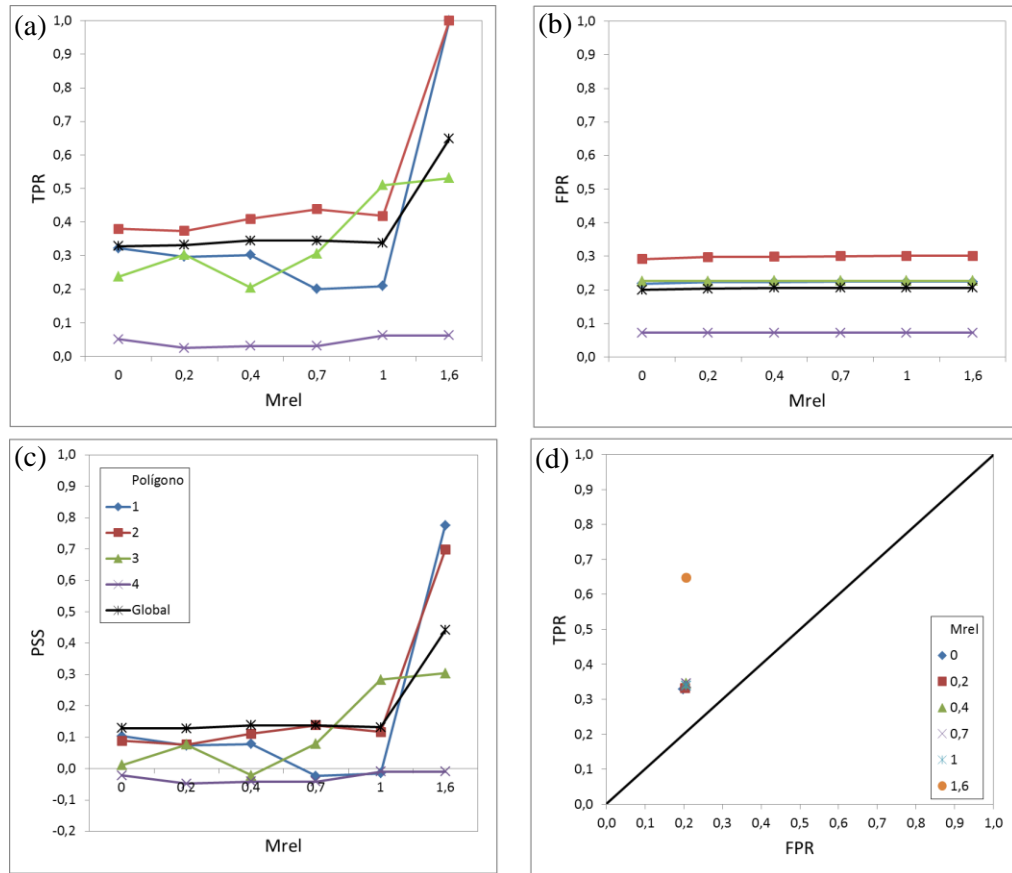


Figura 5.3. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función de M_{rel} . El valor global en los 3 gráficos anteriores corresponde a las métricas obtenidas al sumar las matrices de contingencia de los 4 polígonos. (d) Gráfico ROC variando la magnitud de los eventos relevantes.

Tabla 5.3. Número de eventos de magnitud relevante por polígono y por magnitud de corte.

Número de eventos con $M_w \geq M_{rel}$, $err \leq 40$ m. Período calibración.							
Polígono / M_w,rel	0	0,2	0,4	0,7	1	1,6	Total
1	258	108	54	16	10	1	447
2	522	238	105	38	14	1	918
3	129	34	18	3	1	0	185
4	35	13	6	2	1	1	58
Total	944	393	183	59	26	3	1608

5.1.1.3 Variación M_{min}

Se estudió el efecto que la magnitud de completitud tiene sobre el desempeño del indicador. Los valores utilizados para el análisis son -2; -1,75; -1,5; -1,25; -1 (caso base); -0,75 y -0,5. Los resultados se muestran en la Figura 5.4. Se observa una progresiva disminución del desempeño del indicador al disminuir la sensibilidad de la red sísmica. Dado valores menores a $M_{min} = -1,5$, el desempeño del indicador se mantiene constante, con un PSS de 0,31.

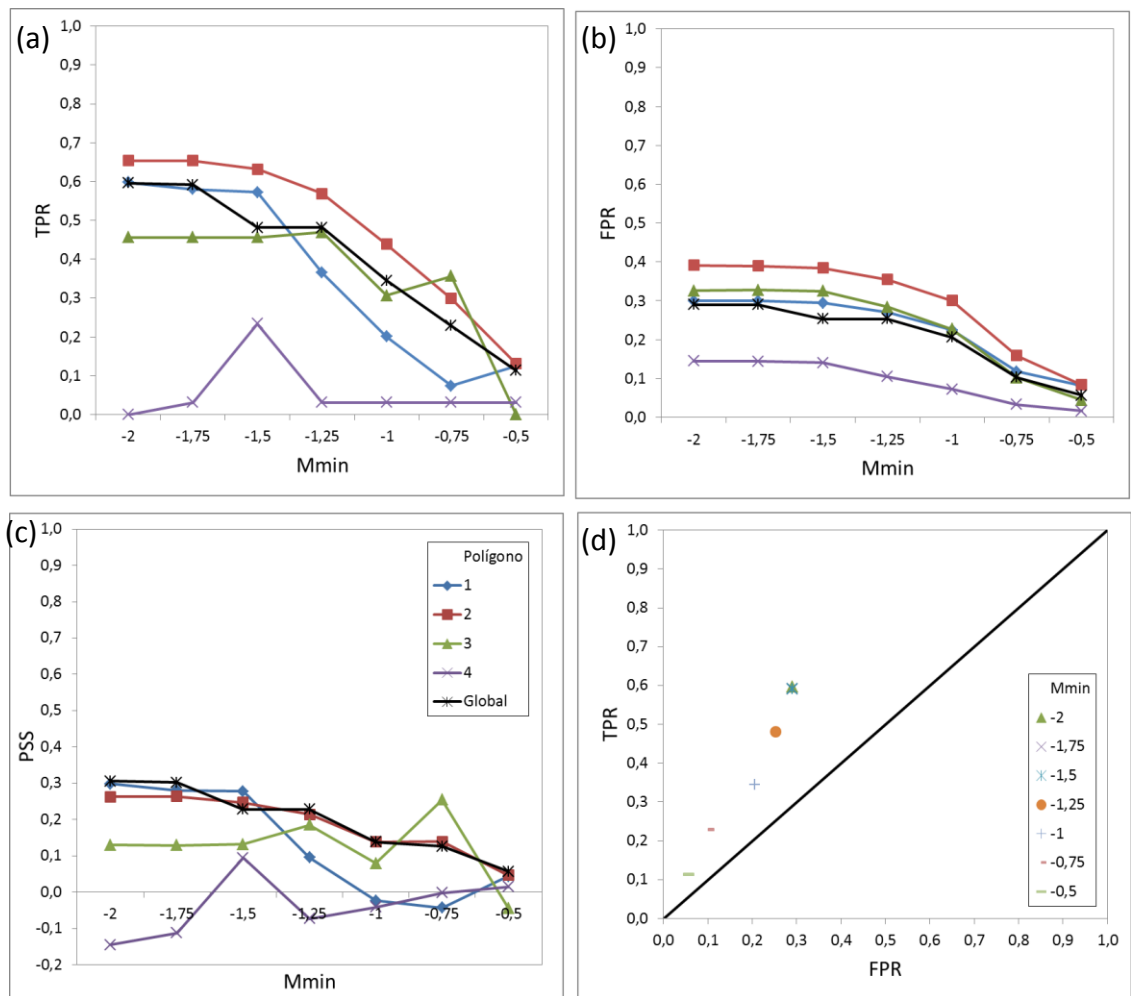


Figura 5.4. Variación de (a) TPR, FPR y (c) PSS en función de M_{min} . El valor global en los 3 gráficos anteriores corresponde a las métricas obtenidas al sumar las matrices de contingencia de los 4 polígonos. (d) Gráfico ROC al variar los valores de magnitud mínima.

Para la mina Creighton el valor de M_{min} tampoco fue variado y se mantuvo igual a -1,5 durante el análisis desarrollado.

5.1.2 Validación

Para el período de validación se consideraron tres casos:

- Caso base: $ub = 95\%$, $lb = 2\%$; $M_{rel} = 0,7$ y $M_{min} = -1,0$.
- Parámetros del caso base con $ub = 98\%$, $lb = 5\%$.
- Parámetros del caso base con $M_{rel} = 1,6$.

Se determinó el desempeño del indicador frecuencia de eventos con estos tres casos ya que el primero corresponde a los parámetros utilizados actualmente en la mina RENO para determinar el estado de alerta (Vallejos et. al., 2012) y se comparó ese resultado con los obtenidos al variar los percentiles de la distribución y la magnitud relevante para determinar si efectivamente existía una mejora en el desempeño del indicador al cambiar los parámetros originales. El valor de M_{min} se mantendrá igual en los tres casos ($M_{min} = -1,0$) con el fin de tener un conjunto de datos comparables entre sí.

Los resultados de la matriz de contingencia global de cada caso para el período de validación se muestran en la Tabla 5.4. El detalle por polígono se muestra en el anexo F.

Tabla 5.4. Matriz de contingencia global del período de validación al considerar los parámetros óptimos obtenidos en el período de calibración.

Parámetro	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS
Caso base	934	1324	92712	193985	0,41	0,32	0,09
$ub = 98\%$, $lb = 5\%$	936	1322	95311	171286	0,41	0,36	0,06
$M_{rel} = 1,6$	17	111	93629	195198	0,13	0,32	-0,19

De la tabla anterior, se observa que con los parámetros utilizados actualmente en la mina RENO se obtiene un mejor desempeño del indicador para el período de validación y que, por lo tanto, el máximo de PSS obtenido durante el período de calibración no corresponde necesariamente a un máximo global.

En la Tabla 5.5 se resumen los parámetros utilizados para el cálculo del indicador CFE para el período de validación en el caso de la mina Creighton. El valor del PSS es de -0,1, correspondiente a un desempeño peor que aleatorio.

Tabla 5.5. Parámetros utilizados para el CFE. Mina Creighton.

Parámetro	Valores
Percentiles [ub – lb]	0,8 – 0,05
M_{rel}	0,5
M_{min}	-1,5

En ambos casos, tanto en la mina RENO como en la mina Creighton, durante el período de validación, el desempeño del indicador corresponde a un comportamiento entre aleatorio y peor que aleatorio. En el caso de la mina RENO, el mejor desempeño se obtiene utilizando los parámetros del caso base.

5.2 Tasa genérica de momento sísmico

5.2.1 Calibración

En el caso del indicador tasa genérica de momento sísmico se utilizan tres valores del parámetro $\xi = \{0; 0,5; 1\}$ para las distintas bandas descritas en el punto 4.2. Los resultados globales se muestran en la Figura 5.5. El valor de ξ y los percentiles que maximizan el valor de PSS se indican en la Tabla 5.6.

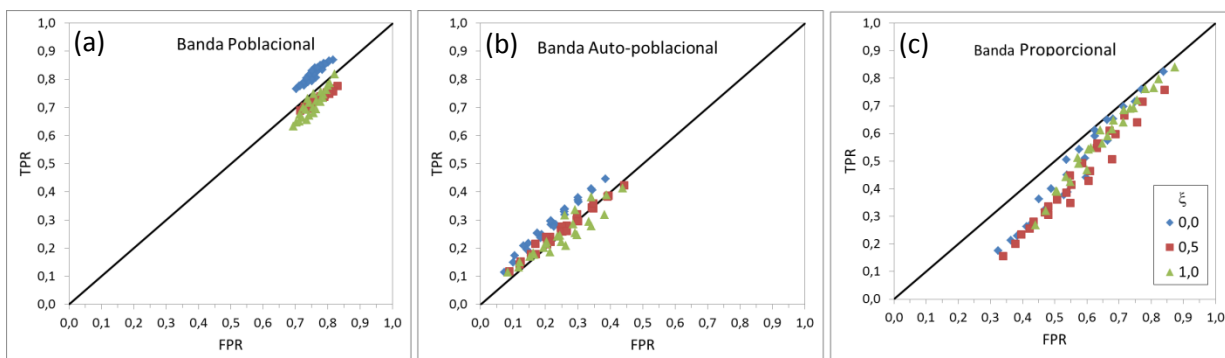


Figura 5.5. Gráficos ROC utilizando la banda (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional para los diferentes valores de ξ . Período de calibración. Mina RENO.

Tabla 5.6. Percentiles que maximizan el desempeño global (PSS) del indicador tasa genérica de momento sísmico para cada una de las bandas. Periodo de calibración. Mina RENO.

Banda	ξ	ub	lb	PSS
Poblacional	0	0,95	0,15	0,08
Auto-poblacional	0	0,90	0,15	0,08
Proporcional	0	0,20	0,10	-0,01

De los resultados anteriores se observa que, en todos los casos, los mejores resultados se obtienen con un valor de $\xi = 0$. Las bandas poblacional y auto-poblacional poseen un mejor desempeño que la proporcional que presenta incluso un PSS negativo (desempeño peor que aleatorio). Aun así tanto la banda poblacional como auto-poblacional poseen un desempeño cercano al aleatorio.

En el anexo G se detallan las matrices de contingencia globales para cada banda, valor de ξ y percentil. Notar que en la diferencia entre los valores obtenidos de PSS máximo, para diferentes percentiles, son menores al 1%, por lo que el efecto de variar este parámetro no tiene mayor influencia en el desempeño del indicador.

Para el caso de la mina Creighton, se determinó el valor de los percentiles y de ξ que maximizaban el valor del PSS durante el período de calibración. Los gráficos ROC se muestran en la Figura 5.6 y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.7. El detalle de la matriz de contingencia se muestra en el anexo H.

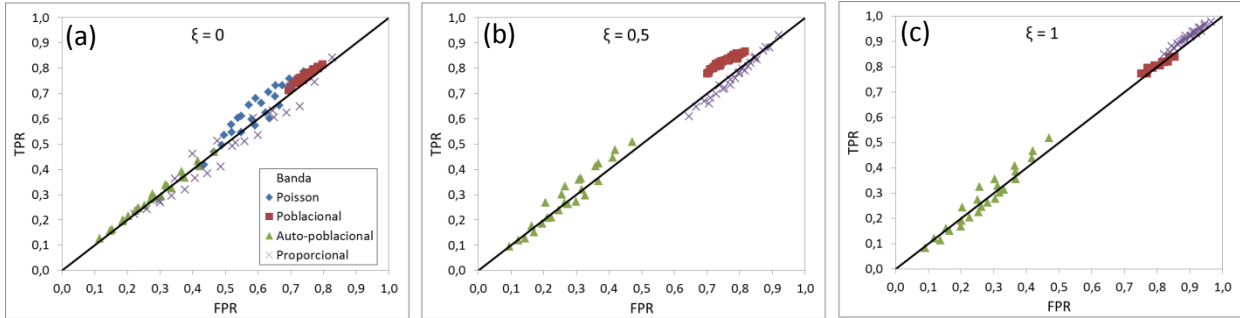


Figura 5.6. Gráficos ROC para las diferentes bandas de análisis y diferentes valores de ξ . (a) $\xi = 0$, (b) $\xi = 0,5$ y (c) $\xi = 1$. En el gráfico (a) se incluye los resultados obtenidos para la banda Poisson y $\xi = 0$ que corresponde al caso del indicador CFE. Mina Creighton.

Tabla 5.7. Resultados de PSS máximo en el período de calibración para el indicador tasa genérica de momento sísmico. Mina Creighton.

Banda	ξ óptimo	ub	lb	PSS máximo
Poblacional	0,5	0,9	0,05	0,09
Auto-poblacional	1	0,8	0,02	0,07
Proporcional	0	0,1	0,5	0,06

En este caso el mejor desempeño se obtiene con la banda poblacional, aunque para los tres tipos de bandas el desempeño obtenido es cercano a cero, es decir, el indicador posee un comportamiento aleatorio. Lo que sí es interesante destacar es que el valor de ξ óptimo corresponde al valor 0,5 lo que le da una ponderación al momento sísmico al momento de calcular el indicador, a diferencia de lo que ocurre con la mina RENO en donde los mejores desempeños se obtuvieron con un valor de $\xi = 0$ en todos los casos.

5.2.2 Validación

En la Tabla 5.8 se muestran las métricas de desempeño para el indicador tasa genérica de momento sísmico durante el período de validación. Se observa que para la banda poblacional y proporcional se obtiene un desempeño global peor que aleatorio (PSS negativo), mientras que con la banda auto-poblacional se tiene un desempeño aleatorio. El detalle de la matriz de contingencia se encuentra en el anexo I.

Tabla 5.8. Métricas de desempeño por polígono y globales del indicador tasa genérica de momento sísmico para las diferentes bandas durante el período de validación. Mina RENO.

Período	Polígono	Banda								
		Poblacional			Auto-poblacional			Proporcional		
		TPR	FPR	PSS	TPR	FPR	PSS	TPR	FPR	PSS
Validación 1	1	0,63	0,75	-0,13	0,10	0,34	-0,24	0,60	0,58	0,01
	2	0,52	0,76	-0,23	0,40	0,33	0,07	0,76	0,58	0,18
	3	-	0,77	-	-	0,30	-	-	0,66	-
	4	0,74	0,75	-0,01	0,33	0,30	0,03	0,52	0,54	-0,02
Global 1		0,66	0,76	-0,10	0,30	0,32	-0,02	0,60	0,59	0,01
Validación 2	1	0,74	0,72	0,03	0,26	0,35	-0,08	0,53	0,66	-0,13
	2	0,90	0,74	0,16	0,75	0,38	0,37	0,78	0,73	0,05
	3	-	0,75	-	-	0,28	-	-	0,74	-
	4	1,00	0,76	0,24	0,00	0,32	-0,32	0,44	0,64	-0,20
	5	-	0,75	-	-	0,38	-	-	0,78	-
	6	0,94	0,77	0,17	0,62	0,27	0,35	0,85	0,72	0,13
	7	1,00	0,76	0,25	0,00	0,29	-0,29	1,00	0,82	0,18
Global 2		0,84	0,75	0,09	0,40	0,32	0,08	0,66	0,73	-0,07
Global		0,71	0,75	-0,04	0,33	0,32	0,01	0,62	0,67	-0,05

Para el caso de la mina Creighton, en la Tabla 5.9 se muestran los resultados del período de validación para cada una de las bandas, utilizando el valor de ξ y los percentiles óptimos definidos en el período de calibración.

Tabla 5.9. Matriz de contingencia para cada banda del indicador tasa genérica de momento sísmico. Período de validación. Mina Creighton.

Banda	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Poblacional	1014	7957	573	3031	0,64	0,72	-0,09	-0,03
Auto-poblacional	320	1935	1267	9053	0,20	0,18	0,03	0,02
Proporcional	857	6606	730	4382	0,54	0,60	-0,06	-0,02

Para el período de validación es la banda auto-poblacional la que posee un mejor desempeño coincidente con lo obtenido en RENO, además, en ambos casos, se tienen valores de PSS negativos y con el mejor desempeño calificado como aleatorio.

5.3 Aglomeramiento espacial

5.3.1 Calibración

Para el indicador de aglomeramiento espacial se varía su dimensión utilizando valores de $D^* = \{50, 75, 100, 125, 150, 175, 200\}$. Para este indicador corresponde definir ventanas de eventos, para lo cual se utilizó $k_1 = 25$ y $k_2 = 125$, basados en el número de eventos promedio que ocurren diariamente y semanalmente durante el periodo de calibración, respectivamente.

En la Figura 5.7 se muestran los gráficos ROC para las diferentes bandas al variar el valor de D^* . Se observa que el desempeño del indicador es aleatorio, independiente de la banda seleccionada. Los óptimos globales (PSS máximos) con el valor de D^* correspondiente a cada banda y los percentiles óptimos, se encuentran en la Tabla 5.10. El detalle de las matrices de contingencia se encuentra en el anexo J.

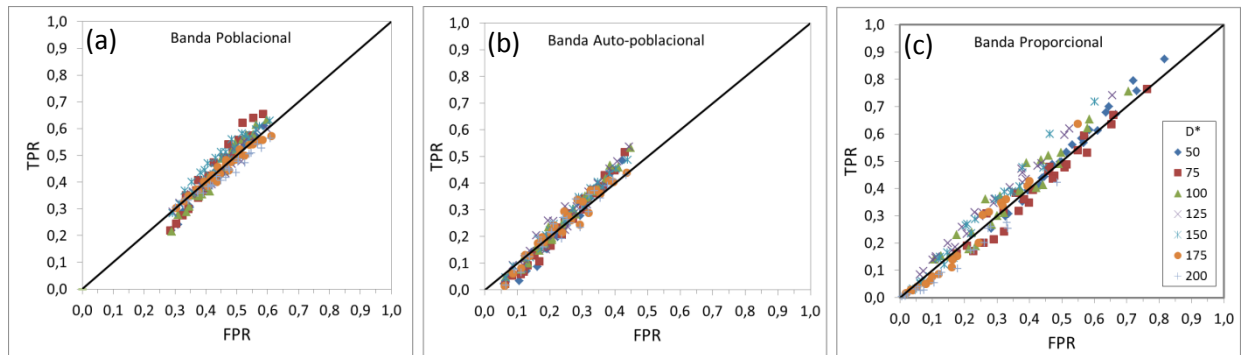


Figura 5.7. Gráficos ROC utilizando la banda (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional para los diferentes valores de D^* . Período de calibración. Mina RENO.

Tabla 5.10. Percentiles y dimensión de agrupamiento (D^*) que maximizan el desempeño global (PSS) del indicador aglomeramiento espacial para cada una de las bandas. Periodo de calibración. Mina RENO.

Banda	D^* [m]	ub	lb	PSS
Poblacional	75	0,90	0,20	0,10
Auto-poblacional	125	0,90	0,15	0,09
Proporcional	150	0,20	0,10	0,14

En la Figura 5.8 y Tabla 5.11 se muestran los resultados para la mina Creighton. El mejor desempeño se obtiene para la banda proporcional con un PSS = 0,11.

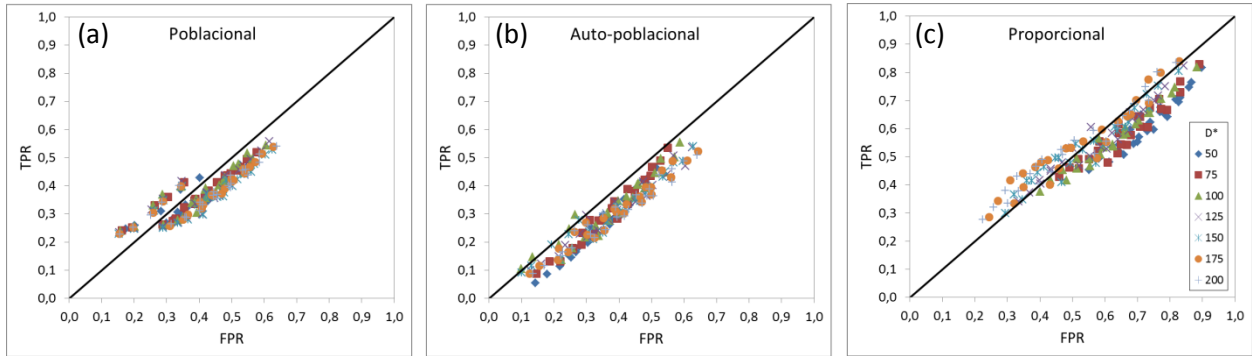


Figura 5.8. Gráficos ROC indicador aglomeramiento espacial con diferentes valores de D^* para las bandas (a) poblacional, (b) auto-poblacional y (c) proporcional. Período de calibración. Mina Creighton.

Tabla 5.11. Parámetros óptimos del indicador aglomeramiento espacial para las distintas bandas. Período de calibración. Mina Creighton.

Banda	D^*	ub	lb	PSS máximo
Poblacional	100	0,85	0,02	0,08
Auto-poblacional	100	0,8	0,02	0,03
Proporcional	175	0,3	0,5	0,11

El detalle de las matrices de contingencia se encuentra en el anexo K.

5.3.2 Validación

En la Tabla 5.12 se muestran las métricas de desempeño para el indicador aglomeramiento espacial en el período de validación. Los valores de PSS son similares a los obtenidos en el período de calibración y mejores que los mostrados con el indicador tasa genérica de momento sísmico (Tabla 5.8), sin embargo el desempeño del indicador sigue siendo aleatorio. El detalle de la matriz de contingencia para este indicador se muestra en el anexo L.

Tabla 5.12. Métricas de desempeño por polígono y globales del indicador aglomeramiento espacial para las diferentes bandas durante el período de validación. Mina RENO.

Polígono	Banda								
	Poblacional			Auto-poblacional			Proporcional		
	TPR	FPR	PSS	TPR	FPR	PSS	TPR	FPR	PSS
1	0,44	0,51	-0,07	0,47	0,41	0,06	0,45	0,52	-0,06
2	0,71	0,51	0,20	0,70	0,40	0,30	0,63	0,53	0,10
3	-	0,52	-	-	0,34	-	-	0,52	-
4	0,59	0,56	0,03	0,35	0,33	0,01	0,42	0,54	-0,12
Global 1	0,59	0,52	0,07	0,46	0,37	0,09	0,48	0,52	-0,05
1	0,42	0,43	-0,01	0,38	0,33	0,05	0,44	0,54	-0,09
2	0,55	0,37	0,18	0,59	0,35	0,24	0,63	0,54	0,09
3	-	0,61	-	-	0,38	-	-	0,67	-
4	0,00	0,43	-0,43	0,00	0,30	-0,30	0,72	0,55	0,17
5	-	0,43	-	-	0,33	-	-	0,57	-
6	0,79	0,70	0,08	0,42	0,34	0,08	0,54	0,49	0,06
7	1,00	0,53	0,47	1,00	0,40	0,60	1,00	0,53	0,47
Global 2	0,52	0,50	0,02	0,44	0,35	0,10	0,54	0,55	-0,01
Global	0,43	0,36	0,08	0,57	0,51	0,06	0,46	0,36	0,10

Para la mina Creighton, en el período de validación, el mejor resultado se obtiene, por un leve margen, con la banda poblacional, resultando incluso la banda proporcional con un valor de PSS negativo (Tabla 5.13).

Tabla 5.13. Matriz de contingencia para cada banda del indicador aglomeramiento espacial. Período de validación. Mina Creighton.

Banda	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS
Poblacional	459	2197	1103	6993	0,29	0,24	0,05
Auto-poblacional	357	1678	1205	7512	0,23	0,18	0,05
Proporcional	749	4458	813	4732	0,48	0,49	-0,01

5.4 Indicador probabilístico

5.4.1 Calibración

En la Figura 5.9 se muestra el comportamiento del indicador probabilístico para los 4 polígonos de la mina RENO correspondientes al período de calibración. Notar los bajos valores de probabilidad en cada uno de los polígonos.

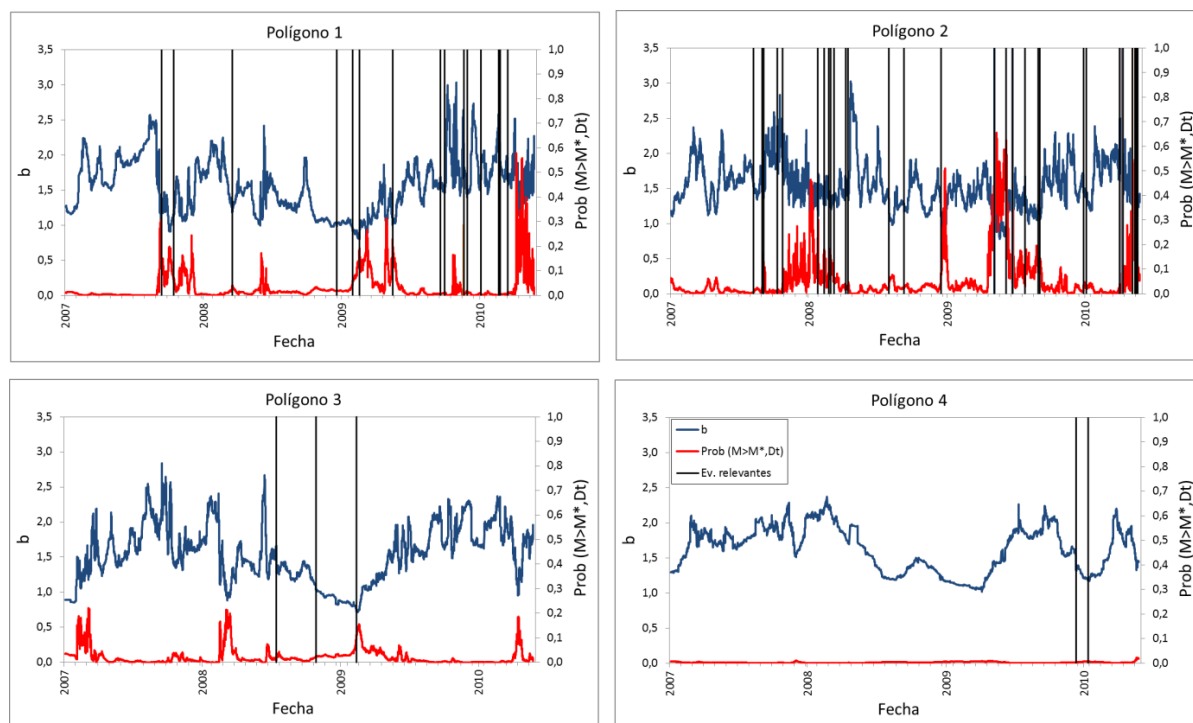


Figura 5.9. Comportamiento del indicador probabilístico para el período de calibración (01-01-2007 al 25-05-2010).

Por inspección, se definieron 7 niveles de probabilidad de corte (p^*), en la que se define un estado de alerta para aquellos valores del indicador que superen dicha probabilidad. Los valores de p^* elegidos para realizar la calibración fueron 1%; 2,5%; 5%; 7,5%; 10%; 15% y 20%.

El desempeño obtenido por el indicador se muestra en la Figura 5.10 en la que se indican además la variación de TPR, FPR y PSS para cada valor de p^*

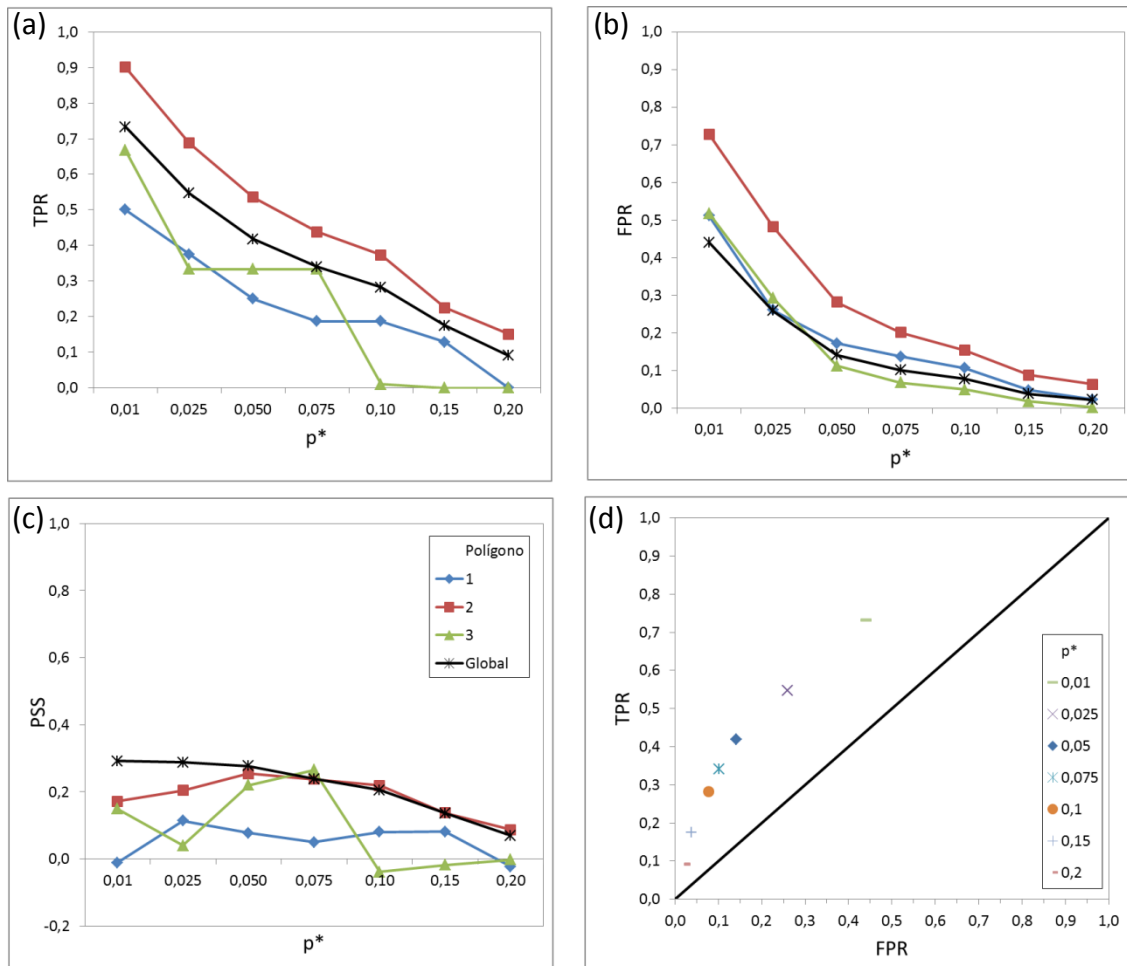


Figura 5.10. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función de la probabilidad de corte. El valor global en los 3 gráficos anteriores corresponde a las métricas obtenidas al sumar las matrices de contingencia de los 4 polígonos. El polígono 4 no se muestra en los gráficos ya que el valor del indicador es básicamente cero durante todo el período (ver Figura 5.9). (d) Gráfico ROC para los valores de probabilidad de corte.

De la Figura 5.10d se observa un escenario como el descrito por Fawcett (2005) en el que se tiene un caso conservador ($p^* = 2,5\%$) y uno liberal ($p^* = 1\%$). La diferencia entre los valores de PSS en ambos casos es de 0,288 y 0,292 siendo una diferencia menor al 1%. Dado lo anterior, se considerará un valor de $p^* = 2,5\%$.

Este mismo procedimiento se realizó para la mina Creighton. La Figura 5.11 muestra el comportamiento del indicador durante el año 2008. A partir de ahí se definieron los valores de p^* , lo cuales coincidieron con los elegidos para RENO.

El desempeño del indicador se muestra en el gráfico ROC de la Figura 5.12. Notar que el comportamiento obtenido es muy similar al de la mina RENO.

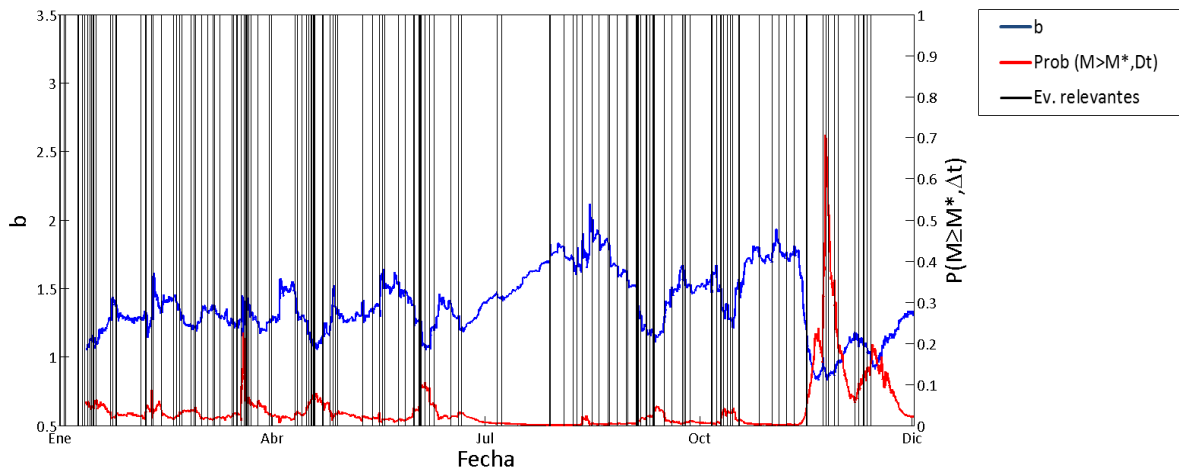


Figura 5.11. Comportamiento del indicador probabilístico y del parámetro b de Gutenberg-Richter en la mina Creighton durante el período 2008. Durante ese año se registraron 175 eventos de magnitud relevante ($M_{rel} \geq 0,5$)

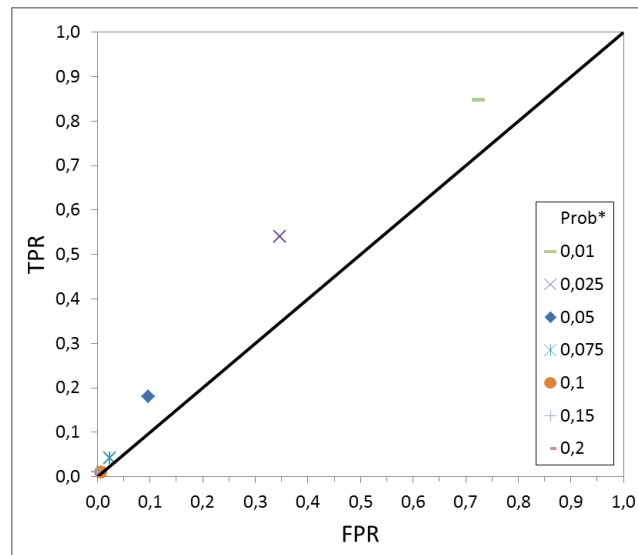


Figura 5.12. Gráfico ROC al variar la probabilidad de corte para el período de calibración. Mina Creighton.

En este caso, el mejor desempeño se obtuvo para un valor de $p^* = 2,5\%$ con un $PSS = 0,19$, que corresponde al mismo valor de p^* obtenido para la mina RENO pero con un PSS menor.

5.4.2 Validación

En la Tabla 5.14 se muestra la matriz de contingencia para el período de validación. En el anexo M se encuentran los gráficos con el comportamiento del indicador probabilístico para este período de análisis.

Tabla 5.14. Matriz de contingencia por polígono y globales del indicador probabilístico para el período de validación.

Período	Polígono	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS
Validación 1	1	261	27	28276	3593	0,91	0,89	0,02
	2	379	69	28262	3428	0,85	0,89	-0,05
	3	0	0	17241	14908	--	0,54	--
	4	870	0	30751	519	1,00	0,98	0,02
Global 1		1510	96	104530	22448	0,94	0,82	0,12
Validación 2	1	301	0	20844	2851	1,00	0,88	0,12
	2	70	26	13309	10561	0,73	0,56	0,17
	3	0	0	0	23943	--	0,00	--
	4	0	32	5738	18226	0,00	0,24	-0,24
	5	0	0	6636	17342	--	0,28	--
	6	32	85	1981	2825	0,27	0,08	0,19
	7	0	0	0	23497	--	0,00	--
Global 2		403	143	48508	118245	0,74	0,29	0,45
Global		1913	239	153038	140693	0,89	0,52	0,37

El PSS global para el período de validación (0,37) es superior al de calibración (0,29), sin embargo, la validación 1, correspondiente a los mismos polígonos definidos para la calibración, presenta un PSS mucho menor que en la validación 2.

Por otra parte, para el período de validación en la mina Creighton se obtuvo un valor de PSS = 0,01. Es resultado es comparable con lo mostrado en la Tabla 5.14, durante el período de validación 1.

5.5 Resumen del desempeño de los indicadores sísmicos

En la Tabla 5.15 se muestra un resumen con los parámetros óptimos seleccionados y el valor de PSS obtenido para cada indicador en el período de calibración. Con dichos parámetros se procedió a calcular el desempeño para el período de validación. En la Figura 5.13 y en la Tabla 5.16 se resumen estos resultados para la Mina RENO y Creighton.

Tabla 5.15. Matriz de contingencia global para los parámetros óptimos y los valores de PSS de cada indicador obtenidos en el período de calibración.

Indicador	Mina RENO			Mina Creighton				
	Parámetros	TPR	FPR	PSS	Parámetros	TPR	FPR	PSS
CFE	ub=0,95 ; lb=0,02	0,34	0,21	0,14	ub = 0,8 ; lb = 0,15	0,64	0,60	0,04
Probabilístico	p*=2,5%	0,55	0,26	0,29	p* = 2,5%	0,54	0,35	0,19
Tasa genérica	Banda Poblacional $\xi=0$ ub=0,95 ; lb=0,15	0,84	0,76	0,08	Banda Poblacional $\xi= 0,5$ ub = 0,90 ; lb = 0,05	0,82	0,73	0,09
Aglomeramiento espacial	Banda Proporcional D*=70 - 150 ub=0,2 ; lb=0,1	0,60	0,46	0,14	Banda Proporcional D* = 175 ub = 0,3 ; lb = 0,5	0,42	0,31	0,11

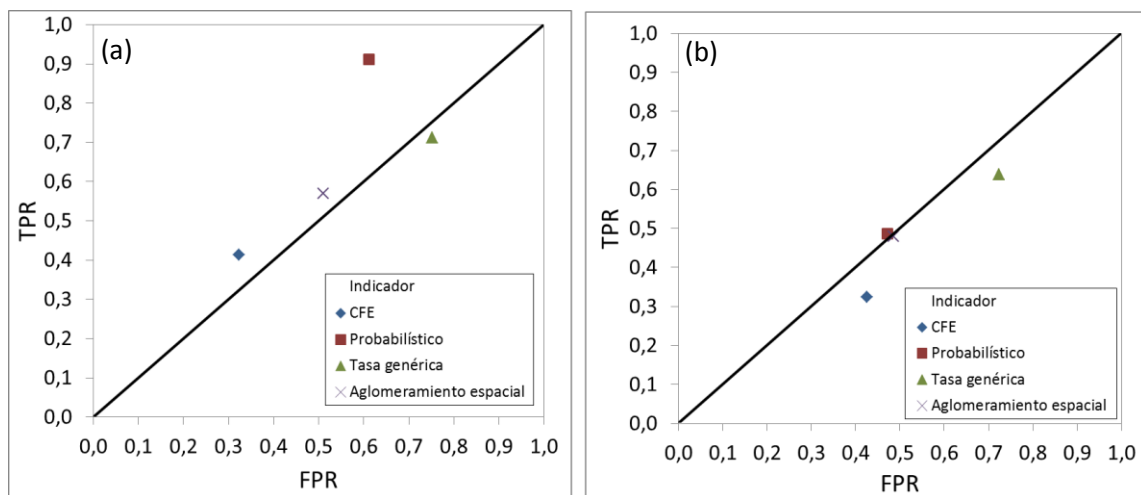


Figura 5.13. Gráfico ROC con los mejores desempeños de cada indicador. Período de validación. (a) RENO y (b) Creighton.

Tabla 5.16. Matriz de contingencia para los mejores desempeños de cada indicador durante el período de validación.

Mina RENO								
Indicador	Parámetros	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS
CFE	ub=0,95 ; lb=0,02	934	92712	1324	193985	0,41	0,32	0,09
Tasa genérica	Banda Poblacional $\xi=0$ ub=0,95 ; lb=0,15	1586	221433	643	72989	0,71	0,75	-0,04
Aglomeramiento espacial	Banda Proporcional $D^*=70 - 150$ ub=0,2 ; lb=0,1	1108	159331	1121	135091	0,50	0,54	-0,04
Probabilístico	$p^*=2,5\%$	1913	239	153038	140693	0,89	0,52	0,37

Mina Creighton								
Indicador	Parámetro	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS
CFE	ub = 0,8 ; lb = 0,05	515	4684	1072	6304	0,32	0,43	-0,10
Tasa genérica	Banda Poblacional $\xi = 0,5$ ub = 0,9 ; lb = 0,05	1014	7957	573	3031	0,64	0,72	-0,09
Aglomeramiento espacial	Banda Proporcional $D^* = 175$ ub = 0,3 ; lb = 0,5	749	4458	813	4732	0,48	0,49	-0,01
Probabilístico	$p^* = 2,5\%$	560	4491	593	5041	0,49	0,47	0,01

Para el caso de la mina RENO, el mejor desempeño se logra con el indicador probabilístico, con un PSS de 0,37 (con una tasa de falsas alarmas de 0,52), muy por sobre el CFE que posee un valor de PSS de 0,09.

Igualmente, para la mina Creighton, el mejor desempeño es obtenido por el indicador probabilístico con un PSS = 0,01, muy inferior a lo obtenido en la mina RENO.

En general, los resultados pueden resumirse como sigue:

- El CFE para ambas minas presenta un comportamiento mejor que aleatorio durante el período de calibración. Para el período de validación los valores de PSS disminuyen a valores cercanos a cero, resultando en un comportamiento aleatorio.
- El indicador probabilístico es el que presenta el mejor desempeño tanto para la mina RENO como para Creighton. Además, en el caso de la mina RENO, es el único indicador en el que durante el período de validación el valor de PSS. Para la mina Creighton el valor del PSS pasa de 0,19 en la calibración a 0,01 en la validación.

- En el caso de la tasa genérica de momento sísmico el valor del PSS para ambas minas indica un desempeño aleatorio en el período de calibración y peor que aleatorio en el período de validación. Además, en este indicador se presentan las tasas de falsas alarmas más altas.
- Por último, para el indicador aglomeramiento espacial se obtiene el mismo valor de PSS que el CFE para la mina RENO y es el segundo con mejor desempeño en la mina Creighton durante el período de calibración, mientras que en el período de validación, para ambas minas, el comportamiento pasa a ser entre aleatorio y peor que aleatorio.

6. Análisis y discusiones

6.1 Efecto de la aplicación de los filtros

6.1.1 Filtro por error de localización

Dentro de la metodología desarrollada se utilizó un filtro por error de localización del hipocentro (ver sección 4.3.1), el que consiste en solo utilizar un conjunto de datos que posean un error de localización menor a cierto valor determinado, que en el caso de la Mina RENO son 40 metros y en la Mina Creighton, 50 [m].

En la Figura 6.1 se muestran los gráficos ROC para el período de calibración de los indicadores CFE y probabilístico para la Mina RENO (Figura 6.1a y b) y Creighton (Figura 6.1c y d). En el caso del indicador CFE se muestra el gráfico ROC correspondiente al variar los percentiles de la distribución de Poisson y en el caso del indicador probabilístico se muestra la variación de p^* .

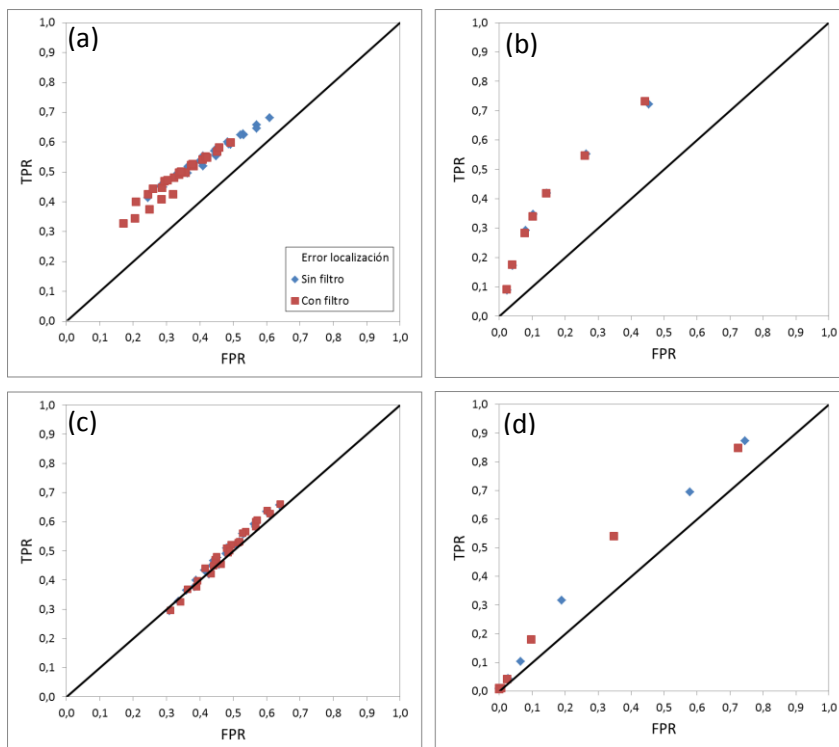


Figura 6.1. Comparación de desempeños para (a) CFE e (b) indicador probabilístico con y sin filtro por error de localización del hipocentro para la Mina RENO. De igual forma con los indicadores (c) CFE y (d) probabilístico para la Mina Creighton. Período de calibración.

Se observa que en todos los casos, excepto para el indicador probabilístico con los datos de la mina RENO, el indicador mejora el desempeño al aplicar el filtro, comprobándose que el filtrado resulta en una buena práctica previo al trabajo con los datos. En la Tabla 6.1 se muestran los valores de PSS en cada caso considerando los óptimos globales de cada caso.

Tabla 6.1. Valores de PSS para el CFE e indicador probabilístico para la Mina RENO y Creighton con y sin filtro por error de localización del hipocentro. Período de calibración.

Mina	Indicador	PSS con filtro	PSS sin filtro
RENO	CFE	0,19	0,17
	Probabilístico	0,29	0,29
Creighton	CFE	0,04	0,03
	Probabilístico	0,19	0,13

6.1.2 Filtro por M_{min}

Al evaluar la sensibilidad de la red sísmica, se considera la limitación que se tiene al obtener inicialmente los datos con la red de monitoreo, afectando directamente en el posterior desempeño de los indicadores. Al observar la Figura 5.4d se tiene que entre mayor la sensibilidad de la red (es decir, con un menor valor de M_{min}), mejor el desempeño de indicador. Luego, al no considerar este filtro se está asumiendo que la red sísmica es capaz de detectar de manera fidedigna toda la micro-sismicidad, o, dicho de otro modo, se tendría una sensibilidad infinita. Sin embargo, al considerar el valor de M_{min} , se obtienen desempeños más bajos, pero un conjunto de datos uniforme y congruentes con la sensibilidad del sistema de monitoreo, garantizando así que los resultados no corresponden a un artefacto debido a la toma inicial de datos.

Otro punto a destacar es que el desempeño del indicador, debido solo al aumento de sensibilidad de la red, mejora hasta un cierto valor límite. Como se puede apreciar en la Figura 5.4d una vez que se alcanza el valor de $M_{min} = -1,5$, el PSS no varía mayormente al aumentar más la sensibilidad, alcanzándose un valor máximo de 0,31.

6.2 Criterio de frecuencia de eventos

Uno de los principales inconvenientes del CFE es el supuesto de que la micro-sismicidad sigue una distribución de Poisson en el tiempo, es decir, que los eventos sísmicos producidos por la minería poseen un comportamiento independiente unos de otros y de manera uniforme en el tiempo. No existen investigaciones en las que esto se compruebe para la sismicidad inducida en general. Aún a escala tectónica, la discusión no está cerrada; existen investigaciones (Gardner y Knopoff, 1974; Michael-Leiba, 1987) en los que se comprueba que la sismicidad (excluyendo las réplicas) se distribuye de manera Poisson y, por el contrario, hay autores (Ferraes, 1967; Smalley et al., 1987; Stark y Luen, 2010) que muestran que la sismicidad no se distribuye de manera Poisson y, más aún, podría depender de la zona de estudio utilizada (Anagnos y Kiremidjian, 1988).

Dentro de otras desventajas o factores a mejorar en el CFE están:

- La selección de los percentiles de la función de probabilidad de Poisson que definen la banda sísmica no está formalizado, por lo que es necesario calibrar los valores de los percentiles de acuerdo a los datos que se tengan.
- La media diaria (curva roja Figura 6.2a) puede fácilmente presentar un comportamiento sobre el límite superior que sobrepasa al percentil 99,999% de la función de probabilidad de Poisson. Esto se ilustra mediante la línea punteada indicada en la Figura 6.2a, donde el percentil 99,999% de la función de probabilidad de Poisson para la media de 32 es de 59, mientras que la media diaria es de aproximadamente 85. La implicancia es que sobre el límite superior o inferior no es posible cuantificar que tan significativa es la alerta sísmica.

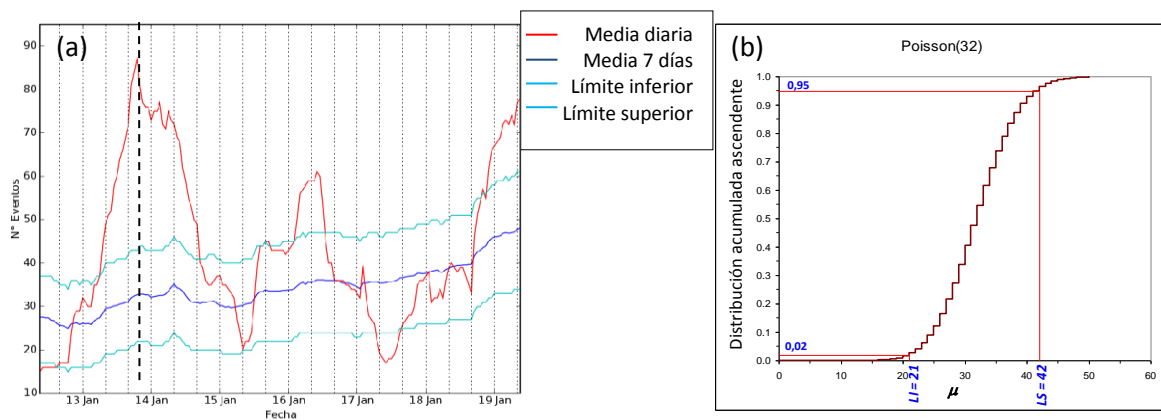


Figura 6.2. Indicador frecuencia de eventos (a) Comparación media diaria con banda de Poisson a 7 días. (b) Ejemplo de determinación del límite inferior (*LI*) y superior (*LS*) mediante la distribución acumulada de Poisson para una media de 32 eventos/día.

Dentro de las ventajas que se pueden encontrar del protocolo actual se encuentran:

- Queda caracterizado solo por el parámetro tasa de frecuencia de eventos $\mu_{\Delta t}$.
- Al utilizar un periodo de tiempo Δt pequeño los efectos de cambios de sensibilidad de la red sísmica juegan un rol poco significativo.
- Existe un estado de alerta “por alta”, debido a una tasa de sismicidad mayor a la “normal” y un estado de alerta “por baja” debido a lo contrario dada la definición de una banda superior e inferior. Esta ventaja es importante ya que un excesivo período de tiempo sin sismicidad puede producir una liberación de energía repentina en un estallido de roca.

6.3 Tasa genérica y aglomeramiento espacial

6.3.1 Datos sesgados al indicador CFE

Los mejores desempeños obtenidos con el indicador tasa genérica de momento sísmico (Figura 5.5), para las distintas bandas, resultaron con un valor de $\xi = 0$ en el caso de la Mina RENO, mientras que en el caso de la Mina Creighton, el mejor desempeño se obtuvo con $\xi = 0,5$ para la banda poblacional, $\xi = 1$ para la banda auto-poblacional y $\xi = 0$ para la proporcional.

Como fue mencionado en la sección 5.1, en la Mina RENO se utiliza como indicador sísmico el CFE o, equivalentemente, la tasa genérica de momento sísmico con $\xi = 0$. El indicador al encontrarse en un estado de alarma, se modifica la minería con tal de llevar la sismicidad a un estado normal (dentro de las bandas), por lo que no es extraño que en el caso de la Mina RENO los mejores resultados se hayan obtenido con $\xi = 0$ ya que los datos están sesgados a la minería realizada. Por otra parte, en la Mina Creighton no ocurre esto ya que no se toman medidas de control, en lo que a minería se refiere, en caso de que el indicador sísmico utilizado supere los niveles de control, con lo que los datos de sismicidad son efectivamente respuestas al proceso minero.

Es importante tener presente lo anterior ya que el hecho de que el desempeño obtenido en la mina RENO con el indicador CFE haya sido mejor que con el indicador tasa genérica, puede estar influenciado a este sesgo. Sin embargo el momento sísmico entrega valiosa información que puede ser aprovechada, otorgando mejores resultados que en el caso de $\xi = 0$, como en el caso de la Mina Creighton que, dentro de los bajos desempeños obtenidos por los indicadores CFE y tasa genérica, con este último se obtuvo un mejor resultado.

6.3.2 Selección de las bandas

Una de las principales dificultades para evaluar el desempeño de los indicadores tasa genérica y aglomeramiento espacial fue la selección de las bandas a utilizar para poder definir los estados de alerta. Para tratar de mejorar el desempeño de estos indicadores se propone lo siguiente:

- En el caso del aglomeramiento espacial se podrían definir, al igual que en el indicador probabilístico, valores umbrales de *clusterización*, por sobre los cuales se defina un estado de alerta, con lo que se evitaría el problema de definir bandas.
- Para el indicador tasa genérica, se puede ajustar una distribución teórica asociada a los momentos sísmicos que permitiría mayor rigurosidad en la selección de las bandas, pero que, por otra parte, conllevaría al ajuste de los diferentes parámetros que cada distribución posee. Más adelante en este capítulo se detallan diferentes distribuciones teóricas que ajustan de buena manera a los momentos sísmicos de los datos además de otras que son aplicadas a eventos tectónicos y que podrían, eventualmente, mejorar el desempeño de los indicadores sísmicos, en particular la tasa genérica.

La relevancia de obtener mejores desempeños con estos indicadores radica en el hecho de que ambos contienen información relevante de la micro-sismicidad generada por la minería, como lo es el momento sísmico y el aglomeramiento a diferencia, por ejemplo, del CFE, que corresponde básicamente a un conteo de eventos durante un período de tiempo.

6.4 Indicador Probabilístico

6.4.1 Efecto de los parámetros de la ecuación de Benjamin

Los bajos valores de p^* responden al comportamiento del indicador tanto en la mina RENO, para los diferentes polígonos, como en la mina Creighton. Estos bajos valores de probabilidad están asociados a altos valores de t_r , es decir, bajas tasas de sismicidad (Figura 6.3). Debido a esto es que este indicador no es aplicable para definir un estado de alerta “por baja” como en el caso del CFE. Aun así, de todos los indicadores estudiados, el probabilístico es el con mejor desempeño para ambas minas.

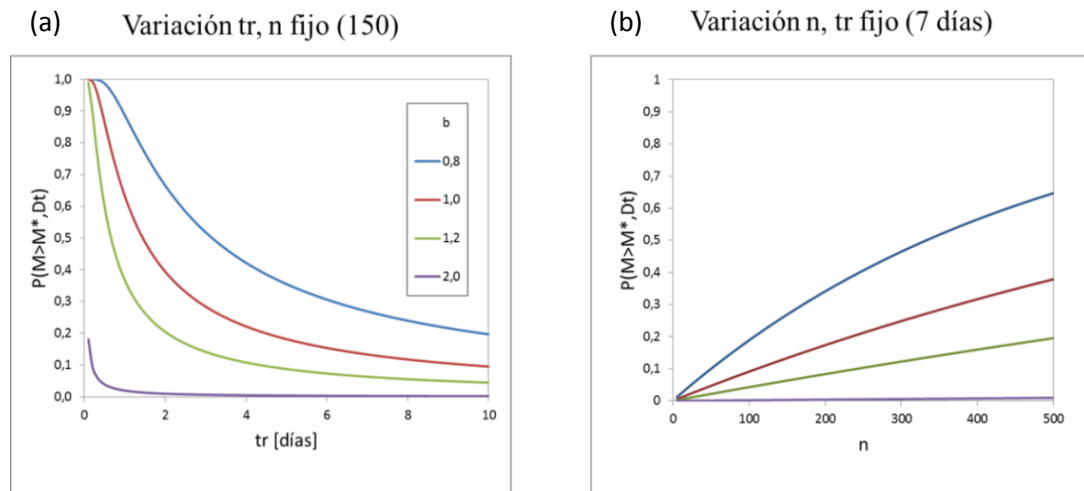


Figura 6.3. Variación del indicador probabilístico para distintos valores de b en función de (a) t_r con n fijo (150 eventos) y (b) n con t_r fijo (7 días). $M_c = -1$ y $\Delta t = 8$ horas.

6.4.2 Re-calibración período de validación

En la figura del anexo M se observan valores de probabilidad mayores a aquellos obtenidos en el período de calibración. Debido a esto se procedió a re-calibrar el valor de p^* para el período de validación. En la Tabla 6.2 se muestra la matriz de contingencia global y por período de la re-calibración. Los valores de p^* utilizados se indican en la misma tabla. En la Figura 6.4 se muestra una comparación entre estos resultados y los obtenidos inicialmente.

Tabla 6.2. Matriz de contingencia al re-calibrar el indicador probabilístico con diferentes valores de p^* a los utilizados en el período de calibración original. En rojo se muestran los resultados con el valor máximo de PSS por período y en el global.

Período	p^*	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	0,05	1289	317	71161	55817	0,80	0,56	0,24	0,01
	0,07	1204	402	54725	72253	0,75	0,43	0,32	0,02
	0,10	904	702	39025	87953	0,56	0,31	0,26	0,02
	0,13	676	930	28280	98698	0,42	0,22	0,20	0,02
	0,15	606	1000	24225	102753	0,38	0,19	0,19	0,02
	0,20	525	1081	16710	110268	0,33	0,13	0,20	0,03
Validación 2	0,05	332	214	28419	138334	0,61	0,17	0,44	0,02
	0,07	295	251	21675	145078	0,54	0,13	0,41	0,02
	0,10	200	346	15749	151004	0,37	0,09	0,27	0,02
	0,13	133	413	11248	155505	0,24	0,07	0,18	0,02
	0,15	97	449	8653	158100	0,18	0,05	0,13	0,01
	0,20	57	489	4801	161952	0,10	0,03	0,08	0,02
Global	0,05	1621	531	99580	194151	0,75	0,34	0,41	0,02
	0,07	1499	653	76400	217331	0,70	0,26	0,44	0,02
	0,10	1104	1048	54774	238957	0,51	0,19	0,33	0,02
	0,13	809	1343	39528	254203	0,38	0,13	0,24	0,02
	0,15	703	1449	32878	260853	0,33	0,11	0,21	0,03
	0,20	582	1570	21511	272220	0,27	0,07	0,20	0,04

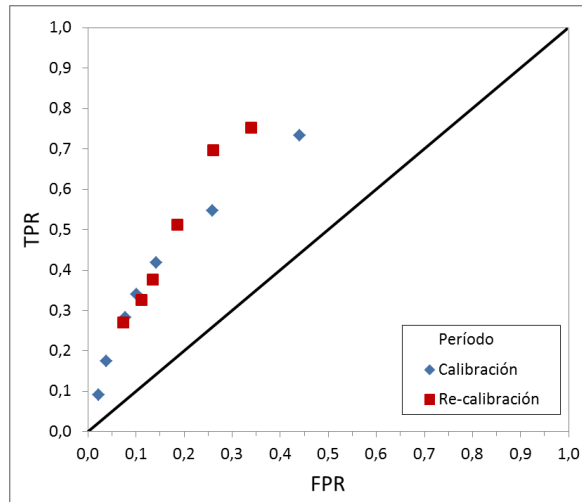


Figura 6.4. Comparación entre los resultados globales obtenidos en la calibración y re-calibración del indicador probabilístico. Mina RENO.

De lo anterior se observa lo siguiente:

- Con un valor de $p^* = 7\%$ se obtiene un mejor desempeño ($PSS = 0,44$) que en el caso de la calibración original ($PSS = 0,29$).
- El desempeño en el período de validación 1 en la re-calibración mejora sustancialmente ($PSS = 0,32$) con respecto al período de calibración original ($PSS = 0,12$). Mientras que el desempeño durante el período de validación 2 disminuye levemente de 0,45 a 0,44. En el global el desempeño mejora con un valor de $PSS = 0,44$ a diferencia del período de validación original con un valor de $PSS = 0,37$.

Dado que los niveles de probabilidad se ven afectados directamente por la cantidad de eventos micro-sísmicos ocurridos (sección 6.4.1), una buena práctica sería ir ajustando la probabilidad umbral p^* con la que se determina un estado de alerta.

6.4.3 Parámetro b como indicador sísmico

Uno de los parámetros involucrados en el indicador probabilístico es el parámetro b de la relación Gutenberg-Richter (sección 2.2.4), el cual, como se observa en la Figura 6.3 tiene una relación inversa con el valor de la probabilidad obtenida, es decir, a mayor valor de b, menor es el valor del indicador. Esto en directa relación con lo que el valor de b representa como parámetro de riesgo sísmico (ver Figura 2.1). Por lo anterior, se decidió estudiar el desempeño de b como indicador.

En la Tabla 6.3 se muestra la matriz de contingencia con los valores de b* considerados como umbrales, basado en los resultados mostrados en la Figura 5.9. En la Figura 6.5 se muestra el equivalente a la Figura 5.10, con la variación de TPR, FPR y PSS en función del valor de b*, además del gráfico ROC del indicador.

El comportamiento de las métricas de desempeño es el mismo que el obtenido con el indicador probabilístico (ver Figura 5.10), sin embargo el desempeño es completamente opuesto a lo obtenido en dicho indicador (ver Figura 5.10d), con resultados peor que aleatorio en todos los casos.

Tabla 6.3. Matriz de contingencia utilizando el parámetro b como indicador sísmico.

b*	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
1	1570	128	451706	22390	0,92	0,95	-0,03	0,00
1,3	996	702	350180	123916	0,59	0,74	-0,15	0,00
1,5	640	1058	260750	213346	0,38	0,55	-0,17	0,00
1,7	335	1363	167289	306807	0,20	0,35	-0,16	0,00
2,0	188	1510	59899	414197	0,11	0,13	-0,02	0,00

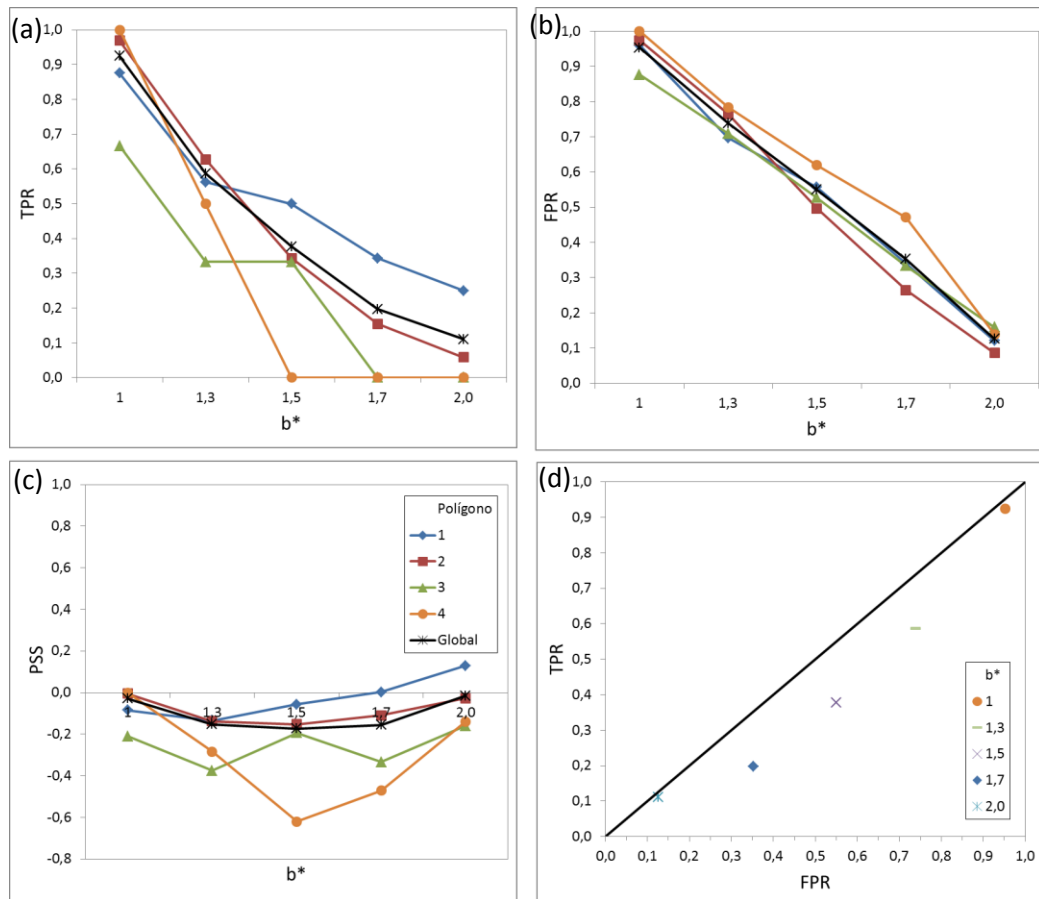


Figura 6.5. Variación de (a) TPR, (b) FPR y (c) PSS en función del valor de b^* . El valor global en los 3 gráficos anteriores corresponde a las métricas obtenidas al sumar las matrices de contingencia de los 4 polígonos. (d) Gráfico ROC para los valores de b^* .

6.5 Ajuste de una distribución teórica a la distribución de momentos sísmicos

Si bien es aceptado que la distribución en el tiempo de la sismicidad inducida puede ser asociada a un proceso aleatorio de Poisson (Vallejos et al., 2012), esta distribución no es aplicable al considerar los momentos sísmicos, como se señaló en la sección 2.2.2.

En trabajos de Kagan (1999; 2002) se describen variaciones de la ley de Gutenberg-Richter para analizar la distribución de momentos en sismos tectónicos a diferentes profundidades. Para esto, Kagan (2002) describe 3 requerimientos necesarios para la elaboración de las distribuciones, los cuales son:

- Invarianza de escala, es decir, que las distribuciones sean aplicables para diferentes órdenes de magnitud del problema.
- Que la distribución no posea más de 2 grados de libertad.
- La distribución no puede tener un límite superior truncado abruptamente.

La descripción en detalle de cada uno de los requerimientos se encuentra descrita por Kagan (2002). En la Figura 6.6 se ejemplifican las distintas curvas teóricas descritas por el autor que ajustan a la distribución de momento sísmico.

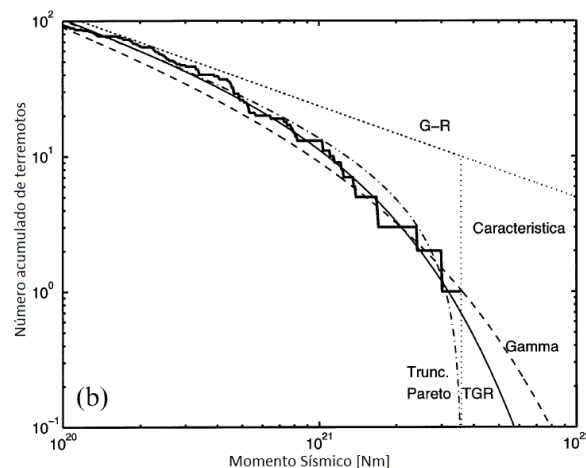


Figura 6.6. Aproximaciones de diferentes distribuciones teóricas a los datos empíricos (línea gruesa). Las curvas corresponden a: Gutenberg-Richter (G-R) y distribución característica (línea punteada), distribución gamma (línea discontinua), Gutenberg-Richter cónico (TGR o distribución de Pareto, línea sólida) y Pareto truncada (línea discontinua punteada). Notar que los valores del momento sísmico son mayores a 10^{20} Nm, lo que corresponde a sismos de gran magnitud. Figura modificada de Kagan (2002).

La elección de distribuciones teóricas de momento sísmico que ajuste de mejor manera a los datos de sismicidad inducida, podría permitir que el desempeño de los diferentes indicadores, en particular la tasa genérica de momento sísmico, mejoren su desempeño. Se esperaría, luego, que este tipo de distribuciones permita definir percentiles adecuados como umbrales para el procedimiento de alerta, con el requisito de tener que ajustar adecuadamente los parámetros que estas distribuciones requieren.

Una desventaja de la elección de distribuciones teóricas es que los parámetros que las definen no necesariamente tienen un significado físico directo, como lo es el caso de la media en la distribución de Poisson. Por lo mismo, sería necesario calibrar dichos parámetros de manera de garantizar un adecuado ajuste a los momentos sísmicos.

A continuación se detallan algunas distribuciones teóricas que dieron buenos resultados al momento de realizar el ajuste con la distribución de momento sísmico.

6.5.1 Distribución de Weibull

Se utilizó el software *@Risk* para ajustar diferentes curvas de distribución de probabilidad teóricas (Gamma, Uniforme, Gauss, Weibull, etc.) a los logaritmos de los momentos sísmicos de la mina RENO.

En la Figura 6.7a se muestra el mejor ajuste obtenido, correspondiente a la distribución de Weibull (Weibull, 1951) y en la Figura 6.7b el gráfico cuantil versus cuantil.

La distribución de Weibull se define como:

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^\alpha} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

con $\alpha > 0$ como el parámetro de forma y $\beta > 0$ como parámetro de escala (Figura 6.8)

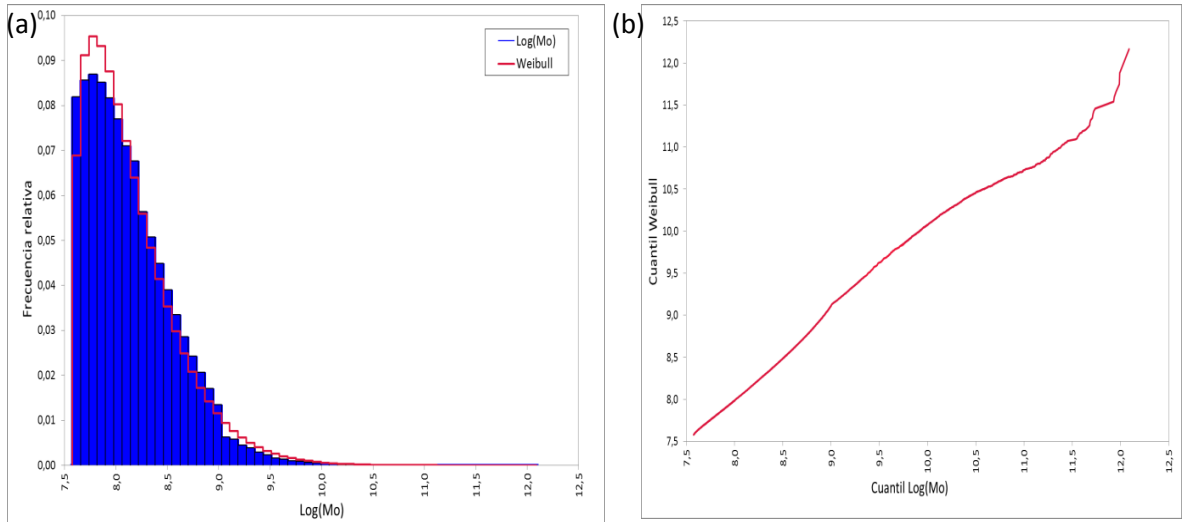


Figura 6.7. (a) Ajuste de la distribución de Weibull a los logaritmos de los momentos sísmicos para $M_w \geq -1,0$. (b) Gráfico cuantil versus cuantil de la distribución de Weibull con el logaritmo de los momentos sísmicos. Mina RENO.

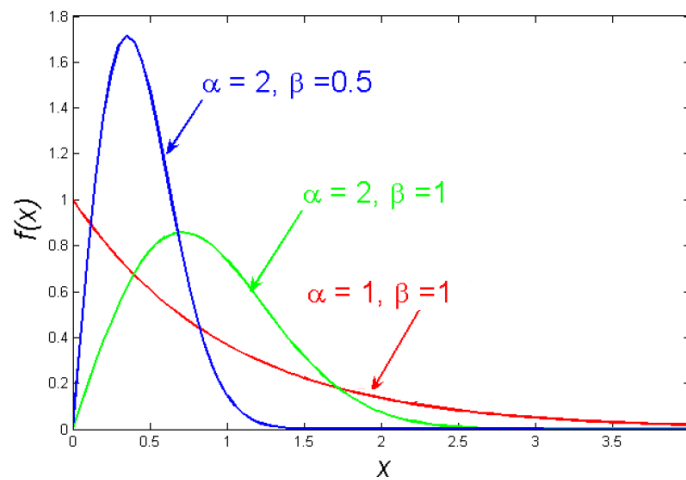


Figura 6.8. Ejemplo del efecto de los parámetros α y β en la distribución de Weibull (Modificado de Zhang, 2009)

6.5.2 Distribución de Cauchy-Lorentz

Por último se utilizó la distribución teórica de Cauchy-Lorentz. Por medio de la herramienta *Solver* de Excel y por medio de la minimización de cuadrados, se definieron los parámetros de la distribución, la cual es definida como:

$$f(x; x_0, \gamma) = \frac{1}{n} \left[\frac{\gamma}{(x - x_0)^2 + \gamma^2} \right]$$

con $x_0 \in \mathbb{R}$ como el parámetro de corrimiento y $\gamma > 0$ el parámetro de escala. Los valores resultantes fueron $x_0 = 7,92$ y $\gamma = 0,32$. En la Figura 6.9 se muestra el ajuste obtenido.

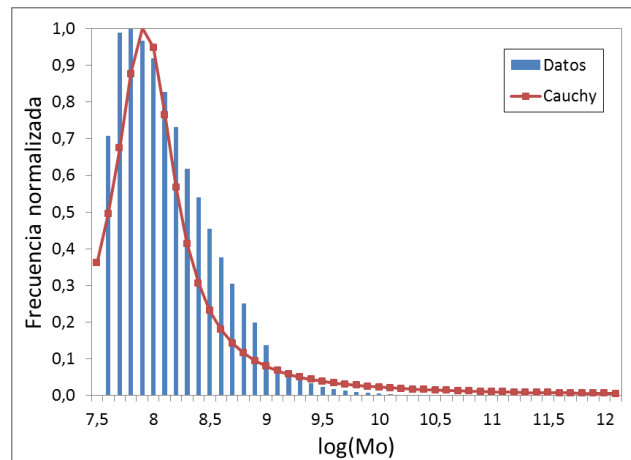


Figura 6.9. Ajuste de la distribución de Cauchy-Lorentz a los logaritmos de momentos sísmicos para $M_w \geq -1,0$. Mina RENO.

7. Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se desarrolló una metodología que permite evaluar el desempeño de indicadores sísmicos asociados a la micro-sismicidad generada por labores mineras. Dicha metodología fue aplicada a cuatro indicadores en particular para dos minas distintas: RENO de la división El Teniente de Codelco-Chile y Creighton ubicada en Canadá.

Dentro del desarrollo de la metodología se describió el correcto filtro de los datos, utilizando eventos sísmicos con una magnitud mayor a la de completitud y con un error de localización del hipocentro menor a 40 metros en el caso de la mina RENO y 50 metros para la mina Creighton. De lo anterior, fue descrito que la correcta aplicación de dichos filtros permiten obtener desempeños de los indicadores más fidedignos y coherentes con la capacidad de la red de monitoreo de registrar la micro-sismicidad de la mina en cuestión.

Cada conjunto de datos se dividió en un período de calibración y otro de validación, con el fin de obtener los parámetros que optimizaban el desempeño de cada indicador. Sin embargo se mostró que, al menos para el caso del CFE y del indicador probabilístico, los valores máximos de PSS obtenidos durante el período de calibración no corresponden a máximos globales, es decir, los parámetros seleccionados en la calibración no necesariamente maximizan el valor del PSS en el período de validación, con lo que se recomienda, especialmente en períodos de alta sismicidad, ajustar los parámetros del indicador utilizado con el fin de optimizar su desempeño en el tiempo.

En general los resultados obtenidos son levemente superiores a un desempeño aleatorio, teniendo casos, incluso, con valores de PSS negativo. El indicador que mostró un mejor desempeño en las diferentes situaciones expuestas en este trabajo fue el indicador probabilístico, llegando a alcanzar valores de $PSS = 0,44$ en la re-calibración del indicador (ver sección 6.4.2). Con esto, y en el caso de aplicarse el indicador, se propone calibrarlo cada ciertos períodos de tiempo, particularmente luego de períodos de alta sismicidad, en la que se presentarían mayor cantidad de falsas alarmas utilizando un valor de p^* muy bajo, lo que coincide con lo anteriormente explicado.

Uno de los principales factores a considerar para obtener un buen desempeño de los indicadores es la disminución en la cantidad de falsas alarmas (FP en la matriz de contingencia) que se tengan. Cada estado de alerta implicaría, en caso que así se estime conveniente, detener la producción en el sector donde esta se produce. Si la alerta corresponde finalmente a una falsa alarma, conllevaría a una pérdida innecesaria en la productividad de la mina. Dado lo anterior, para mejorar el desempeño de los indicadores se tiene que trabajar por reducir la tasa de falsas alarmas, más que, por ejemplo, aumentar la tasa de aciertos.

Cada indicador posee sus ventajas, desventajas y limitaciones, por lo que la utilización de estos no es exclusiva de solo uno sino que pueden utilizarse de manera conjunta, pudiendo entregar información adicional a la hora de definir un estado de alarma. Se propone buscar la existencia de alguna correlación entre los estados de alerta de diferentes indicadores.

Dentro de posibles trabajos futuros se encuentra aplicar distribuciones teóricas del momento sísmico para definir de mejor manera las bandas de alerta y utilizar umbrales de *clustering* (como en el caso del indicador probabilístico) para estudiar el real efecto que tendría sobre el desempeño de los indicadores tasa genérica y aglomeramiento espacial.

Realizar la evaluación del desempeño de los indicadores sísmicos a través de la metodología mostrada, permite cuantificar la efectividad que estos poseen, permitiendo tomar líneas de acción en caso que su desempeño sea deficiente y así garantizar de mejor manera la seguridad de los trabajadores y del negocio minero.

Anexo A. Definición de la dimensión de agrupamiento óptimo

Para el indicador aglomeramiento espacial se define la dimensión de agrupamiento en el cual se calculará el indicador. A continuación se detalla la metodología a utilizarse en la Mina RENO y Creighton.

La definición de D^* para la Mina RENO dependerá de si el período es de calibración o de validación. En el primer caso se varía la dimensión de agrupamiento utilizando valores de $D^* = \{50, 75, 100, 125, 150, 175, 200\}$. La elección de la dimensión óptima para el período de validación 1 se realizará promediando los valores de D^* , correspondientes a los 10 mejores valores de PSS obtenidos, para cada banda (poblacional, auto-poblacional y proporcional).

Para seleccionar la dimensión de agrupamiento para el período de validación 2, se plantea lo siguiente:

- Se calcula el área promedio de los polígonos (\bar{A}_{pol}) utilizados en el período de calibración.
- \bar{A}_{pol} puede ser representada por un círculo a través de:

$$\bar{A}_{pol} = \frac{\pi D}{4}$$

- De la ecuación anterior se determina el diámetro D del círculo equivalente.
- La dimensión de agrupamiento depende proporcionalmente del diámetro del círculo

$$k \approx \frac{D^*}{D}$$

Donde k es la constante de proporcionalidad con un valor entre 0 y 1.

- Para definir el valor de k , se calibra utilizando el valor de D^* obtenido en el período de validación 1.

La distinción en la elección de la dimensión de agrupamiento por período se debe a que si se deja fija a partir del período de calibración se podría tener un valor del indicador igual a uno permanentemente debido a la reducción de los polígonos en el período de validación 2.

Para la Mina Creighton se realizará el mismo procedimiento que en el caso del período de calibración en la Mina RENO, en donde se variará la dimensión de agrupamiento, D^* , con los valores 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200.

Anexo B. Descripción métodos mineros utilizados en Creighton

A continuación se detallan los métodos mineros que se utilizan y han sido utilizados en la Mina Creighton.

- ***Shrinkage Stopping***: es un método altamente selectivo (se extrae únicamente mineral) y de baja producción. Consiste en realizar perforaciones de manera horizontal, de abajo hacia arriba. El mineral quebrado sirve para ser utilizado como plataforma para continuar con la excavación y como soporte de las paredes (Figura B1a)
- ***Cut & Fill***: Corresponde también a un método selectivo, similar al *Shrinkage Stopping* con la particularidad de que el soporte utilizado no es el mismo material, sino que corresponde a material de relleno externo, como por ejemplo, roca de baja ley (estéril) o pasta (extraída del tranque de relave). Es un método utilizado para yacimientos de alta ley y pobre calidad de roca (Figura B1b)
- ***Vertical Crater Retreat (VCR)***: Este método fue originalmente desarrollado por la compañía canadiense INCO. Involucra perforación vertical de largo diámetro, de arriba hacia abajo, tronando el mineral en secciones horizontales, que cae al nivel de producción en una cota más baja. Parte del mineral tronado es utilizado temporalmente para soportar las paredes (Figura B2a)
- ***Slot and slash***: Es el mismo método VCR, con la variante de realizar previamente una chimenea (excavación de cierto diámetro), generando más cara libre para realizar la tronadura para así utilizar menor cantidad de explosivos.
- ***Block Caving***: es un método de baja selectividad y muy productivo. Se combina la gravedad con los esfuerzos presentes en el macizo rocoso para fracturar y quebrar la roca en pedazos para así ser llevada a los niveles de producción ubicados en cotas más bajas (Figura B2b). Es un proceso similar al *Panel Caving* utilizado en RENO, con la diferencia que el área productiva es mayor.

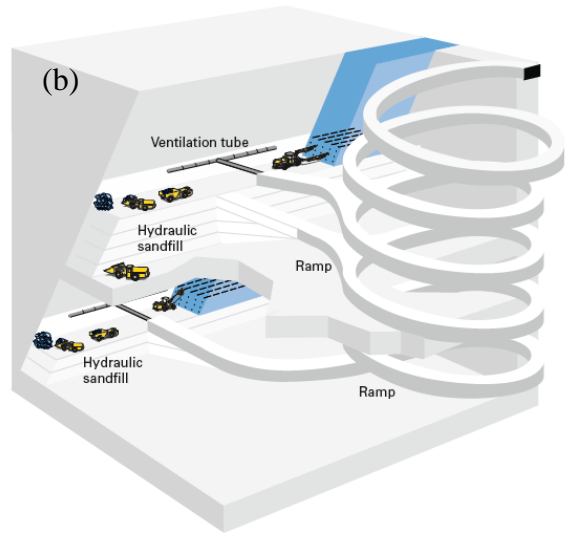
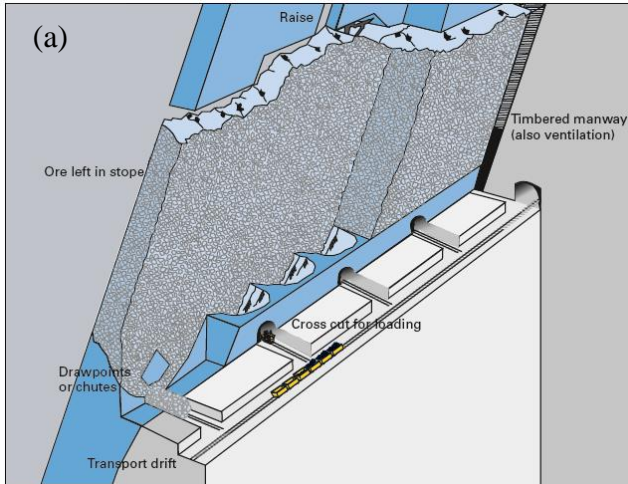


Figura B1: (a) *Shrinkage Stopping*. (b) *Cut & Fill*. (AtlasCopco, 2007)

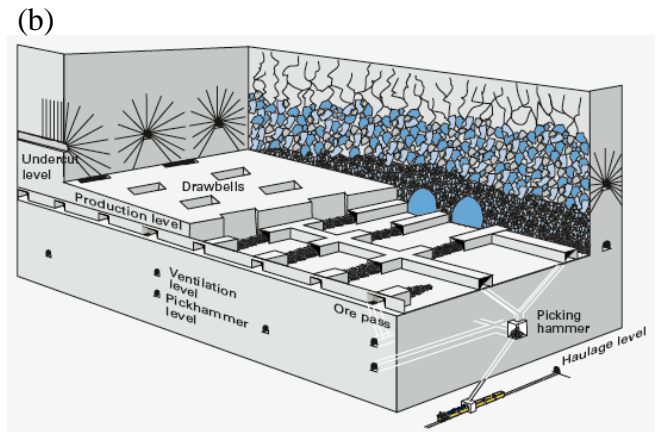
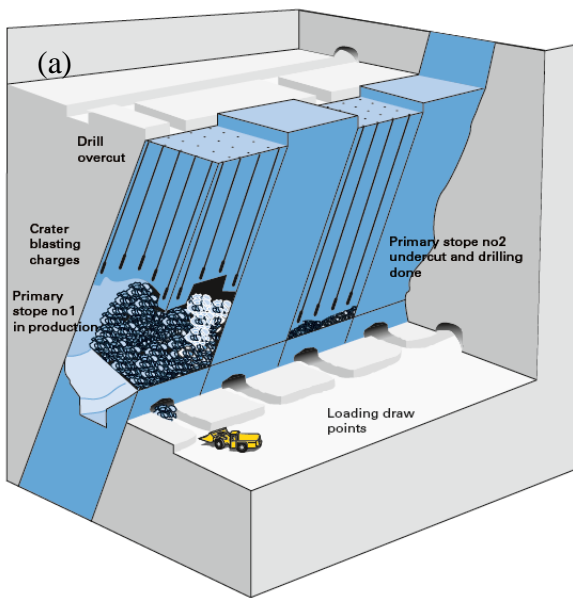


Figura B2: (a) *Vertical Crater Retreat*. (b) *Block Caving*. (AtlasCopco, 2007)

Anexo C. Error de localización promedio por año y por polígono. Mina RENO

A continuación se presentan las tablas que muestran el efecto de aplicar el filtro por error de localización de hipocentro para la Mina RENO. En la Tabla B1 se muestra el error promedio y la desviación estándar sin considerar el filtro por error de localización del hipocentro, mientras que en la Tabla B2 se muestra el efecto al aplicar el filtro.

Tabla C1. Tabla resumen de los errores promedios de localización y desviación estándar por polígono, sin considerar un filtro por error de localización del hipocentro de 40 metros.

Polígono/Año	Error ubicación hipocentro, sin filtro por error																		
	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		
	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	
1	19,5	12,3	15,5	18,5	17,1	12,3	11,9	8,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	14,0	9,6	14,8	8,7	16,7	9,8	12,6	8,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	15,1	13,6	12,9	11,2	14,1	13,1	34,6	73,6	46,2	103,9	
2	-	-	-	-	-	-	-	-	12,3	8,8	11,8	10,0	13,8	10,2	35,8	78,6	48,3	106,3	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	12,3	12,9	12,7	26,8	13,4	12,1	44,6	86,8	56,1	109,7	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	13,7	12,9	14,2	11,9	13,0	15,0	35,7	63,1	38,4	64,3	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44,4	99,8
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,0	97,9
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,3	91,8
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42,2	108,6
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,3	86,5
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,0	74,1
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70,4	102,6
RENO	17,5	11,5	15,6	12,2	18,0	10,5	12,6	8,2	13,0	14,0	12,3	14,6	14,1	13,0	38,9	81,7	42,1	106,1	

Tabla C2. Tabla resumen de los errores promedios de localización y desviación estándar por polígono, considerando un filtro por error de localización del hipocentro de 40 metros.

Error ubicación hipocentro, con filtro por error																		
Polígono/Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011	
	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.
1	16,5	7,4	14,1	7,9	14,9	8,6	11,2	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	13,4	6,5	14,3	6,8	15,7	7,8	12,3	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	6,3	11,9	5,8	12,9	7,2	14,5	9,1	17,1	9,1
2	-	-	-	-	-	-	-	-	12,0	6,2	11,2	6,0	13,2	7,3	15,8	8,8	18,4	9,6
3	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	5,4	11,6	5,1	12,1	6,2	16,4	9,9	19,7	10,2
4	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	6,7	12,5	6,3	11,4	7,2	15,8	10,1	17,3	10,7
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,3	8,9
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,0	8,4
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,4	9,7
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,1	9,5
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,0	8,6
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,3	11,2
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,8	10,4
RENO	15,7	7,3	14,8	7,5	16,9	8,4	12,3	7,4	12,2	6,2	11,4	5,9	12,9	7,2	15,3	9,5	16,9	9,4

Anexo D. Gráficos datos filtrados. Mina Creighton

Resultados obtenidos para el proceso de filtrado de datos de la mina Creighton.

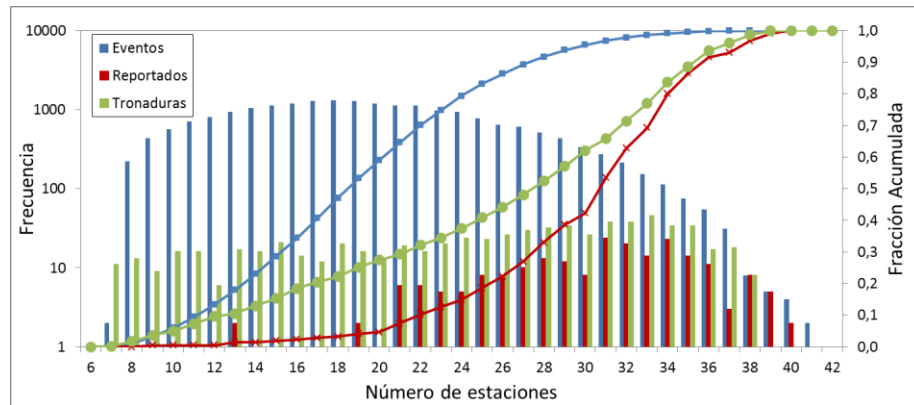
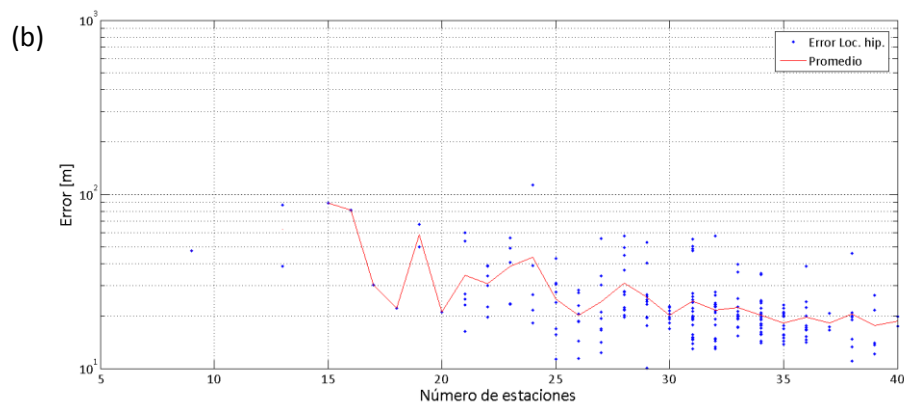
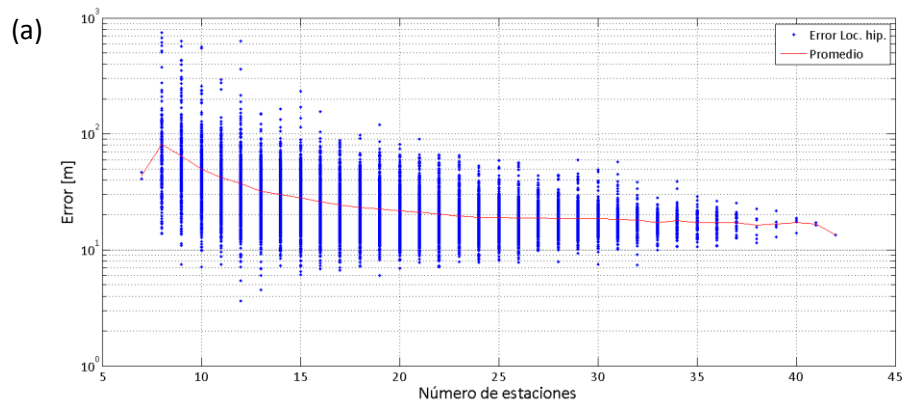


Figura D1. Frecuencia y fracción acumulada ascendente del número de estaciones utilizadas para la localización de eventos sísmicos utilizando los eventos, los reportados y las tronaduras. Notar que el eje y de la izquierda está en escala logarítmica. Todos los eventos fueron localizados por, al menos, 6 estaciones.



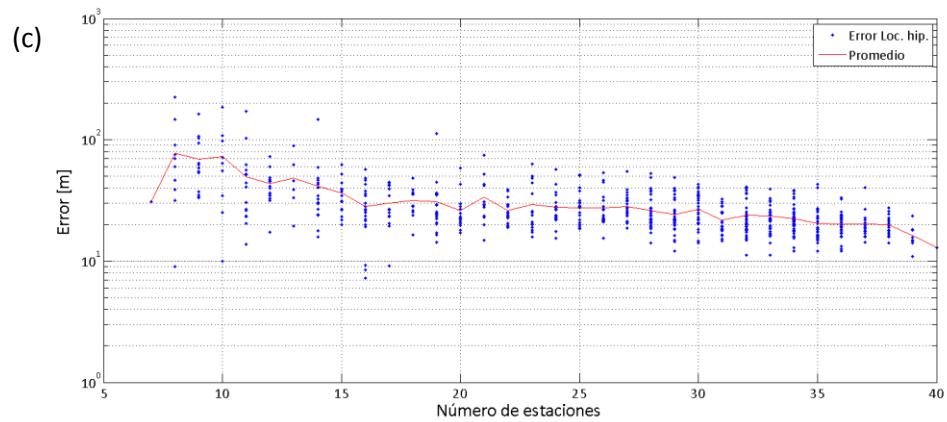


Figura D2. Error asociado a la localización del hipocentro como función del número de estaciones para (a) eventos, (b) reportados y (c) tronaduras. Notar que si bien se utiliza gran cantidad de estaciones, existen errores de localización de 1000 metros en el caso de los eventos y de 100 metros para el caso de los reportados.

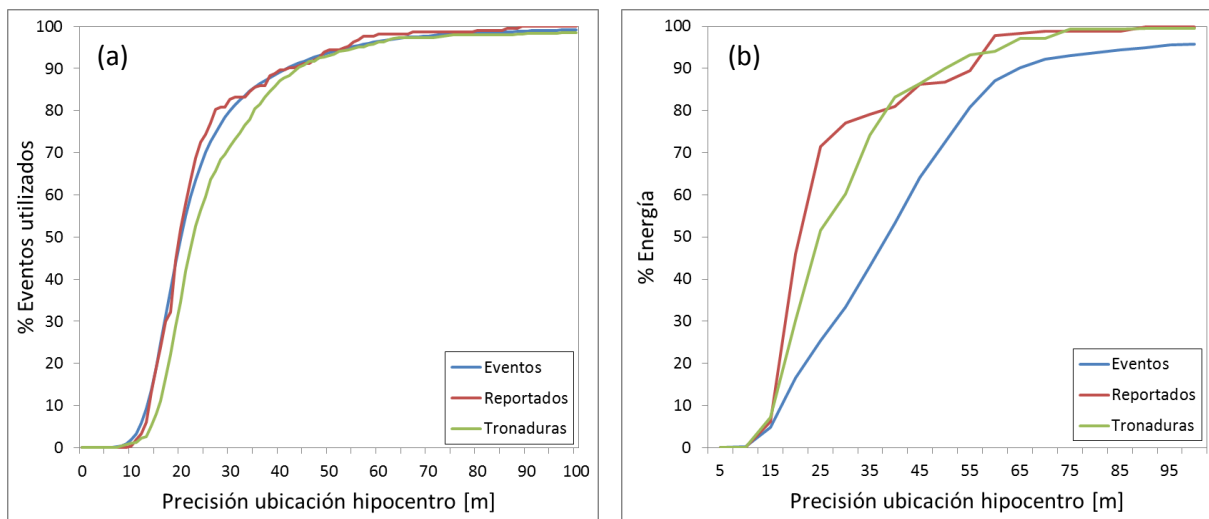


Figura D3. (a) Porcentaje de eventos y (b) porcentaje de energía utilizados en función de la precisión en la localización del hipocentro.

Anexo E. Matriz de contingencia CFE, calibración. RENO

En la tabla E1 se muestra el detalle del desempeño del CFE para el período de calibración al variar los percentiles de la distribución de Poisson. En rojo se indican los resultados que obtuvieron el máximo PSS. El gráfico ROC se muestra en la Figura 5.1.

Tabla E1. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE durante el período de calibración al variar los percentiles de la distribución de Poisson.

ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,8	0,02	749	150609	1013	320741	0,43	0,32	0,11	0,00
0,8	0,05	876	168460	886	302890	0,50	0,36	0,14	0,00
0,8	0,1	953	192154	809	279196	0,54	0,41	0,13	0,00
0,8	0,15	1003	212610	759	258649	0,57	0,45	0,12	0,00
0,8	0,2	1054	232006	708	239344	0,60	0,49	0,11	0,00
0,85	0,02	719	134432	1043	336918	0,41	0,29	0,12	0,00
0,85	0,05	846	152283	916	319067	0,48	0,32	0,16	0,00
0,85	0,1	923	175977	839	295373	0,52	0,37	0,15	0,00
0,85	0,15	973	196433	789	274917	0,55	0,42	0,14	0,00
0,85	0,2	1024	215829	738	255521	0,58	0,46	0,12	0,00
0,9	0,02	662	117529	1100	353821	0,38	0,25	0,13	0,00
0,9	0,05	789	135380	973	335970	0,45	0,29	0,16	0,00
0,9	0,1	866	159074	896	312276	0,49	0,34	0,15	0,00
0,9	0,15	916	179530	846	206820	0,52	0,46	0,06	0,00
0,9	0,2	967	198926	795	272424	0,55	0,42	0,13	0,00
0,95	0,02	599	97087	1139	374263	0,34	0,21	0,14	0,00
0,95	0,05	750	114938	1012	356412	0,43	0,24	0,18	0,01
0,95	0,1	827	138632	935	332718	0,47	0,29	0,18	0,00
0,95	0,15	877	159088	885	312262	0,50	0,34	0,16	0,00
0,95	0,2	928	178484	834	292866	0,53	0,38	0,15	0,00
0,98	0,02	578	80762	1184	390588	0,33	0,17	0,16	0,01
0,98	0,05	705	98613	1057	372737	0,40	0,21	0,19	0,01
0,98	0,1	782	122307	980	349043	0,44	0,26	0,18	0,01
0,98	0,15	832	142763	930	328587	0,47	0,30	0,17	0,00
0,98	0,2	883	162159	879	309191	0,50	0,34	0,16	0,00

Anexo F. Matriz de contingencia CFE, validación. RENO

A continuación se detallan las matrices de contingencia y las métricas de desempeño global y por polígono para el indicador CFE durante el período de validación.

Tabla F1. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base (ver Tabla 5.1). Período de validación.

Período	Polígono	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	1	203	127	13343	17813	0,62	0,43	0,19	0,01
	2	174	242	9463	21594	0,42	0,30	0,11	0,01
	3	0	0	7648	23832	--	0,24	--	0,00
	4	268	602	8446	22164	0,31	0,28	0,03	0,01
Validación 2	1	119	214	11077	11914	0,36	0,48	-0,12	-0,01
	2	100	28	12985	10183	0,78	0,56	0,22	0,00
	3	0	0	3633	19656	--	0,16	--	0,00
	4	0	32	5365	17928	0,00	0,23	-0,23	0,00
	5	0	0	12116	11192	--	0,52	--	0,00
	6	38	79	2663	20538	0,32	0,11	0,21	0,02
	7	32	0	5973	17171	1,00	0,26	0,74	0,01
Global		934	1324	92712	193985	0,41	0,32	0,09	0,00

Tabla F2. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base (ver Tabla 5.1) con los percentiles $ub = 98\%$ y $lb = 5\%$. Período de validación.

Período	Polígono	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	1	185	145	13839	17317	0,56	0,44	0,12	0,01
	2	201	215	10354	20703	0,48	0,33	0,15	0,01
	3	0	0	8079	23401	--	0,26	--	0,00
	4	254	616	8228	2282	0,29	0,78	-0,49	-0,10
Validación 2	1	148	185	11663	11328	0,44	0,51	-0,06	0,00
	2	96	32	13009	10159	0,75	0,56	0,19	0,00
	3	0	0	3748	19541	--	0,16	--	0,00
	4	0	32	5367	17926	0,00	0,23	-0,23	0,00
	5	0	0	12090	11218	--	0,52	--	0,00
	6	20	97	2821	20380	0,17	0,12	0,05	0,00
	7	32	0	6113	17031	1,00	0,26	0,74	0,01
Global		936	1322	95311	171286	0,41	0,36	0,06	0,00

Tabla F3. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para el indicador CFE utilizando los parámetros del caso base (ver Tabla 5.1) con un valor de $M_{rel} = 1,6$. Período de validación.

Período	Polígono	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	PSS	HSS	Nº eventos relevantes
Validación 1	1	0	0	13546	17940	--	0,43	--	0,00	0
	2	0	0	9637	21836	--	0,31	--	0,00	0
	3	0	0	7648	23832	--	0,24	--	0,00	0
	4	0	96	8714	22670	0,00	0,28	-0,28	-0,01	3
Validación 2	1	0	0	11196	12128	--	0,48	--	0,00	0
	2	0	0	13085	10211	--	0,56	--	0,00	0
	3	0	0	3633	19656	--	0,16	--	0,00	0
	4	0	0	5365	17960	--	0,23	--	0,00	0
	5	0	0	12116	11192	--	0,52	--	0,00	0
	6	17	15	2684	20602	0,53	0,12	0,42	0,01	1
	7	0	0	6005	17171	--	0,26	--	0,00	0
Global		17	111	93629	195198	0,13	0,32	-0,19	0,00	4

Anexo G. Matriz de contingencia tasa genérica, calibración. RENO

Las siguientes tablas corresponden a las matrices de contingencia globales obtenidas para el indicador tasa genérica de momento sísmico para el período de calibración, al variar el parámetro ξ , los percentiles de las distribuciones poblacional y auto-poblacional y las fracciones de la banda proporcional. En rojo se muestran los mayores valores de PSS.

Tabla G1. Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda poblacional. Período de calibración.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,0	0,80	0,02	1375	356917	355	117901	0,79	0,75	0,04	0,00
0,0	0,80	0,05	1395	362760	335	112058	0,81	0,76	0,04	0,00
0,0	0,80	0,10	1442	371716	288	103102	0,83	0,78	0,05	0,00
0,0	0,80	0,15	1488	380100	242	94718	0,86	0,80	0,06	0,00
0,0	0,80	0,20	1504	387951	226	86867	0,87	0,82	0,05	0,00
0,0	0,85	0,02	1370	350526	360	124292	0,79	0,74	0,05	0,00
0,0	0,85	0,05	1390	356369	340	118449	0,80	0,75	0,05	0,00
0,0	0,85	0,10	1437	365325	293	109493	0,83	0,77	0,06	0,00
0,0	0,85	0,15	1483	373709	247	101109	0,86	0,79	0,07	0,00
0,0	0,85	0,20	1499	381560	231	93258	0,87	0,80	0,06	0,00
0,0	0,90	0,02	1348	344822	382	129996	0,78	0,73	0,05	0,00
0,0	0,90	0,05	1368	350665	362	124153	0,79	0,74	0,05	0,00
0,0	0,90	0,10	1415	359621	315	115197	0,82	0,76	0,06	0,00
0,0	0,90	0,15	1461	368005	269	106813	0,84	0,78	0,07	0,00
0,0	0,90	0,20	1477	375856	253	98962	0,85	0,79	0,06	0,00
0,0	0,95	0,02	1342	337866	388	136952	0,78	0,71	0,06	0,00
0,0	0,95	0,05	1362	343709	368	131109	0,79	0,72	0,06	0,00
0,0	0,95	0,10	1409	352665	321	122153	0,81	0,74	0,07	0,00
0,0	0,95	0,15	1455	361049	275	113769	0,84	0,76	0,08	0,00
0,0	0,95	0,20	1471	368900	259	105918	0,85	0,78	0,07	0,00
0,0	0,98	0,02	1325	333674	405	141144	0,77	0,70	0,06	0,00
0,0	0,98	0,05	1345	339517	385	135301	0,78	0,72	0,06	0,00
0,0	0,98	0,10	1392	348473	338	126345	0,80	0,73	0,07	0,00
0,0	0,98	0,15	1438	356857	292	117961	0,83	0,75	0,08	0,00
0,0	0,98	0,20	1454	364708	276	110110	0,84	0,77	0,07	0,00
0,5	0,80	0,02	1256	362314	474	112504	0,73	0,76	-0,04	0,00
0,5	0,80	0,05	1280	368651	450	106167	0,74	0,78	-0,04	0,00
0,5	0,80	0,10	1304	378171	426	96647	0,75	0,80	-0,04	0,00
0,5	0,80	0,15	1328	386584	402	88234	0,77	0,81	-0,05	0,00
0,5	0,80	0,20	1345	393832	385	80986	0,78	0,83	-0,05	0,00
0,5	0,85	0,02	1222	355867	508	118951	0,71	0,75	-0,04	0,00
0,5	0,85	0,05	1246	362204	484	112614	0,72	0,76	-0,04	0,00

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,85	0,10	1270	371724	460	103094	0,73	0,78	-0,05	0,00
0,5	0,85	0,15	1294	380137	436	94681	0,75	0,80	-0,05	0,00
0,5	0,85	0,20	1311	387385	419	87433	0,76	0,82	-0,06	0,00
0,5	0,90	0,02	1205	350305	525	124513	0,70	0,74	-0,04	0,00
0,5	0,90	0,05	1229	356642	501	118176	0,71	0,75	-0,04	0,00
0,5	0,90	0,10	1253	366162	477	108656	0,72	0,77	-0,05	0,00
0,5	0,90	0,15	1277	374575	453	100243	0,74	0,79	-0,05	0,00
0,5	0,90	0,20	1294	381823	436	92995	0,75	0,80	-0,06	0,00
0,5	0,95	0,02	1199	343874	531	130944	0,69	0,72	-0,03	0,00
0,5	0,95	0,05	1223	350211	507	124607	0,71	0,74	-0,03	0,00
0,5	0,95	0,10	1247	359731	483	115087	0,72	0,76	-0,04	0,00
0,5	0,95	0,15	1271	368144	459	106674	0,73	0,78	-0,04	0,00
0,5	0,95	0,20	1288	375392	442	99426	0,74	0,79	-0,05	0,00
0,5	0,98	0,02	1191	339346	539	135472	0,69	0,71	-0,03	0,00
0,5	0,98	0,05	1215	345683	515	129135	0,70	0,73	-0,03	0,00
0,5	0,98	0,10	1239	355203	491	119615	0,72	0,75	-0,03	0,00
0,5	0,98	0,15	1263	363616	467	111202	0,73	0,77	-0,04	0,00
0,5	0,98	0,20	1280	370864	450	103954	0,74	0,78	-0,04	0,00
1,0	0,80	0,02	1265	350480	465	124338	0,73	0,74	-0,01	0,00
1,0	0,80	0,05	1295	358807	435	116011	0,75	0,76	-0,01	0,00
1,0	0,80	0,10	1306	369742	424	105076	0,75	0,78	-0,02	0,00
1,0	0,80	0,15	1346	379874	384	94944	0,78	0,80	-0,02	0,00
1,0	0,80	0,20	1416	389514	314	85304	0,82	0,82	0,00	0,00
1,0	0,85	0,02	1211	343745	519	131073	0,70	0,72	-0,02	0,00
1,0	0,85	0,05	1241	352072	489	122746	0,72	0,74	-0,02	0,00
1,0	0,85	0,10	1252	363007	478	111811	0,72	0,76	-0,04	0,00
1,0	0,85	0,15	1292	373139	438	101679	0,75	0,79	-0,04	0,00
1,0	0,85	0,20	1362	382779	368	92039	0,79	0,81	-0,02	0,00
1,0	0,90	0,02	1168	338642	562	136176	0,68	0,71	-0,04	0,00
1,0	0,90	0,05	1198	346969	532	127849	0,69	0,73	-0,04	0,00
1,0	0,90	0,10	1209	357904	521	116914	0,70	0,75	-0,05	0,00
1,0	0,90	0,15	1249	368036	481	106782	0,72	0,78	-0,05	0,00
1,0	0,90	0,20	1319	377676	411	97142	0,76	0,80	-0,03	0,00
1,0	0,95	0,02	1121	333327	609	141491	0,65	0,70	-0,05	0,00
1,0	0,95	0,05	1151	341654	579	133164	0,67	0,72	-0,05	0,00
1,0	0,95	0,10	1162	352589	568	122229	0,67	0,74	-0,07	0,00
1,0	0,95	0,15	1202	362721	528	112097	0,69	0,76	-0,07	0,00
1,0	0,95	0,20	1272	372361	458	102457	0,74	0,78	-0,05	0,00
1,0	0,98	0,02	1095	329607	635	145211	0,63	0,69	-0,06	0,00
1,0	0,98	0,05	1125	337934	605	136884	0,65	0,71	-0,06	0,00
1,0	0,98	0,10	1136	348869	594	125949	0,66	0,73	-0,08	0,00
1,0	0,98	0,15	1176	359001	554	115817	0,68	0,76	-0,08	0,00

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
1,0	0,98	0,20	1246	368641	484	106177	0,72	0,78	-0,06	0,00

Tabla G2. Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda auto-poblacional. Período de calibración.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,0	0,80	0,02	490	110615	1240	364203	0,28	0,23	0,05	0,00
0,0	0,80	0,05	551	123657	1179	351161	0,32	0,26	0,06	0,00
0,0	0,80	0,10	629	143708	1101	331110	0,36	0,30	0,06	0,00
0,0	0,80	0,15	702	163446	1028	311372	0,41	0,34	0,06	0,00
0,0	0,80	0,20	771	183250	959	291568	0,45	0,39	0,06	0,00
0,0	0,85	0,02	430	89871	1300	384947	0,25	0,19	0,06	0,00
0,0	0,85	0,05	491	102913	1239	371905	0,28	0,22	0,07	0,00
0,0	0,85	0,10	569	122964	1161	351854	0,33	0,26	0,07	0,00
0,0	0,85	0,15	642	142702	1088	332116	0,37	0,30	0,07	0,00
0,0	0,85	0,20	711	162506	1019	312312	0,41	0,34	0,07	0,00
0,0	0,90	0,02	375	70232	1355	404586	0,22	0,15	0,07	0,00
0,0	0,90	0,05	436	83274	1294	391544	0,25	0,18	0,08	0,00
0,0	0,90	0,10	514	103325	1216	371493	0,30	0,22	0,08	0,00
0,0	0,90	0,15	587	123063	1143	351755	0,34	0,26	0,08	0,00
0,0	0,90	0,20	656	142867	1074	331951	0,38	0,30	0,08	0,00
0,0	0,95	0,02	299	50021	1431	424797	0,17	0,11	0,07	0,00
0,0	0,95	0,05	360	63063	1370	411755	0,21	0,13	0,08	0,00
0,0	0,95	0,10	438	83114	1292	391704	0,25	0,18	0,08	0,00
0,0	0,95	0,15	511	102852	1219	371966	0,30	0,22	0,08	0,00
0,0	0,95	0,20	580	122656	1150	352162	0,34	0,26	0,08	0,00
0,0	0,98	0,02	197	35184	1533	439634	0,11	0,07	0,04	0,00
0,0	0,98	0,05	258	48226	1472	426592	0,15	0,10	0,05	0,00
0,0	0,98	0,10	336	68277	1394	406541	0,19	0,14	0,05	0,00
0,0	0,98	0,15	409	88015	1321	386803	0,24	0,19	0,05	0,00
0,0	0,98	0,20	478	107819	1252	366999	0,28	0,23	0,05	0,00
0,5	0,80	0,02	636	141644	1094	333174	0,37	0,30	0,07	0,00
0,5	0,80	0,05	733	170891	997	303927	0,42	0,36	0,06	0,00
0,5	0,80	0,10	858	203193	872	271625	0,50	0,43	0,07	0,00
0,5	0,80	0,15	941	227769	789	247049	0,54	0,48	0,06	0,00
0,5	0,80	0,20	1011	248712	719	226106	0,58	0,52	0,06	0,00
0,5	0,85	0,02	548	121481	1182	353337	0,32	0,26	0,06	0,00
0,5	0,85	0,05	645	150728	1085	324090	0,37	0,32	0,06	0,00
0,5	0,85	0,10	770	183030	960	291788	0,45	0,39	0,06	0,00
0,5	0,85	0,15	853	207606	877	267212	0,49	0,44	0,06	0,00
0,5	0,85	0,20	923	228549	807	246269	0,53	0,48	0,05	0,00

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,90	0,02	444	98191	1286	376627	0,26	0,21	0,05	0,00
0,5	0,90	0,05	541	127438	1189	347380	0,31	0,27	0,04	0,00
0,5	0,90	0,10	666	159740	1064	315078	0,38	0,34	0,05	0,00
0,5	0,90	0,15	749	184316	981	290502	0,43	0,39	0,04	0,00
0,5	0,90	0,20	819	205259	911	269559	0,47	0,43	0,04	0,00
0,5	0,95	0,02	333	68144	1397	406674	0,19	0,14	0,05	0,00
0,5	0,95	0,05	430	97391	1300	377427	0,25	0,21	0,04	0,00
0,5	0,95	0,10	555	129693	1175	345125	0,32	0,27	0,05	0,00
0,5	0,95	0,15	638	154269	1092	320549	0,37	0,32	0,04	0,00
0,5	0,95	0,20	708	175212	1022	299606	0,41	0,37	0,04	0,00
0,5	0,98	0,02	249	42790	1481	432028	0,14	0,09	0,05	0,00
0,5	0,98	0,05	346	72037	1384	402781	0,20	0,15	0,05	0,00
0,5	0,98	0,10	471	104339	1259	370479	0,27	0,22	0,05	0,00
0,5	0,98	0,15	554	128915	1176	345903	0,32	0,27	0,05	0,00
0,5	0,98	0,20	624	149858	1106	324960	0,36	0,32	0,05	0,00
1,0	0,80	0,02	486	126196	1244	348622	0,28	0,27	0,02	0,00
1,0	0,80	0,05	529	141627	1201	333191	0,31	0,30	0,01	0,00
1,0	0,80	0,10	592	164995	1138	309823	0,34	0,35	-0,01	0,00
1,0	0,80	0,15	669	187093	1061	287725	0,39	0,39	-0,01	0,00
1,0	0,80	0,20	734	210401	996	264417	0,42	0,44	-0,02	0,00
1,0	0,85	0,02	414	101937	1316	372881	0,24	0,21	0,02	0,00
1,0	0,85	0,05	457	117368	1273	357450	0,26	0,25	0,02	0,00
1,0	0,85	0,10	520	140736	1210	334082	0,30	0,30	0,00	0,00
1,0	0,85	0,15	597	162834	1133	311984	0,35	0,34	0,00	0,00
1,0	0,85	0,20	662	186142	1068	288676	0,38	0,39	-0,01	0,00
1,0	0,90	0,02	372	80586	1358	394232	0,22	0,17	0,05	0,00
1,0	0,90	0,05	415	96017	1315	378801	0,24	0,20	0,04	0,00
1,0	0,90	0,10	478	119385	1252	355433	0,28	0,25	0,02	0,00
1,0	0,90	0,15	555	141483	1175	333335	0,32	0,30	0,02	0,00
1,0	0,90	0,20	620	164791	1110	310027	0,36	0,35	0,01	0,00
1,0	0,95	0,02	265	58668	1465	416150	0,15	0,12	0,03	0,00
1,0	0,95	0,05	308	74099	1422	400719	0,18	0,16	0,02	0,00
1,0	0,95	0,10	371	97467	1359	377351	0,21	0,21	0,01	0,00
1,0	0,95	0,15	448	119565	1282	355253	0,26	0,25	0,01	0,00
1,0	0,95	0,20	513	142873	1217	331945	0,30	0,30	0,00	0,00
1,0	0,98	0,02	203	41821	1527	432997	0,12	0,09	0,03	0,00
1,0	0,98	0,05	246	57252	1484	417566	0,14	0,12	0,02	0,00
1,0	0,98	0,10	309	80620	1421	394198	0,18	0,17	0,01	0,00
1,0	0,98	0,15	386	102718	1344	372100	0,22	0,22	0,01	0,00
1,0	0,98	0,20	451	126026	1279	348792	0,26	0,27	0,00	0,00

Tabla G3. Matriz de contingencia global para el indicador tasa genérica de momento sísmico utilizando la banda proporcional. Período de calibración.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,0	0,1	0,1	1424	398301	306	76517	0,82	0,84	-0,02	0,00
0,0	0,1	0,2	1239	356480	491	118338	0,72	0,75	-0,03	0,00
0,0	0,1	0,3	994	315378	736	159440	0,57	0,66	-0,09	0,00
0,0	0,1	0,4	763	283704	967	191114	0,44	0,60	-0,16	0,00
0,0	0,1	0,5	670	255786	1060	219032	0,39	0,54	-0,15	0,00
0,0	0,2	0,1	1314	365485	416	109333	0,76	0,77	-0,01	0,00
0,0	0,2	0,2	1129	323664	601	151154	0,65	0,68	-0,03	0,00
0,0	0,2	0,3	884	282562	846	192256	0,51	0,60	-0,08	0,00
0,0	0,2	0,4	653	250888	1077	223930	0,38	0,53	-0,15	0,00
0,0	0,2	0,5	560	222970	1170	251848	0,32	0,47	-0,15	0,00
0,0	0,3	0,1	1208	338612	522	136206	0,70	0,71	-0,01	0,00
0,0	0,3	0,2	1023	296791	707	178027	0,59	0,63	-0,03	0,00
0,0	0,3	0,3	778	255689	952	219129	0,45	0,54	-0,09	0,00
0,0	0,3	0,4	547	224015	1183	250803	0,32	0,47	-0,16	0,00
0,0	0,3	0,5	454	196097	1276	278721	0,26	0,41	-0,15	0,00
0,0	0,4	0,1	1123	314982	607	159836	0,65	0,66	-0,01	0,00
0,0	0,4	0,2	938	273161	792	201657	0,54	0,58	-0,03	0,00
0,0	0,4	0,3	693	232059	1037	242759	0,40	0,49	-0,09	0,00
0,0	0,4	0,4	462	200385	1268	274433	0,27	0,42	-0,15	0,00
0,0	0,4	0,5	369	172467	1361	302351	0,21	0,36	-0,15	0,00
0,0	0,5	0,1	1058	296754	672	178064	0,61	0,62	-0,01	0,00
0,0	0,5	0,2	873	254933	857	219885	0,50	0,54	-0,03	0,00
0,0	0,5	0,3	628	213831	1102	260987	0,36	0,45	-0,09	0,00
0,0	0,5	0,4	397	182157	1333	292661	0,23	0,38	-0,15	0,00
0,0	0,5	0,5	304	154239	1426	320579	0,18	0,32	-0,15	0,00
0,5	0,1	0,1	1310	399659	420	75159	0,76	0,84	-0,08	0,00
0,5	0,1	0,2	1107	359187	623	115631	0,64	0,76	-0,12	0,00
0,5	0,1	0,3	877	321760	853	153058	0,51	0,68	-0,17	0,00
0,5	0,1	0,4	740	287212	990	187606	0,43	0,60	-0,18	0,00
0,5	0,1	0,5	602	260171	1128	214647	0,35	0,55	-0,20	0,00
0,5	0,2	0,1	1237	367274	493	107544	0,72	0,77	-0,06	0,00
0,5	0,2	0,2	1034	326802	696	148016	0,60	0,69	-0,09	0,00
0,5	0,2	0,3	804	289375	926	185443	0,46	0,61	-0,14	0,00
0,5	0,2	0,4	667	254827	1063	219991	0,39	0,54	-0,15	0,00
0,5	0,2	0,5	529	227786	1201	247032	0,31	0,48	-0,17	0,00
0,5	0,3	0,1	1150	340097	580	134721	0,66	0,72	-0,05	0,00
0,5	0,3	0,2	947	299625	783	175193	0,55	0,63	-0,08	0,00
0,5	0,3	0,3	717	262198	1013	212620	0,41	0,55	-0,14	0,00
0,5	0,3	0,4	580	227650	1150	247168	0,34	0,48	-0,14	0,00

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,3	0,5	442	200609	1288	274209	0,26	0,42	-0,17	0,00
0,5	0,4	0,1	1056	318458	674	156360	0,61	0,67	-0,06	0,00
0,5	0,4	0,2	853	277986	877	196832	0,49	0,59	-0,09	0,00
0,5	0,4	0,3	623	240559	1107	234259	0,36	0,51	-0,15	0,00
0,5	0,4	0,4	486	206011	1244	268807	0,28	0,43	-0,15	0,00
0,5	0,4	0,5	348	178970	1382	295848	0,20	0,38	-0,18	0,00
0,5	0,5	0,1	977	300493	753	174325	0,56	0,63	-0,07	0,00
0,5	0,5	0,2	774	260021	956	214797	0,45	0,55	-0,10	0,00
0,5	0,5	0,3	544	222594	1186	252224	0,31	0,47	-0,15	0,00
0,5	0,5	0,4	407	188046	1323	286772	0,24	0,40	-0,16	0,00
0,5	0,5	0,5	269	161005	1461	313813	0,16	0,34	-0,18	0,00
1,0	0,1	0,1	1454	415069	276	59749	0,84	0,87	-0,03	0,00
1,0	0,1	0,2	1323	383474	407	91344	0,76	0,81	-0,04	0,00
1,0	0,1	0,3	1195	348773	535	126045	0,69	0,73	-0,04	0,00
1,0	0,1	0,4	1023	315464	707	159354	0,59	0,66	-0,07	0,00
1,0	0,1	0,5	810	285150	920	189668	0,47	0,60	-0,13	0,00
1,0	0,2	0,1	1379	390611	351	84207	0,80	0,82	-0,03	0,00
1,0	0,2	0,2	1248	359016	482	115802	0,72	0,76	-0,03	0,00
1,0	0,2	0,3	1120	324315	610	150503	0,65	0,68	-0,04	0,00
1,0	0,2	0,4	948	291006	782	183812	0,55	0,61	-0,06	0,00
1,0	0,2	0,5	735	260692	995	214126	0,42	0,55	-0,12	0,00
1,0	0,3	0,1	1317	370998	413	103820	0,76	0,78	-0,02	0,00
1,0	0,3	0,2	1186	339403	544	135415	0,69	0,71	-0,03	0,00
1,0	0,3	0,3	1058	304702	672	170116	0,61	0,64	-0,03	0,00
1,0	0,3	0,4	886	271393	844	203425	0,51	0,57	-0,06	0,00
1,0	0,3	0,5	673	241079	1057	233739	0,39	0,51	-0,12	0,00
1,0	0,4	0,1	1197	353837	533	120981	0,69	0,75	-0,05	0,00
1,0	0,4	0,2	1066	322242	664	152576	0,62	0,68	-0,06	0,00
1,0	0,4	0,3	938	287541	792	187277	0,54	0,61	-0,06	0,00
1,0	0,4	0,4	766	254232	964	220586	0,44	0,54	-0,09	0,00
1,0	0,4	0,5	553	223918	1177	250900	0,32	0,47	-0,15	0,00
1,0	0,5	0,1	1108	339033	622	135785	0,64	0,71	-0,07	0,00
1,0	0,5	0,2	977	307438	753	167380	0,56	0,65	-0,08	0,00
1,0	0,5	0,3	849	272737	881	202081	0,49	0,57	-0,08	0,00
1,0	0,5	0,4	677	239428	1053	235390	0,39	0,50	-0,11	0,00
1,0	0,5	0,5	464	209114	1266	265704	0,27	0,44	-0,17	0,00

Anexo H. Matriz de contingencia tasa genérica, calibración. Creighton

A continuación se presentan las matrices de contingencia y métricas de desempeño para el indicador tasa genérica de momento sísmico en el período de calibración para la Mina Creighton. En rojo se muestran los mayores valores de PSS.

Tabla H1. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda poblacional.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0	0,8	0,02	2330	14424	737	5070	0,76	0,74	0,02	0,01
0	0,8	0,05	2376	14593	691	4901	0,77	0,75	0,03	0,01
0	0,8	0,1	2433	14958	634	4536	0,79	0,77	0,03	0,01
0	0,8	0,15	2452	15273	615	4221	0,80	0,78	0,02	0,01
0	0,8	0,2	2499	15525	568	3969	0,81	0,80	0,02	0,01
0	0,85	0,02	2300	14148	767	5346	0,75	0,73	0,02	0,01
0	0,85	0,05	2346	14317	721	5177	0,76	0,73	0,03	0,01
0	0,85	0,1	2403	14682	664	4812	0,78	0,75	0,03	0,01
0	0,85	0,15	2422	14997	645	4497	0,79	0,77	0,02	0,01
0	0,85	0,2	2469	15249	598	4245	0,81	0,78	0,02	0,01
0	0,9	0,02	2274	13906	793	5588	0,74	0,71	0,03	0,01
0	0,9	0,05	2320	14075	747	5419	0,76	0,72	0,03	0,01
0	0,9	0,1	2377	14440	690	5054	0,78	0,74	0,03	0,01
0	0,9	0,15	2396	14755	671	4739	0,78	0,76	0,02	0,01
0	0,9	0,2	2443	15007	624	4487	0,80	0,77	0,03	0,01
0	0,95	0,02	2230	13620	837	5874	0,73	0,70	0,03	0,01
0	0,95	0,05	2276	13789	791	5705	0,74	0,71	0,03	0,01
0	0,95	0,1	2333	14154	734	5340	0,76	0,73	0,03	0,01
0	0,95	0,15	2352	14469	715	5025	0,77	0,74	0,02	0,01
0	0,95	0,2	2399	14721	668	4773	0,78	0,76	0,03	0,01
0	0,98	0,02	2185	13523	882	5971	0,71	0,69	0,02	0,01
0	0,98	0,05	2231	13692	836	5802	0,73	0,70	0,03	0,01
0	0,98	0,1	2288	14057	779	5437	0,75	0,72	0,02	0,01
0	0,98	0,15	2307	14372	760	5122	0,75	0,74	0,01	0,01
0	0,98	0,2	2354	14624	713	4870	0,77	0,75	0,02	0,01
0,5	0,8	0,02	2478	14162	589	5332	0,81	0,73	0,08	0,03
0,5	0,8	0,05	2544	14500	523	4994	0,83	0,74	0,09	0,03
0,5	0,8	0,1	2572	14883	495	4611	0,84	0,76	0,08	0,03
0,5	0,8	0,15	2633	15389	434	4105	0,86	0,79	0,07	0,02
0,5	0,8	0,2	2658	15911	409	3583	0,87	0,82	0,05	0,02
0,5	0,85	0,02	2460	13994	607	5500	0,80	0,72	0,08	0,03
0,5	0,85	0,05	2526	14332	541	5162	0,82	0,74	0,09	0,03

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,85	0,1	2554	14715	513	4779	0,83	0,75	0,08	0,03
0,5	0,85	0,15	2615	15221	452	4273	0,85	0,78	0,07	0,02
0,5	0,85	0,2	2640	15743	427	3751	0,86	0,81	0,05	0,02
0,5	0,9	0,02	2441	13835	626	5659	0,80	0,71	0,09	0,03
0,5	0,9	0,05	2507	14173	560	5321	0,82	0,73	0,09	0,03
0,5	0,9	0,1	2535	14556	532	4938	0,83	0,75	0,08	0,03
0,5	0,9	0,15	2596	15062	471	4432	0,85	0,77	0,07	0,02
0,5	0,9	0,2	2621	15584	446	3910	0,85	0,80	0,06	0,02
0,5	0,95	0,02	2404	13738	663	5756	0,78	0,70	0,08	0,03
0,5	0,95	0,05	2470	14076	597	5418	0,81	0,72	0,08	0,03
0,5	0,95	0,1	2498	14459	569	5035	0,81	0,74	0,07	0,03
0,5	0,95	0,15	2559	14965	508	4529	0,83	0,77	0,07	0,02
0,5	0,95	0,2	2584	15487	483	4007	0,84	0,79	0,05	0,02
0,5	0,98	0,02	2391	13667	676	5827	0,78	0,70	0,08	0,03
0,5	0,98	0,05	2457	14005	610	5489	0,80	0,72	0,08	0,03
0,5	0,98	0,1	2485	14388	582	5106	0,81	0,74	0,07	0,02
0,5	0,98	0,15	2546	14894	521	4600	0,83	0,76	0,07	0,02
0,5	0,98	0,2	2571	15416	496	4078	0,84	0,79	0,05	0,02
1	0,8	0,02	2373	14985	694	4509	0,77	0,77	0,01	0,00
1	0,8	0,05	2443	15343	624	4151	0,80	0,79	0,01	0,00
1	0,8	0,1	2474	15763	593	3731	0,81	0,81	0,00	0,00
1	0,8	0,15	2517	16239	550	3255	0,82	0,83	-0,01	0,00
1	0,8	0,2	2577	16643	490	2851	0,84	0,85	-0,01	0,00
1	0,85	0,02	2372	14849	695	4645	0,77	0,76	0,01	0,00
1	0,85	0,05	2442	15207	625	4287	0,80	0,78	0,02	0,01
1	0,85	0,1	2473	15627	594	3867	0,81	0,80	0,00	0,00
1	0,85	0,15	2516	16103	551	3391	0,82	0,83	-0,01	0,00
1	0,85	0,2	2576	16507	491	2987	0,84	0,85	-0,01	0,00
1	0,9	0,02	2371	14786	696	4708	0,77	0,76	0,01	0,00
1	0,9	0,05	2441	15144	626	4350	0,80	0,78	0,02	0,01
1	0,9	0,1	2472	15564	595	3930	0,81	0,80	0,01	0,00
1	0,9	0,15	2515	16040	552	3454	0,82	0,82	0,00	0,00
1	0,9	0,2	2575	16444	492	3050	0,84	0,84	0,00	0,00
1	0,95	0,02	2371	14711	696	4783	0,77	0,75	0,02	0,01
1	0,95	0,05	2441	15069	626	4425	0,80	0,77	0,02	0,01
1	0,95	0,1	2472	15489	595	4005	0,81	0,79	0,01	0,00
1	0,95	0,15	2515	15965	552	3529	0,82	0,82	0,00	0,00
1	0,95	0,2	2575	16369	492	3125	0,84	0,84	0,00	0,00
1	0,98	0,02	2371	14658	696	4836	0,77	0,75	0,02	0,01
1	0,98	0,05	2441	15016	626	4478	0,80	0,77	0,03	0,01

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
1	0,98	0,1	2472	15436	595	4058	0,81	0,79	0,01	0,00
1	0,98	0,15	2515	15912	552	3582	0,82	0,82	0,00	0,00
1	0,98	0,2	2575	16316	492	3178	0,84	0,84	0,00	0,00

Tabla H2. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda auto-poblacional.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0	0,8	0,02	928	5405	2139	14089	0,30	0,28	0,03	0,02
0	0,8	0,05	1040	6162	2027	13332	0,34	0,32	0,02	0,01
0	0,8	0,1	1200	7127	1867	12367	0,39	0,37	0,03	0,01
0	0,8	0,15	1328	8097	1739	11397	0,43	0,42	0,02	0,01
0	0,8	0,2	1440	9078	1627	10416	0,47	0,47	0,00	0,00
0	0,85	0,02	753	4536	2314	14958	0,25	0,23	0,01	0,01
0	0,85	0,05	865	5293	2202	14201	0,28	0,27	0,01	0,01
0	0,85	0,1	1025	6258	2042	13236	0,33	0,32	0,01	0,01
0	0,85	0,15	1153	7228	1914	12266	0,38	0,37	0,01	0,00
0	0,85	0,2	1265	8209	1802	11285	0,41	0,42	-0,01	0,00
0	0,9	0,02	616	3636	2451	15858	0,20	0,19	0,01	0,01
0	0,9	0,05	728	4393	2339	15101	0,24	0,23	0,01	0,01
0	0,9	0,1	888	5358	2179	14136	0,29	0,27	0,01	0,01
0	0,9	0,15	1016	6328	2051	13166	0,33	0,32	0,01	0,00
0	0,9	0,2	1128	7309	1939	12185	0,37	0,37	-0,01	0,00
0	0,95	0,02	485	2862	2582	16632	0,16	0,15	0,01	0,01
0	0,95	0,05	597	3619	2470	15875	0,19	0,19	0,01	0,01
0	0,95	0,1	757	4584	2310	14910	0,25	0,24	0,01	0,01
0	0,95	0,15	885	5554	2182	13940	0,29	0,28	0,00	0,00
0	0,95	0,2	997	6535	2070	12959	0,33	0,34	-0,01	-0,01
0	0,98	0,02	388	2241	2679	17253	0,13	0,11	0,01	0,01
0	0,98	0,05	500	2998	2567	16496	0,16	0,15	0,01	0,01
0	0,98	0,1	660	3963	2407	15531	0,22	0,20	0,01	0,01
0	0,98	0,15	788	4933	2279	14561	0,26	0,25	0,00	0,00
0	0,98	0,2	900	5914	2167	13580	0,29	0,30	-0,01	-0,01
0,5	0,8	0,02	1023	5185	2044	14309	0,33	0,27	0,07	0,05
0,5	0,8	0,05	1119	6128	1948	13366	0,36	0,31	0,05	0,03
0,5	0,8	0,1	1299	7156	1768	12338	0,42	0,37	0,06	0,03
0,5	0,8	0,15	1460	8155	1607	11339	0,48	0,42	0,06	0,03
0,5	0,8	0,2	1564	9174	1503	10320	0,51	0,47	0,04	0,02
0,5	0,85	0,02	827	4021	2240	15473	0,27	0,21	0,06	0,05
0,5	0,85	0,05	923	4964	2144	14530	0,30	0,25	0,05	0,03
0,5	0,85	0,1	1103	5992	1964	13502	0,36	0,31	0,05	0,03

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,85	0,15	1264	6991	1803	12503	0,41	0,36	0,05	0,03
0,5	0,85	0,2	1368	8010	1699	11484	0,45	0,41	0,04	0,02
0,5	0,9	0,02	543	3189	2524	16305	0,18	0,16	0,01	0,01
0,5	0,9	0,05	639	4132	2428	15362	0,21	0,21	0,00	0,00
0,5	0,9	0,1	819	5160	2248	14334	0,27	0,26	0,00	0,00
0,5	0,9	0,15	980	6159	2087	13335	0,32	0,32	0,00	0,00
0,5	0,9	0,2	1084	7178	1983	12316	0,35	0,37	-0,01	-0,01
0,5	0,95	0,02	369	2379	2698	17115	0,12	0,12	0,00	0,00
0,5	0,95	0,05	465	3322	2602	16172	0,15	0,17	-0,02	-0,02
0,5	0,95	0,1	645	4350	2422	15144	0,21	0,22	-0,01	-0,01
0,5	0,95	0,15	806	5349	2261	14145	0,26	0,27	-0,01	-0,01
0,5	0,95	0,2	910	6368	2157	13126	0,30	0,33	-0,03	-0,02
0,5	0,98	0,02	293	1837	2774	17657	0,10	0,09	0,00	0,00
0,5	0,98	0,05	389	2780	2678	16714	0,13	0,14	-0,02	-0,02
0,5	0,98	0,1	569	3808	2498	15686	0,19	0,20	-0,01	-0,01
0,5	0,98	0,15	730	4807	2337	14687	0,24	0,25	-0,01	-0,01
0,5	0,98	0,2	834	5826	2233	13668	0,27	0,30	-0,03	-0,02
1	0,8	0,02	997	5000	2070	14494	0,33	0,26	0,07	0,05
1	0,8	0,05	1090	5918	1977	13576	0,36	0,30	0,05	0,03
1	0,8	0,1	1255	7122	1812	12372	0,41	0,37	0,04	0,03
1	0,8	0,15	1432	8199	1635	11295	0,47	0,42	0,05	0,02
1	0,8	0,2	1592	9169	1475	10325	0,52	0,47	0,05	0,02
1	0,85	0,02	751	3975	2316	15519	0,24	0,20	0,04	0,03
1	0,85	0,05	844	4893	2223	14601	0,28	0,25	0,02	0,02
1	0,85	0,1	1009	6097	2058	13397	0,33	0,31	0,02	0,01
1	0,85	0,15	1186	7174	1881	12320	0,39	0,37	0,02	0,01
1	0,85	0,2	1346	8144	1721	11350	0,44	0,42	0,02	0,01
1	0,9	0,02	495	3002	2572	16492	0,16	0,15	0,01	0,01
1	0,9	0,05	588	3920	2479	15574	0,19	0,20	-0,01	-0,01
1	0,9	0,1	753	5124	2314	14370	0,25	0,26	-0,02	-0,01
1	0,9	0,15	930	6201	2137	13293	0,30	0,32	-0,01	-0,01
1	0,9	0,2	1090	7171	1977	12323	0,36	0,37	-0,01	-0,01
1	0,95	0,02	370	2298	2697	17196	0,12	0,12	0,00	0,00
1	0,95	0,05	463	3216	2604	16278	0,15	0,16	-0,01	-0,01
1	0,95	0,1	628	4420	2439	15074	0,20	0,23	-0,02	-0,02
1	0,95	0,15	805	5497	2262	13997	0,26	0,28	-0,02	-0,01
1	0,95	0,2	965	6467	2102	13027	0,31	0,33	-0,02	-0,01
1	0,98	0,02	257	1764	2810	17730	0,08	0,09	-0,01	-0,01
1	0,98	0,05	350	2682	2717	16812	0,11	0,14	-0,02	-0,02
1	0,98	0,1	515	3886	2552	15608	0,17	0,20	-0,03	-0,03

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
1	0,98	0,15	692	4963	2375	14531	0,23	0,25	-0,03	-0,02
1	0,98	0,2	852	5933	2215	13561	0,28	0,30	-0,03	-0,02

Tabla H3. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda proporcional.

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0	0,1	0,1	2582	16118	485	3376	0,84	0,83	0,02	0,00
0	0,1	0,2	2234	13625	833	5869	0,73	0,70	0,03	0,01
0	0,1	0,3	1849	11400	1218	8094	0,60	0,58	0,02	0,01
0	0,1	0,4	1573	9274	1494	10220	0,51	0,48	0,04	0,02
0	0,1	0,5	1414	7784	1653	11710	0,46	0,40	0,06	0,03
0	0,2	0,1	2284	15073	783	4421	0,74	0,77	-0,03	-0,01
0	0,2	0,2	1936	12580	1131	6914	0,63	0,65	-0,01	-0,01
0	0,2	0,3	1551	10355	1516	9139	0,51	0,53	-0,03	-0,01
0	0,2	0,4	1275	8229	1792	11265	0,42	0,42	-0,01	0,00
0	0,2	0,5	1116	6739	1951	12755	0,36	0,35	0,02	0,01
0	0,3	0,1	1990	14180	1077	5314	0,65	0,73	-0,08	-0,03
0	0,3	0,2	1642	11687	1425	7807	0,54	0,60	-0,06	-0,03
0	0,3	0,3	1257	9462	1810	10032	0,41	0,49	-0,08	-0,04
0	0,3	0,4	981	7336	2086	12158	0,32	0,38	-0,06	-0,03
0	0,3	0,5	822	5846	2245	13648	0,27	0,30	-0,03	-0,02
0	0,4	0,1	1914	13384	1153	6110	0,62	0,69	-0,06	-0,02
0	0,4	0,2	1566	10891	1501	8603	0,51	0,56	-0,05	-0,02
0	0,4	0,3	1181	8666	1886	10828	0,39	0,44	-0,06	-0,03
0	0,4	0,4	905	6540	2162	12954	0,30	0,34	-0,04	-0,03
0	0,4	0,5	746	5050	2321	14444	0,24	0,26	-0,02	-0,01
0	0,5	0,1	1855	12656	1212	6838	0,60	0,65	-0,04	-0,02
0	0,5	0,2	1507	10163	1560	9331	0,49	0,52	-0,03	-0,01
0	0,5	0,3	1122	7938	1945	11556	0,37	0,41	-0,04	-0,02
0	0,5	0,4	846	5812	2221	13682	0,28	0,30	-0,02	-0,01
0	0,5	0,5	687	4322	2380	15172	0,22	0,22	0,00	0,00
0,5	0,1	0,1	2852	17924	215	1570	0,93	0,92	0,01	0,00
0,5	0,1	0,2	2710	17165	357	2329	0,88	0,88	0,00	0,00
0,5	0,1	0,3	2577	16455	490	3039	0,84	0,84	0,00	0,00
0,5	0,1	0,4	2404	15600	663	3894	0,78	0,80	-0,02	-0,01
0,5	0,1	0,5	2245	14402	822	5092	0,73	0,74	-0,01	0,00
0,5	0,2	0,1	2702	17382	365	2112	0,88	0,89	-0,01	0,00
0,5	0,2	0,2	2560	16623	507	2871	0,83	0,85	-0,02	-0,01
0,5	0,2	0,3	2427	15913	640	3581	0,79	0,82	-0,02	-0,01
0,5	0,2	0,4	2254	15058	813	4436	0,73	0,77	-0,04	-0,01
0,5	0,2	0,5	2095	13860	972	5634	0,68	0,71	-0,03	-0,01
0,5	0,3	0,1	2663	16998	404	2496	0,87	0,87	0,00	0,00

ξ	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
0,5	0,3	0,2	2521	16239	546	3255	0,82	0,83	-0,01	0,00
0,5	0,3	0,3	2388	15529	679	3965	0,78	0,80	-0,02	-0,01
0,5	0,3	0,4	2215	14674	852	4820	0,72	0,75	-0,03	-0,01
0,5	0,3	0,5	2056	13476	1011	6018	0,67	0,69	-0,02	-0,01
0,5	0,4	0,1	2592	16529	475	2965	0,85	0,85	0,00	0,00
0,5	0,4	0,2	2450	15770	617	3724	0,80	0,81	-0,01	0,00
0,5	0,4	0,3	2317	15060	750	4434	0,76	0,77	-0,02	-0,01
0,5	0,4	0,4	2144	14205	923	5289	0,70	0,73	-0,03	-0,01
0,5	0,4	0,5	1985	13007	1082	6487	0,65	0,67	-0,02	-0,01
0,5	0,5	0,1	2476	16098	591	3396	0,81	0,83	-0,02	-0,01
0,5	0,5	0,2	2334	15339	733	4155	0,76	0,79	-0,03	-0,01
0,5	0,5	0,3	2201	14629	866	4865	0,72	0,75	-0,03	-0,01
0,5	0,5	0,4	2028	13774	1039	5720	0,66	0,71	-0,05	-0,02
0,5	0,5	0,5	1869	12576	1198	6918	0,61	0,65	-0,04	-0,01
1	0,1	0,1	3002	18819	65	675	0,98	0,97	0,01	0,00
1	0,1	0,2	2975	18472	92	1022	0,97	0,95	0,02	0,01
1	0,1	0,3	2931	18180	136	1314	0,96	0,93	0,02	0,01
1	0,1	0,4	2880	17680	187	1814	0,94	0,91	0,03	0,01
1	0,1	0,5	2782	17218	285	2276	0,91	0,88	0,02	0,01
1	0,2	0,1	2952	18434	115	1060	0,96	0,95	0,02	0,00
1	0,2	0,2	2925	18087	142	1407	0,95	0,93	0,03	0,01
1	0,2	0,3	2881	17795	186	1699	0,94	0,91	0,03	0,01
1	0,2	0,4	2830	17295	237	2199	0,92	0,89	0,04	0,01
1	0,2	0,5	2732	16833	335	2661	0,89	0,86	0,03	0,01
1	0,3	0,1	2892	18234	175	1260	0,94	0,94	0,01	0,00
1	0,3	0,2	2865	17887	202	1607	0,93	0,92	0,02	0,00
1	0,3	0,3	2821	17595	246	1899	0,92	0,90	0,02	0,01
1	0,3	0,4	2770	17095	297	2399	0,90	0,88	0,03	0,01
1	0,3	0,5	2672	16633	395	2861	0,87	0,85	0,02	0,01
1	0,4	0,1	2857	17956	210	1538	0,93	0,92	0,01	0,00
1	0,4	0,2	2830	17609	237	1885	0,92	0,90	0,02	0,01
1	0,4	0,3	2786	17317	281	2177	0,91	0,89	0,02	0,01
1	0,4	0,4	2735	16817	332	2677	0,89	0,86	0,03	0,01
1	0,4	0,5	2637	16355	430	3139	0,86	0,84	0,02	0,01
1	0,5	0,1	2824	17618	243	1876	0,92	0,90	0,02	0,01
1	0,5	0,2	2797	17271	270	2223	0,91	0,89	0,03	0,01
1	0,5	0,3	2753	16979	314	2515	0,90	0,87	0,03	0,01
1	0,5	0,4	2702	16479	365	3015	0,88	0,85	0,04	0,01
1	0,5	0,5	2604	16017	463	3477	0,85	0,82	0,03	0,01

Anexo I. Matriz de contingencia tasa genérica, validación. RENO

En este anexo se presenta el detalle de la matriz de contingencia del indicador tasa genérica de momento sísmico para el período de validación. Los resultados están divididos por el tipo de banda utilizada y el parámetro óptimo de cada caso.

Tabla II. Matriz de contingencia del indicador tasa genérica de momento sísmico para el período de validación.

Período	Banda	Parámetros ξ ub lb	Matriz de contingencia				Métricas			
			TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	Poblacional	0 0,95 0,15	1049	96345	537	30713	0,66	0,76	-0,10	0,00
Validación 2		0 0,95 0,15	537	125088	106	42276	0,84	0,75	0,09	0,00
Global			1586	221433	643	72989	0,71	0,75	-0,04	0,00
Validación 1	Auto-poblacional	0 0,90 0,15	474	40113	1112	86945	0,30	0,32	-0,02	0,00
Validación 2		0 0,90 0,15	257	53947	386	113417	0,40	0,32	0,08	0,00
Global			731	94060	1498	200362	0,33	0,32	0,01	0,00
Validación 1	Proporcional	0 0,20 0,10	952	75204	634	51854	0,60	0,59	0,01	0,00
Validación 2		0 0,20 0,10	422	121732	221	45632	0,66	0,73	-0,07	0,00
Global			1374	196936	855	97486	0,62	0,67	-0,05	0,00

Anexo J. Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, calibración. RENO

Las siguientes tablas corresponden a las matrices de contingencia globales obtenidas para el indicador de aglomeramiento espacial para el período de calibración, al variar el parámetro D*, los percentiles de las distribuciones poblacional y auto-poblacional y las fracciones de la banda proporcional. En rojo se muestran los mayores valores de PSS.

Tabla J1. Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda poblacional. Período de calibración

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,8	0,02	650	194126	1080	280692	0,38	0,41	-0,03	0,00
50	0,8	0,05	768	211850	962	262968	0,44	0,45	0,00	0,00
50	0,8	0,1	888	237900	842	236918	0,51	0,50	0,01	0,00
50	0,8	0,15	964	258612	766	216206	0,56	0,54	0,01	0,00
50	0,8	0,2	1055	279147	675	195671	0,61	0,59	0,02	0,00
50	0,85	0,02	590	180361	1140	294457	0,34	0,38	-0,04	0,00
50	0,85	0,05	708	198085	1022	276733	0,41	0,42	-0,01	0,00
50	0,85	0,1	828	224135	902	250683	0,48	0,47	0,01	0,00
50	0,85	0,15	904	244847	826	229971	0,52	0,52	0,01	0,00
50	0,85	0,2	995	265382	735	209436	0,58	0,56	0,02	0,00
50	0,9	0,02	529	165053	1201	309765	0,31	0,35	-0,04	0,00
50	0,9	0,05	647	182777	1083	292041	0,37	0,38	-0,01	0,00
50	0,9	0,1	767	208827	963	265991	0,44	0,44	0,00	0,00
50	0,9	0,15	843	229539	887	245279	0,49	0,48	0,00	0,00
50	0,9	0,2	934	250074	796	224744	0,54	0,53	0,01	0,00
50	0,95	0,02	418	147144	1312	327674	0,24	0,31	-0,07	0,00
50	0,95	0,05	536	164868	1194	309950	0,31	0,35	-0,04	0,00
50	0,95	0,1	656	190918	1074	283900	0,38	0,40	-0,02	0,00
50	0,95	0,15	732	211630	998	263188	0,42	0,45	-0,02	0,00
50	0,95	0,2	823	232165	907	242653	0,48	0,49	-0,01	0,00
50	0,98	0,02	380	136977	1350	337841	0,22	0,29	-0,07	0,00
50	0,98	0,05	498	154701	1232	320117	0,29	0,33	-0,04	0,00
50	0,98	0,1	618	180751	1112	294067	0,36	0,38	-0,02	0,00
50	0,98	0,15	694	201463	1036	273355	0,40	0,42	-0,02	0,00
50	0,98	0,2	785	221998	945	252820	0,45	0,47	-0,01	0,00
75	0,8	0,02	666	190685	1064	284133	0,38	0,40	-0,02	0,00
75	0,8	0,05	762	209447	968	265371	0,44	0,44	0,00	0,00
75	0,8	0,1	878	233229	852	241589	0,51	0,49	0,02	0,00
75	0,8	0,15	993	255929	737	218889	0,57	0,54	0,03	0,00
75	0,8	0,2	1133	278024	597	196794	0,65	0,59	0,07	0,00
75	0,85	0,02	639	175198	1091	299620	0,37	0,37	0,00	0,00
75	0,85	0,05	735	193960	995	280858	0,42	0,41	0,02	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
75	0,85	0,1	851	217742	879	257076	0,49	0,46	0,03	0,00
75	0,85	0,15	966	240442	764	234376	0,56	0,51	0,05	0,00
75	0,85	0,2	1106	262537	624	212281	0,64	0,55	0,09	0,00
75	0,9	0,02	608	159341	1122	315477	0,35	0,34	0,02	0,00
75	0,9	0,05	704	178103	1026	296715	0,41	0,38	0,03	0,00
75	0,9	0,1	820	201885	910	272933	0,47	0,43	0,05	0,00
75	0,9	0,15	935	224585	795	250233	0,54	0,47	0,07	0,00
75	0,9	0,2	1075	246680	655	228138	0,62	0,52	0,10	0,00
75	0,95	0,02	422	144243	1308	330575	0,24	0,30	-0,06	0,00
75	0,95	0,05	518	163005	1212	311813	0,30	0,34	-0,04	0,00
75	0,95	0,1	634	186787	1096	288031	0,37	0,39	-0,03	0,00
75	0,95	0,15	749	209487	981	265331	0,43	0,44	-0,01	0,00
75	0,95	0,2	889	231582	841	243236	0,51	0,49	0,03	0,00
75	0,98	0,02	380	135152	1350	339666	0,22	0,28	-0,06	0,00
75	0,98	0,05	476	153914	1254	320904	0,28	0,32	-0,05	0,00
75	0,98	0,1	592	177696	1138	297122	0,34	0,37	-0,03	0,00
75	0,98	0,15	707	200396	1023	274422	0,41	0,42	-0,01	0,00
75	0,98	0,2	847	222491	883	252327	0,49	0,47	0,02	0,00
100	0,8	0,02	633	196158	1097	278660	0,37	0,41	-0,05	0,00
100	0,8	0,05	761	218555	969	256263	0,44	0,46	-0,02	0,00
100	0,8	0,1	872	242285	858	232533	0,50	0,51	-0,01	0,00
100	0,8	0,15	999	262879	731	211939	0,58	0,55	0,02	0,00
100	0,8	0,2	1096	283890	634	190928	0,63	0,60	0,04	0,00
100	0,85	0,02	601	179548	1129	295270	0,35	0,38	-0,03	0,00
100	0,85	0,05	729	201945	1001	272873	0,42	0,43	0,00	0,00
100	0,85	0,1	840	225675	890	249143	0,49	0,48	0,01	0,00
100	0,85	0,15	967	246269	763	228549	0,56	0,52	0,04	0,00
100	0,85	0,2	1064	267280	666	207538	0,62	0,56	0,05	0,00
100	0,9	0,02	534	164663	1196	310155	0,31	0,35	-0,04	0,00
100	0,9	0,05	662	187060	1068	287758	0,38	0,39	-0,01	0,00
100	0,9	0,1	773	210790	957	264028	0,45	0,44	0,00	0,00
100	0,9	0,15	900	231384	830	243434	0,52	0,49	0,03	0,00
100	0,9	0,2	997	252395	733	222423	0,58	0,53	0,04	0,00
100	0,95	0,02	479	146982	1251	327836	0,28	0,31	-0,03	0,00
100	0,95	0,05	607	169379	1123	305439	0,35	0,36	-0,01	0,00
100	0,95	0,1	718	193109	1012	281709	0,42	0,41	0,01	0,00
100	0,95	0,15	845	213703	885	261115	0,49	0,45	0,04	0,00
100	0,95	0,2	942	234714	788	240104	0,54	0,49	0,05	0,00
100	0,98	0,02	373	137640	1357	337178	0,22	0,29	-0,07	0,00
100	0,98	0,05	501	160037	1229	314781	0,29	0,34	-0,05	0,00
100	0,98	0,1	612	183767	1118	291051	0,35	0,39	-0,03	0,00
100	0,98	0,15	739	204361	991	270457	0,43	0,43	0,00	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
100	0,98	0,2	836	225372	894	249446	0,48	0,47	0,01	0,00
125	0,8	0,02	678	198919	1052	275899	0,39	0,42	-0,03	0,00
125	0,8	0,05	751	219701	979	255117	0,43	0,46	-0,03	0,00
125	0,8	0,1	824	244694	906	230124	0,48	0,52	-0,04	0,00
125	0,8	0,15	966	265152	764	209666	0,56	0,56	0,00	0,00
125	0,8	0,2	1037	284173	693	190645	0,60	0,60	0,00	0,00
125	0,85	0,02	665	184187	1065	290631	0,38	0,39	0,00	0,00
125	0,85	0,05	738	204969	992	269849	0,43	0,43	-0,01	0,00
125	0,85	0,1	811	229962	919	244856	0,47	0,48	-0,02	0,00
125	0,85	0,15	953	250420	777	224398	0,55	0,53	0,02	0,00
125	0,85	0,2	1024	269441	706	205377	0,59	0,57	0,02	0,00
125	0,9	0,02	612	167626	1118	307192	0,35	0,35	0,00	0,00
125	0,9	0,05	685	188408	1045	286410	0,40	0,40	0,00	0,00
125	0,9	0,1	758	213401	972	261417	0,44	0,45	-0,01	0,00
125	0,9	0,15	900	233859	830	240959	0,52	0,49	0,03	0,00
125	0,9	0,2	971	252880	759	221938	0,56	0,53	0,03	0,00
125	0,95	0,02	557	149561	1173	325257	0,32	0,31	0,01	0,00
125	0,95	0,05	630	170343	1100	304475	0,36	0,36	0,01	0,00
125	0,95	0,1	703	195336	1027	279482	0,41	0,41	-0,01	0,00
125	0,95	0,15	845	215794	885	259024	0,49	0,45	0,03	0,00
125	0,95	0,2	916	234815	814	240003	0,53	0,49	0,03	0,00
125	0,98	0,02	499	139117	1231	335701	0,29	0,29	0,00	0,00
125	0,98	0,05	572	159899	1158	314919	0,33	0,34	-0,01	0,00
125	0,98	0,1	645	184892	1085	289926	0,37	0,39	-0,02	0,00
125	0,98	0,15	787	205350	943	269468	0,45	0,43	0,02	0,00
125	0,98	0,2	858	224371	872	250447	0,50	0,47	0,02	0,00
150	0,8	0,02	742	201837	988	272981	0,43	0,43	0,00	0,00
150	0,8	0,05	886	220573	844	254245	0,51	0,46	0,05	0,00
150	0,8	0,1	1005	245213	725	229605	0,58	0,52	0,06	0,00
150	0,8	0,15	1032	267239	698	207579	0,60	0,56	0,03	0,00
150	0,8	0,2	1089	288134	641	186684	0,63	0,61	0,02	0,00
150	0,85	0,02	705	186485	1025	288333	0,41	0,39	0,01	0,00
150	0,85	0,05	849	205221	881	269597	0,49	0,43	0,06	0,00
150	0,85	0,1	968	229861	762	244957	0,56	0,48	0,08	0,00
150	0,85	0,15	995	251887	735	222931	0,58	0,53	0,04	0,00
150	0,85	0,2	1052	272782	678	202036	0,61	0,57	0,03	0,00
150	0,9	0,02	624	170131	1106	304687	0,36	0,36	0,00	0,00
150	0,9	0,05	768	188867	962	285951	0,44	0,40	0,05	0,00
150	0,9	0,1	887	213507	843	261311	0,51	0,45	0,06	0,00
150	0,9	0,15	914	235533	816	239285	0,53	0,50	0,03	0,00
150	0,9	0,2	971	256428	759	218390	0,56	0,54	0,02	0,00
150	0,95	0,02	550	149896	1180	324922	0,32	0,32	0,00	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
150	0,95	0,05	694	168632	1036	306186	0,40	0,36	0,05	0,00
150	0,95	0,1	813	193272	917	281546	0,47	0,41	0,06	0,00
150	0,95	0,15	840	215298	890	259520	0,49	0,45	0,03	0,00
150	0,95	0,2	897	236193	833	238625	0,52	0,50	0,02	0,00
150	0,98	0,02	491	138706	1239	336112	0,28	0,29	-0,01	0,00
150	0,98	0,05	635	157442	1095	317376	0,37	0,33	0,04	0,00
150	0,98	0,1	754	182082	976	292736	0,44	0,38	0,05	0,00
150	0,98	0,15	781	204108	949	270710	0,45	0,43	0,02	0,00
150	0,98	0,2	838	225003	892	249815	0,48	0,47	0,01	0,00
175	0,8	0,02	693	206454	1037	268364	0,40	0,43	-0,03	0,00
175	0,8	0,05	770	225158	960	249660	0,45	0,47	-0,03	0,00
175	0,8	0,1	862	248946	868	225872	0,50	0,52	-0,03	0,00
175	0,8	0,15	959	269938	771	204880	0,55	0,57	-0,01	0,00
175	0,8	0,2	990	290332	740	184486	0,57	0,61	-0,04	0,00
175	0,85	0,02	668	192956	1062	281862	0,39	0,41	-0,02	0,00
175	0,85	0,05	745	211660	985	263158	0,43	0,45	-0,02	0,00
175	0,85	0,1	837	235448	893	239370	0,48	0,50	-0,01	0,00
175	0,85	0,15	934	256440	796	218378	0,54	0,54	0,00	0,00
175	0,85	0,2	965	276834	765	197984	0,56	0,58	-0,03	0,00
175	0,9	0,02	639	178155	1091	296663	0,37	0,38	-0,01	0,00
175	0,9	0,05	716	196859	1014	277959	0,41	0,41	0,00	0,00
175	0,9	0,1	808	220647	922	254171	0,47	0,46	0,00	0,00
175	0,9	0,15	905	241639	825	233179	0,52	0,51	0,01	0,00
175	0,9	0,2	936	262033	794	212785	0,54	0,55	-0,01	0,00
175	0,95	0,02	569	157271	1161	317547	0,33	0,33	0,00	0,00
175	0,95	0,05	646	175975	1084	298843	0,37	0,37	0,00	0,00
175	0,95	0,1	738	199763	992	275055	0,43	0,42	0,01	0,00
175	0,95	0,15	835	220755	895	254063	0,48	0,46	0,02	0,00
175	0,95	0,2	866	241149	864	233669	0,50	0,51	-0,01	0,00
175	0,98	0,02	526	144391	1204	330427	0,30	0,30	0,00	0,00
175	0,98	0,05	603	163095	1127	311723	0,35	0,34	0,01	0,00
175	0,98	0,1	695	186883	1035	287935	0,40	0,39	0,01	0,00
175	0,98	0,15	792	207875	938	266943	0,46	0,44	0,02	0,00
175	0,98	0,2	823	228269	907	246549	0,48	0,48	-0,01	0,00
200	0,8	0,02	726	206769	1004	268049	0,42	0,44	-0,02	0,00
200	0,8	0,05	768	226766	962	248052	0,44	0,48	-0,03	0,00
200	0,8	0,1	817	249761	913	225057	0,47	0,53	-0,05	0,00
200	0,8	0,15	937	269682	793	205136	0,54	0,57	-0,03	0,00
200	0,8	0,2	975	288875	755	185943	0,56	0,61	-0,04	0,00
200	0,85	0,02	661	193616	1069	281202	0,38	0,41	-0,03	0,00
200	0,85	0,05	703	213613	1027	261205	0,41	0,45	-0,04	0,00
200	0,85	0,1	752	236608	978	238210	0,43	0,50	-0,06	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
200	0,85	0,15	872	256529	858	218289	0,50	0,54	-0,04	0,00
200	0,85	0,2	910	275722	820	199096	0,53	0,58	-0,05	0,00
200	0,9	0,02	631	177585	1099	297233	0,36	0,37	-0,01	0,00
200	0,9	0,05	673	197582	1057	277236	0,39	0,42	-0,03	0,00
200	0,9	0,1	722	220577	1008	254241	0,42	0,46	-0,05	0,00
200	0,9	0,15	842	240498	888	234320	0,49	0,51	-0,02	0,00
200	0,9	0,2	880	259691	850	215127	0,51	0,55	-0,04	0,00
200	0,95	0,02	577	157700	1153	317118	0,33	0,33	0,00	0,00
200	0,95	0,05	619	177697	1111	297121	0,36	0,37	-0,02	0,00
200	0,95	0,1	668	200692	1062	274126	0,39	0,42	-0,04	0,00
200	0,95	0,15	788	220613	942	254205	0,46	0,46	-0,01	0,00
200	0,95	0,2	826	239806	904	235012	0,48	0,51	-0,03	0,00
200	0,98	0,02	529	143290	1201	331528	0,31	0,30	0,00	0,00
200	0,98	0,05	571	163287	1159	311531	0,33	0,34	-0,01	0,00
200	0,98	0,1	620	186282	1110	288536	0,36	0,39	-0,03	0,00
200	0,98	0,15	740	206203	990	268615	0,43	0,43	-0,01	0,00
200	0,98	0,2	778	225396	952	249422	0,45	0,47	-0,02	0,00

Tabla J2. Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda auto-poblacional. Período de calibración.

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,8	0,02	323	84406	1407	390412	0,19	0,18	0,01	0,00
50	0,8	0,05	344	106721	1386	368097	0,20	0,22	-0,03	0,00
50	0,8	0,1	571	136662	1159	338156	0,33	0,29	0,04	0,00
50	0,8	0,15	672	169024	1058	305794	0,39	0,36	0,03	0,00
50	0,8	0,2	839	200739	891	274079	0,48	0,42	0,06	0,00
50	0,85	0,02	244	68383	1486	406435	0,14	0,14	0,00	0,00
50	0,85	0,05	265	90698	1465	384120	0,15	0,19	-0,04	0,00
50	0,85	0,1	492	120639	1238	354179	0,28	0,25	0,03	0,00
50	0,85	0,15	593	153001	1137	321817	0,34	0,32	0,02	0,00
50	0,85	0,2	760	184716	970	290102	0,44	0,39	0,05	0,00
50	0,9	0,02	131	54495	1599	420323	0,08	0,11	-0,04	0,00
50	0,9	0,05	152	76810	1578	398008	0,09	0,16	-0,07	0,00
50	0,9	0,1	379	106751	1351	368067	0,22	0,22	-0,01	0,00
50	0,9	0,15	480	139113	1250	335705	0,28	0,29	-0,02	0,00
50	0,9	0,2	647	170828	1083	303990	0,37	0,36	0,01	0,00
50	0,95	0,02	100	38481	1630	436337	0,06	0,08	-0,02	0,00
50	0,95	0,05	121	60796	1609	414022	0,07	0,13	-0,06	0,00
50	0,95	0,1	348	90737	1382	384081	0,20	0,19	0,01	0,00
50	0,95	0,15	449	123099	1281	351719	0,26	0,26	0,00	0,00
50	0,95	0,2	616	154814	1114	320004	0,36	0,33	0,03	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,98	0,02	39	28392	1691	446426	0,02	0,06	-0,04	0,00
50	0,98	0,05	60	50707	1670	424111	0,03	0,11	-0,07	0,00
50	0,98	0,1	287	80648	1443	394170	0,17	0,17	0,00	0,00
50	0,98	0,15	388	113010	1342	361808	0,22	0,24	-0,01	0,00
50	0,98	0,2	555	144725	1175	330093	0,32	0,30	0,02	0,00
75	0,8	0,02	341	88000	1389	386818	0,20	0,19	0,01	0,00
75	0,8	0,05	406	111088	1324	363730	0,23	0,23	0,00	0,00
75	0,8	0,1	580	144028	1150	330790	0,34	0,30	0,03	0,00
75	0,8	0,15	743	174885	987	299933	0,43	0,37	0,06	0,00
75	0,8	0,2	894	204416	836	270402	0,52	0,43	0,09	0,00
75	0,85	0,02	223	72547	1507	402271	0,13	0,15	-0,02	0,00
75	0,85	0,05	288	95635	1442	379183	0,17	0,20	-0,03	0,00
75	0,85	0,1	462	128575	1268	346243	0,27	0,27	0,00	0,00
75	0,85	0,15	625	159432	1105	315386	0,36	0,34	0,03	0,00
75	0,85	0,2	776	188963	954	285855	0,45	0,40	0,05	0,00
75	0,9	0,02	119	56605	1611	418213	0,07	0,12	-0,05	0,00
75	0,9	0,05	184	79693	1546	395125	0,11	0,17	-0,06	0,00
75	0,9	0,1	358	112633	1372	362185	0,21	0,24	-0,03	0,00
75	0,9	0,15	521	143490	1209	331328	0,30	0,30	0,00	0,00
75	0,9	0,2	672	173021	1058	301797	0,39	0,36	0,02	0,00
75	0,95	0,02	95	39669	1635	435149	0,05	0,08	-0,03	0,00
75	0,95	0,05	160	62757	1570	412061	0,09	0,13	-0,04	0,00
75	0,95	0,1	334	95697	1396	379121	0,19	0,20	-0,01	0,00
75	0,95	0,15	497	126554	1233	348264	0,29	0,27	0,02	0,00
75	0,95	0,2	648	156085	1082	318733	0,37	0,33	0,05	0,00
75	0,98	0,02	38	29541	1692	445277	0,02	0,06	-0,04	0,00
75	0,98	0,05	103	52629	1627	422189	0,06	0,11	-0,05	0,00
75	0,98	0,1	277	85569	1453	389249	0,16	0,18	-0,02	0,00
75	0,98	0,15	440	116426	1290	358392	0,25	0,25	0,01	0,00
75	0,98	0,2	591	145957	1139	328861	0,34	0,31	0,03	0,00
100	0,8	0,02	407	92940	1323	381878	0,24	0,20	0,04	0,00
100	0,8	0,05	454	115736	1276	359082	0,26	0,24	0,02	0,00
100	0,8	0,1	619	150793	1111	324025	0,36	0,32	0,04	0,00
100	0,8	0,15	807	182453	923	292365	0,47	0,38	0,08	0,00
100	0,8	0,2	922	212397	808	262421	0,53	0,45	0,09	0,00
100	0,85	0,02	279	75122	1451	399696	0,16	0,16	0,00	0,00
100	0,85	0,05	326	97918	1404	376900	0,19	0,21	-0,02	0,00
100	0,85	0,1	491	132975	1239	341843	0,28	0,28	0,00	0,00
100	0,85	0,15	679	164635	1051	310183	0,39	0,35	0,05	0,00
100	0,85	0,2	794	194579	936	280239	0,46	0,41	0,05	0,00
100	0,9	0,02	207	56754	1523	418064	0,12	0,12	0,00	0,00
100	0,9	0,05	254	79550	1476	395268	0,15	0,17	-0,02	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
100	0,9	0,1	419	114607	1311	360211	0,24	0,24	0,00	0,00
100	0,9	0,15	607	146267	1123	328551	0,35	0,31	0,04	0,00
100	0,9	0,2	722	176211	1008	298607	0,42	0,37	0,05	0,00
100	0,95	0,02	125	40065	1605	434753	0,07	0,08	-0,01	0,00
100	0,95	0,05	172	62861	1558	411957	0,10	0,13	-0,03	0,00
100	0,95	0,1	337	97918	1393	376900	0,19	0,21	-0,01	0,00
100	0,95	0,15	525	129578	1205	345240	0,30	0,27	0,03	0,00
100	0,95	0,2	640	159522	1090	315296	0,37	0,34	0,03	0,00
100	0,98	0,02	84	30532	1646	444286	0,05	0,06	-0,02	0,00
100	0,98	0,05	131	53328	1599	421490	0,08	0,11	-0,04	0,00
100	0,98	0,1	296	88385	1434	386433	0,17	0,19	-0,02	0,00
100	0,98	0,15	484	120045	1246	354773	0,28	0,25	0,03	0,00
100	0,98	0,2	599	149989	1131	324829	0,35	0,32	0,03	0,00
125	0,8	0,02	449	92594	1281	382224	0,26	0,20	0,06	0,00
125	0,8	0,05	540	117350	1190	357468	0,31	0,25	0,06	0,00
125	0,8	0,1	637	151264	1093	323554	0,37	0,32	0,05	0,00
125	0,8	0,15	786	182005	944	292813	0,45	0,38	0,07	0,00
125	0,8	0,2	928	210564	802	264254	0,54	0,44	0,09	0,00
125	0,85	0,02	354	75400	1376	399418	0,20	0,16	0,05	0,00
125	0,85	0,05	445	100156	1285	374662	0,26	0,21	0,05	0,00
125	0,85	0,1	542	134070	1188	340748	0,31	0,28	0,03	0,00
125	0,85	0,15	691	164811	1039	310007	0,40	0,35	0,05	0,00
125	0,85	0,2	833	193370	897	281448	0,48	0,41	0,07	0,00
125	0,9	0,02	199	58389	1531	416429	0,12	0,12	-0,01	0,00
125	0,9	0,05	290	83145	1440	391673	0,17	0,18	-0,01	0,00
125	0,9	0,1	387	117059	1343	357759	0,22	0,25	-0,02	0,00
125	0,9	0,15	536	147800	1194	327018	0,31	0,31	0,00	0,00
125	0,9	0,2	678	176359	1052	298459	0,39	0,37	0,02	0,00
125	0,95	0,02	160	41395	1570	433423	0,09	0,09	0,01	0,00
125	0,95	0,05	251	66151	1479	408667	0,15	0,14	0,01	0,00
125	0,95	0,1	348	100065	1382	374753	0,20	0,21	-0,01	0,00
125	0,95	0,15	497	130806	1233	344012	0,29	0,28	0,01	0,00
125	0,95	0,2	639	159365	1091	315453	0,37	0,34	0,03	0,00
125	0,98	0,02	73	31171	1657	443647	0,04	0,07	-0,02	0,00
125	0,98	0,05	164	55927	1566	418891	0,09	0,12	-0,02	0,00
125	0,98	0,1	261	89841	1469	384977	0,15	0,19	-0,04	0,00
125	0,98	0,15	410	120582	1320	354236	0,24	0,25	-0,02	0,00
125	0,98	0,2	552	149141	1178	325677	0,32	0,31	0,00	0,00
150	0,8	0,02	385	95374	1345	379444	0,22	0,20	0,02	0,00
150	0,8	0,05	442	120098	1288	354720	0,26	0,25	0,00	0,00
150	0,8	0,1	658	154505	1072	320313	0,38	0,33	0,05	0,00
150	0,8	0,15	755	182229	975	292589	0,44	0,38	0,05	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
150	0,8	0,2	842	208685	888	266133	0,49	0,44	0,05	0,00
150	0,85	0,02	328	78071	1402	396747	0,19	0,16	0,03	0,00
150	0,85	0,05	385	102795	1345	372023	0,22	0,22	0,01	0,00
150	0,85	0,1	601	137202	1129	337616	0,35	0,29	0,06	0,00
150	0,85	0,15	698	164926	1032	309892	0,40	0,35	0,06	0,00
150	0,85	0,2	785	191382	945	283436	0,45	0,40	0,05	0,00
150	0,9	0,02	210	58735	1520	416083	0,12	0,12	0,00	0,00
150	0,9	0,05	267	83459	1463	391359	0,15	0,18	-0,02	0,00
150	0,9	0,1	483	117866	1247	356952	0,28	0,25	0,03	0,00
150	0,9	0,15	580	145590	1150	329228	0,34	0,31	0,03	0,00
150	0,9	0,2	667	172046	1063	302772	0,39	0,36	0,02	0,00
150	0,95	0,02	155	41583	1575	433235	0,09	0,09	0,00	0,00
150	0,95	0,05	212	66307	1518	408511	0,12	0,14	-0,02	0,00
150	0,95	0,1	428	100714	1302	374104	0,25	0,21	0,04	0,00
150	0,95	0,15	525	128438	1205	346380	0,30	0,27	0,03	0,00
150	0,95	0,2	612	154894	1118	319924	0,35	0,33	0,03	0,00
150	0,98	0,02	80	30385	1650	444433	0,05	0,06	-0,02	0,00
150	0,98	0,05	137	55109	1593	419709	0,08	0,12	-0,04	0,00
150	0,98	0,1	353	89516	1377	385302	0,20	0,19	0,02	0,00
150	0,98	0,15	450	117240	1280	357578	0,26	0,25	0,01	0,00
150	0,98	0,2	537	143696	1193	331122	0,31	0,30	0,01	0,00
175	0,8	0,02	365	96784	1365	378034	0,21	0,20	0,01	0,00
175	0,8	0,05	479	121067	1251	353751	0,28	0,25	0,02	0,00
175	0,8	0,1	645	154251	1085	320567	0,37	0,32	0,05	0,00
175	0,8	0,15	710	181329	1020	293489	0,41	0,38	0,03	0,00
175	0,8	0,2	759	206855	971	267963	0,44	0,44	0,00	0,00
175	0,85	0,02	304	77629	1426	397189	0,18	0,16	0,01	0,00
175	0,85	0,05	418	101912	1312	372906	0,24	0,21	0,03	0,00
175	0,85	0,1	584	135096	1146	339722	0,34	0,28	0,05	0,00
175	0,85	0,15	649	162174	1081	312644	0,38	0,34	0,03	0,00
175	0,85	0,2	698	187700	1032	287118	0,40	0,40	0,01	0,00
175	0,9	0,02	228	58652	1502	416166	0,13	0,12	0,01	0,00
175	0,9	0,05	342	82935	1388	391883	0,20	0,17	0,02	0,00
175	0,9	0,1	508	116119	1222	358699	0,29	0,24	0,05	0,00
175	0,9	0,15	573	143197	1157	331621	0,33	0,30	0,03	0,00
175	0,9	0,2	622	168723	1108	306095	0,36	0,36	0,00	0,00
175	0,95	0,02	106	40999	1624	433819	0,06	0,09	-0,03	0,00
175	0,95	0,05	220	65282	1510	409536	0,13	0,14	-0,01	0,00
175	0,95	0,1	386	98466	1344	376352	0,22	0,21	0,02	0,00
175	0,95	0,15	451	125544	1279	349274	0,26	0,26	0,00	0,00
175	0,95	0,2	500	151070	1230	323748	0,29	0,32	-0,03	0,00
175	0,98	0,02	28	28733	1702	446085	0,02	0,06	-0,04	-0,01

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
175	0,98	0,05	142	53016	1588	421802	0,08	0,11	-0,03	0,00
175	0,98	0,1	308	86200	1422	388618	0,18	0,18	0,00	0,00
175	0,98	0,15	373	113278	1357	361540	0,22	0,24	-0,02	0,00
175	0,98	0,2	422	138804	1308	336014	0,24	0,29	-0,05	0,00
200	0,8	0,02	370	98047	1360	376771	0,21	0,21	0,01	0,00
200	0,8	0,05	455	119840	1275	354978	0,26	0,25	0,01	0,00
200	0,8	0,1	617	152136	1113	322682	0,36	0,32	0,04	0,00
200	0,8	0,15	673	179313	1057	295505	0,39	0,38	0,01	0,00
200	0,8	0,2	745	206434	985	268384	0,43	0,43	0,00	0,00
200	0,85	0,02	341	78742	1389	396076	0,20	0,17	0,03	0,00
200	0,85	0,05	426	100535	1304	374283	0,25	0,21	0,03	0,00
200	0,85	0,1	588	132831	1142	341987	0,34	0,28	0,06	0,00
200	0,85	0,15	644	160008	1086	314810	0,37	0,34	0,04	0,00
200	0,85	0,2	716	187129	1014	287689	0,41	0,39	0,02	0,00
200	0,9	0,02	220	60357	1510	414461	0,13	0,13	0,00	0,00
200	0,9	0,05	305	82150	1425	392668	0,18	0,17	0,00	0,00
200	0,9	0,1	467	114446	1263	360372	0,27	0,24	0,03	0,00
200	0,9	0,15	523	141623	1207	333195	0,30	0,30	0,00	0,00
200	0,9	0,2	595	168744	1135	306074	0,34	0,36	-0,01	0,00
200	0,95	0,02	130	43218	1600	431600	0,08	0,09	-0,02	0,00
200	0,95	0,05	215	65011	1515	409807	0,12	0,14	-0,01	0,00
200	0,95	0,1	377	97307	1353	377511	0,22	0,20	0,01	0,00
200	0,95	0,15	433	124484	1297	350334	0,25	0,26	-0,01	0,00
200	0,95	0,2	505	151605	1225	323213	0,29	0,32	-0,03	0,00
200	0,98	0,02	29	31124	1701	443694	0,02	0,07	-0,05	-0,01
200	0,98	0,05	114	52917	1616	421901	0,07	0,11	-0,05	0,00
200	0,98	0,1	276	85213	1454	389605	0,16	0,18	-0,02	0,00
200	0,98	0,15	332	112390	1398	362428	0,19	0,24	-0,04	0,00
200	0,98	0,2	404	139511	1326	335307	0,23	0,29	-0,06	0,00

Tabla J3. Matriz de contingencia global para el indicador aglomeramiento espacial utilizando la banda proporcional. Período de calibración.

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,1	0,1	1512	387862	218	86956	0,87	0,82	0,06	0,00
50	0,1	0,2	1375	342331	355	132487	0,79	0,72	0,07	0,00
50	0,1	0,3	1211	306523	519	168295	0,70	0,65	0,05	0,00
50	0,1	0,4	1061	277574	669	197244	0,61	0,58	0,03	0,00
50	0,1	0,5	968	252711	762	222107	0,56	0,53	0,03	0,00
50	0,2	0,1	1311	347406	419	127412	0,76	0,73	0,03	0,00
50	0,2	0,2	1174	301875	556	172943	0,68	0,64	0,04	0,00
50	0,2	0,3	1010	266067	720	208751	0,58	0,56	0,02	0,00
50	0,2	0,4	860	237118	870	237700	0,50	0,50	0,00	0,00
50	0,2	0,5	767	212255	963	262563	0,44	0,45	0,00	0,00
50	0,3	0,1	1161	316085	569	158733	0,67	0,67	0,01	0,00
50	0,3	0,2	1024	270554	706	204264	0,59	0,57	0,02	0,00
50	0,3	0,3	860	234746	870	240072	0,50	0,49	0,00	0,00
50	0,3	0,4	710	205797	1020	269021	0,41	0,43	-0,02	0,00
50	0,3	0,5	617	180934	1113	293884	0,36	0,38	-0,02	0,00
50	0,4	0,1	1059	289767	671	185051	0,61	0,61	0,00	0,00
50	0,4	0,2	922	244236	808	230582	0,53	0,51	0,02	0,00
50	0,4	0,3	758	208428	972	266390	0,44	0,44	0,00	0,00
50	0,4	0,4	608	179479	1122	295339	0,35	0,38	-0,03	0,00
50	0,4	0,5	515	154616	1215	320202	0,30	0,33	-0,03	0,00
50	0,5	0,1	981	269063	749	205755	0,57	0,57	0,00	0,00
50	0,5	0,2	844	223532	886	251286	0,49	0,47	0,02	0,00
50	0,5	0,3	680	187724	1050	287094	0,39	0,40	0,00	0,00
50	0,5	0,4	530	158775	1200	316043	0,31	0,33	-0,03	0,00
50	0,5	0,5	437	133912	1293	340906	0,25	0,28	-0,03	0,00
75	0,1	0,1	1322	362469	408	112349	0,76	0,76	0,00	0,00
75	0,1	0,2	1158	312958	572	161860	0,67	0,66	0,01	0,00
75	0,1	0,3	1029	270123	701	204695	0,59	0,57	0,03	0,00
75	0,1	0,4	825	241151	905	233667	0,48	0,51	-0,03	0,00
75	0,1	0,5	773	226153	957	248665	0,45	0,48	-0,03	0,00
75	0,2	0,1	1099	310242	631	164576	0,64	0,65	-0,02	0,00
75	0,2	0,2	935	260731	795	214087	0,54	0,55	-0,01	0,00
75	0,2	0,3	806	217896	924	256922	0,47	0,46	0,01	0,00
75	0,2	0,4	602	188924	1128	285894	0,35	0,40	-0,05	0,00
75	0,2	0,5	550	173926	1180	300892	0,32	0,37	-0,05	0,00
75	0,3	0,1	918	273988	812	200830	0,53	0,58	-0,05	0,00
75	0,3	0,2	754	224477	976	250341	0,44	0,47	-0,04	0,00
75	0,3	0,3	625	181642	1105	293176	0,36	0,38	-0,02	0,00
75	0,3	0,4	421	152670	1309	322148	0,24	0,32	-0,08	0,00
75	0,3	0,5	369	137672	1361	337146	0,21	0,29	-0,08	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
75	0,4	0,1	846	244054	884	230764	0,49	0,51	-0,02	0,00
75	0,4	0,2	682	194543	1048	280275	0,39	0,41	-0,02	0,00
75	0,4	0,3	553	151708	1177	323110	0,32	0,32	0,00	0,00
75	0,4	0,4	349	122736	1381	352082	0,20	0,26	-0,06	0,00
75	0,4	0,5	297	107738	1433	367080	0,17	0,23	-0,06	0,00
75	0,5	0,1	828	219294	902	255524	0,48	0,46	0,02	0,00
75	0,5	0,2	664	169783	1066	305035	0,38	0,36	0,03	0,00
75	0,5	0,3	535	126948	1195	347870	0,31	0,27	0,04	0,00
75	0,5	0,4	331	97976	1399	376842	0,19	0,21	-0,02	0,00
75	0,5	0,5	279	82978	1451	391840	0,16	0,17	-0,01	0,00
100	0,1	0,1	1306	334975	424	139843	0,75	0,71	0,05	0,00
100	0,1	0,2	1076	274935	654	199883	0,62	0,58	0,04	0,00
100	0,1	0,3	849	232926	881	241892	0,49	0,49	0,00	0,00
100	0,1	0,4	715	209852	1015	264966	0,41	0,44	-0,03	0,00
100	0,1	0,5	695	199969	1035	274849	0,40	0,42	-0,02	0,00
100	0,2	0,1	1130	277456	600	197362	0,65	0,58	0,07	0,00
100	0,2	0,2	900	217416	830	257402	0,52	0,46	0,06	0,00
100	0,2	0,3	673	175407	1057	299411	0,39	0,37	0,02	0,00
100	0,2	0,4	539	152333	1191	322485	0,31	0,32	-0,01	0,00
100	0,2	0,5	519	142450	1211	332368	0,30	0,30	0,00	0,00
100	0,3	0,1	919	236415	811	238403	0,53	0,50	0,03	0,00
100	0,3	0,2	689	176375	1041	298443	0,40	0,37	0,03	0,00
100	0,3	0,3	462	134366	1268	340452	0,27	0,28	-0,02	0,00
100	0,3	0,4	328	111292	1402	363526	0,19	0,23	-0,04	0,00
100	0,3	0,5	308	101409	1422	373409	0,18	0,21	-0,04	0,00
100	0,4	0,1	872	207158	858	267660	0,50	0,44	0,07	0,00
100	0,4	0,2	642	147118	1088	327700	0,37	0,31	0,06	0,00
100	0,4	0,3	415	105109	1315	369709	0,24	0,22	0,02	0,00
100	0,4	0,4	281	82035	1449	392783	0,16	0,17	-0,01	0,00
100	0,4	0,5	261	72152	1469	402666	0,15	0,15	0,00	0,00
100	0,5	0,1	855	185449	875	289369	0,49	0,39	0,10	0,00
100	0,5	0,2	625	125409	1105	349409	0,36	0,26	0,10	0,00
100	0,5	0,3	398	83400	1332	391418	0,23	0,18	0,05	0,00
100	0,5	0,4	264	60326	1466	414492	0,15	0,13	0,03	0,00
100	0,5	0,5	244	50443	1486	424375	0,14	0,11	0,03	0,00
125	0,1	0,1	1283	311279	447	163539	0,74	0,66	0,09	0,00
125	0,1	0,2	1031	241345	699	233473	0,60	0,51	0,09	0,00
125	0,1	0,3	836	202099	894	272719	0,48	0,43	0,06	0,00
125	0,1	0,4	752	184889	978	289929	0,43	0,39	0,05	0,00
125	0,1	0,5	730	179738	1000	295080	0,42	0,38	0,04	0,00
125	0,2	0,1	1070	248530	660	226288	0,62	0,52	0,10	0,00
125	0,2	0,2	818	178596	912	296222	0,47	0,38	0,10	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
125	0,2	0,3	623	139350	1107	335468	0,36	0,29	0,07	0,00
125	0,2	0,4	539	122140	1191	352678	0,31	0,26	0,05	0,00
125	0,2	0,5	517	116989	1213	357829	0,30	0,25	0,05	0,00
125	0,3	0,1	852	207396	878	267422	0,49	0,44	0,06	0,00
125	0,3	0,2	600	137462	1130	337356	0,35	0,29	0,06	0,00
125	0,3	0,3	405	98216	1325	376602	0,23	0,21	0,03	0,00
125	0,3	0,4	321	81006	1409	393812	0,19	0,17	0,01	0,00
125	0,3	0,5	299	75855	1431	398963	0,17	0,16	0,01	0,00
125	0,4	0,1	793	179811	937	295007	0,46	0,38	0,08	0,00
125	0,4	0,2	541	109877	1189	364941	0,31	0,23	0,08	0,00
125	0,4	0,3	346	70631	1384	404187	0,20	0,15	0,05	0,00
125	0,4	0,4	262	53421	1468	421397	0,15	0,11	0,04	0,00
125	0,4	0,5	240	48270	1490	426548	0,14	0,10	0,04	0,00
125	0,5	0,1	699	161330	1031	313488	0,40	0,34	0,06	0,00
125	0,5	0,2	447	91396	1283	383422	0,26	0,19	0,07	0,00
125	0,5	0,3	252	52150	1478	422668	0,15	0,11	0,04	0,00
125	0,5	0,4	168	34940	1562	439878	0,10	0,07	0,02	0,00
125	0,5	0,5	146	29789	1584	445029	0,08	0,06	0,02	0,00
150	0,1	0,1	1243	285448	487	189370	0,72	0,60	0,12	0,00
150	0,1	0,2	824	210649	906	264169	0,48	0,44	0,03	0,00
150	0,1	0,3	704	175730	1026	299088	0,41	0,37	0,04	0,00
150	0,1	0,4	674	164591	1056	310227	0,39	0,35	0,04	0,00
150	0,1	0,5	664	162361	1066	312457	0,38	0,34	0,04	0,00
150	0,2	0,1	1036	219935	694	254883	0,60	0,46	0,14	0,00
150	0,2	0,2	617	145136	1113	329682	0,36	0,31	0,05	0,00
150	0,2	0,3	497	110217	1233	364601	0,29	0,23	0,06	0,00
150	0,2	0,4	467	99078	1263	375740	0,27	0,21	0,06	0,00
150	0,2	0,5	457	96848	1273	377970	0,26	0,20	0,06	0,00
150	0,3	0,1	826	179510	904	295308	0,48	0,38	0,10	0,00
150	0,3	0,2	407	104711	1323	370107	0,24	0,22	0,01	0,00
150	0,3	0,3	287	69792	1443	405026	0,17	0,15	0,02	0,00
150	0,3	0,4	257	58653	1473	416165	0,15	0,12	0,03	0,00
150	0,3	0,5	247	56423	1483	418395	0,14	0,12	0,02	0,00
150	0,4	0,1	672	153579	1058	321239	0,39	0,32	0,06	0,00
150	0,4	0,2	253	78780	1477	396038	0,15	0,17	-0,02	0,00
150	0,4	0,3	133	43861	1597	430957	0,08	0,09	-0,02	0,00
150	0,4	0,4	103	32722	1627	442096	0,06	0,07	-0,01	0,00
150	0,4	0,5	93	30492	1637	444326	0,05	0,06	-0,01	0,00
150	0,5	0,1	627	140347	1103	334471	0,36	0,30	0,07	0,00
150	0,5	0,2	208	65548	1522	409270	0,12	0,14	-0,02	0,00
150	0,5	0,3	88	30629	1642	444189	0,05	0,06	-0,01	0,00
150	0,5	0,4	58	19490	1672	455328	0,03	0,04	-0,01	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
150	0,5	0,5	48	17260	1682	457558	0,03	0,04	-0,01	0,00
175	0,1	0,1	1101	260834	629	213984	0,64	0,55	0,09	0,00
175	0,1	0,2	709	186994	1021	287824	0,41	0,39	0,02	0,00
175	0,1	0,3	626	155471	1104	319347	0,36	0,33	0,03	0,00
175	0,1	0,4	604	148950	1126	325868	0,35	0,31	0,04	0,00
175	0,1	0,5	604	148201	1126	326617	0,35	0,31	0,04	0,00
175	0,2	0,1	739	189485	991	285333	0,43	0,40	0,03	0,00
175	0,2	0,2	347	115645	1383	359173	0,20	0,24	-0,04	0,00
175	0,2	0,3	264	84122	1466	390696	0,15	0,18	-0,02	0,00
175	0,2	0,4	242	77601	1488	397217	0,14	0,16	-0,02	0,00
175	0,2	0,5	242	76852	1488	397966	0,14	0,16	-0,02	0,00
175	0,3	0,1	584	150145	1146	324673	0,34	0,32	0,02	0,00
175	0,3	0,2	192	76305	1538	398513	0,11	0,16	-0,05	0,00
175	0,3	0,3	109	44782	1621	430036	0,06	0,09	-0,03	0,00
175	0,3	0,4	87	38261	1643	436557	0,05	0,08	-0,03	0,00
175	0,3	0,5	87	37512	1643	437306	0,05	0,08	-0,03	0,00
175	0,4	0,1	543	130303	1187	344515	0,31	0,27	0,04	0,00
175	0,4	0,2	151	56463	1579	418355	0,09	0,12	-0,03	0,00
175	0,4	0,3	68	24940	1662	449878	0,04	0,05	-0,01	0,00
175	0,4	0,4	46	18419	1684	456399	0,03	0,04	-0,01	0,00
175	0,4	0,5	46	17670	1684	457148	0,03	0,04	-0,01	0,00
175	0,5	0,1	526	121144	1204	353674	0,30	0,26	0,05	0,00
175	0,5	0,2	134	47304	1596	427514	0,08	0,10	-0,02	0,00
175	0,5	0,3	51	15781	1679	459037	0,03	0,03	0,00	0,00
175	0,5	0,4	29	9260	1701	465558	0,02	0,02	0,00	0,00
175	0,5	0,5	29	8511	1701	466307	0,02	0,02	0,00	0,00
200	0,1	0,1	729	230570	1001	244248	0,42	0,49	-0,06	0,00
200	0,1	0,2	475	156882	1255	317936	0,27	0,33	-0,06	0,00
200	0,1	0,3	450	133144	1280	341674	0,26	0,28	-0,02	0,00
200	0,1	0,4	437	129745	1293	345073	0,25	0,27	-0,02	0,00
200	0,1	0,5	437	129569	1293	345249	0,25	0,27	-0,02	0,00
200	0,2	0,1	438	158594	1292	316224	0,25	0,33	-0,08	0,00
200	0,2	0,2	184	84906	1546	389912	0,11	0,18	-0,07	0,00
200	0,2	0,3	159	61168	1571	413650	0,09	0,13	-0,04	0,00
200	0,2	0,4	146	57769	1584	417049	0,08	0,12	-0,04	0,00
200	0,2	0,5	146	57593	1584	417225	0,08	0,12	-0,04	0,00
200	0,3	0,1	347	123942	1383	350876	0,20	0,26	-0,06	0,00
200	0,3	0,2	93	50254	1637	424564	0,05	0,11	-0,05	0,00
200	0,3	0,3	68	26516	1662	448302	0,04	0,06	-0,02	0,00
200	0,3	0,4	55	23117	1675	451701	0,03	0,05	-0,02	0,00
200	0,3	0,5	55	22941	1675	451877	0,03	0,05	-0,02	0,00
200	0,4	0,1	302	108864	1428	365954	0,17	0,23	-0,05	0,00

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
200	0,4	0,2	48	35176	1682	439642	0,03	0,07	-0,05	0,00
200	0,4	0,3	23	11438	1707	463380	0,01	0,02	-0,01	0,00
200	0,4	0,4	10	8039	1720	466779	0,01	0,02	-0,01	0,00
200	0,4	0,5	10	7863	1720	466955	0,01	0,02	-0,01	0,00
200	0,5	0,1	299	104144	1431	370674	0,17	0,22	-0,05	0,00
200	0,5	0,2	45	30456	1685	444362	0,03	0,06	-0,04	0,00
200	0,5	0,3	20	6718	1710	468100	0,01	0,01	0,00	0,00
200	0,5	0,4	7	3319	1723	471499	0,00	0,01	0,00	0,00
200	0,5	0,5	7	3143	1723	471675	0,00	0,01	0,00	0,00

Anexo K. Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, calibración. Creighton

A continuación se presentan las matrices de contingencia y métricas de desempeño para el indicador aglomeramiento espacial en el período de calibración para la Mina Creighton. En rojo se muestran los mayores valores de PSS.

Tabla K1. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda poblacional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,8	0,02	1315	7825	1752	11669	0,43	0,40	0,03	0,01
50	0,8	0,05	1379	10265	1688	9229	0,45	0,53	-0,08	-0,04
50	0,8	0,1	1427	10663	1640	8831	0,47	0,55	-0,08	-0,04
50	0,8	0,15	1500	10936	1567	8558	0,49	0,56	-0,07	-0,03
50	0,8	0,2	1580	11388	1487	8106	0,52	0,58	-0,07	-0,03
50	0,85	0,02	1188	6678	1879	12816	0,39	0,34	0,04	0,03
50	0,85	0,05	1252	9118	1815	10376	0,41	0,47	-0,06	-0,03
50	0,85	0,1	1300	9516	1767	9978	0,42	0,49	-0,06	-0,03
50	0,85	0,15	1373	9789	1694	9705	0,45	0,50	-0,05	-0,03
50	0,85	0,2	1453	10241	1614	9253	0,47	0,53	-0,05	-0,02
50	0,9	0,02	951	5502	2116	13992	0,31	0,28	0,03	0,02
50	0,9	0,05	1015	7942	2052	11552	0,33	0,41	-0,08	-0,04
50	0,9	0,1	1063	8340	2004	11154	0,35	0,43	-0,08	-0,04
50	0,9	0,15	1136	8613	1931	10881	0,37	0,44	-0,07	-0,04
50	0,9	0,2	1216	9065	1851	10429	0,40	0,47	-0,07	-0,03
50	0,95	0,02	796	3919	2271	15575	0,26	0,20	0,06	0,05
50	0,95	0,05	860	6359	2207	13135	0,28	0,33	-0,05	-0,03
50	0,95	0,1	908	6757	2159	12737	0,30	0,35	-0,05	-0,03
50	0,95	0,15	981	7030	2086	12464	0,32	0,36	-0,04	-0,02
50	0,95	0,2	1061	7482	2006	12012	0,35	0,38	-0,04	-0,02
50	0,98	0,02	756	3413	2311	16081	0,25	0,18	0,07	0,06
50	0,98	0,05	820	5853	2247	13641	0,27	0,30	-0,03	-0,02
50	0,98	0,1	868	6251	2199	13243	0,28	0,32	-0,04	-0,02
50	0,98	0,15	941	6524	2126	12970	0,31	0,33	-0,03	-0,02
50	0,98	0,2	1021	6976	2046	12518	0,33	0,36	-0,02	-0,01
75	0,8	0,02	1266	6891	1801	12603	0,41	0,35	0,06	0,03
75	0,8	0,05	1334	9337	1733	10157	0,43	0,48	-0,04	-0,02
75	0,8	0,1	1397	10140	1670	9354	0,46	0,52	-0,06	-0,03
75	0,8	0,15	1519	10645	1548	8849	0,50	0,55	-0,05	-0,02
75	0,8	0,2	1593	11237	1474	8257	0,52	0,58	-0,06	-0,02
75	0,85	0,02	1107	5920	1960	13574	0,36	0,30	0,06	0,04
75	0,85	0,05	1175	8366	1892	11128	0,38	0,43	-0,05	-0,02

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
75	0,85	0,1	1238	9169	1829	10325	0,40	0,47	-0,07	-0,03
75	0,85	0,15	1360	9674	1707	9820	0,44	0,50	-0,05	-0,03
75	0,85	0,2	1434	10266	1633	9228	0,47	0,53	-0,06	-0,03
75	0,9	0,02	1013	5124	2054	14370	0,33	0,26	0,07	0,05
75	0,9	0,05	1081	7570	1986	11924	0,35	0,39	-0,04	-0,02
75	0,9	0,1	1144	8373	1923	11121	0,37	0,43	-0,06	-0,03
75	0,9	0,15	1266	8878	1801	10616	0,41	0,46	-0,04	-0,02
75	0,9	0,2	1340	9470	1727	10024	0,44	0,49	-0,05	-0,02
75	0,95	0,02	775	3782	2292	15712	0,25	0,19	0,06	0,05
75	0,95	0,05	843	6228	2224	13266	0,27	0,32	-0,04	-0,03
75	0,95	0,1	906	7031	2161	12463	0,30	0,36	-0,07	-0,04
75	0,95	0,15	1028	7536	2039	11958	0,34	0,39	-0,05	-0,03
75	0,95	0,2	1102	8128	1965	11366	0,36	0,42	-0,06	-0,03
75	0,98	0,02	739	3153	2328	16341	0,24	0,16	0,08	0,07
75	0,98	0,05	807	5599	2260	13895	0,26	0,29	-0,02	-0,02
75	0,98	0,1	870	6402	2197	13092	0,28	0,33	-0,04	-0,03
75	0,98	0,15	992	6907	2075	12587	0,32	0,35	-0,03	-0,02
75	0,98	0,2	1066	7499	2001	11995	0,35	0,38	-0,04	-0,02
100	0,8	0,02	1217	6727	1850	12767	0,40	0,35	0,05	0,03
100	0,8	0,05	1285	9310	1782	10184	0,42	0,48	-0,06	-0,03
100	0,8	0,1	1367	10466	1700	9028	0,45	0,54	-0,09	-0,04
100	0,8	0,15	1526	11000	1541	8494	0,50	0,56	-0,07	-0,03
100	0,8	0,2	1668	11812	1399	7682	0,54	0,61	-0,06	-0,03
100	0,85	0,02	1133	5599	1934	13895	0,37	0,29	0,08	0,05
100	0,85	0,05	1201	8182	1866	11312	0,39	0,42	-0,03	-0,02
100	0,85	0,1	1283	9338	1784	10156	0,42	0,48	-0,06	-0,03
100	0,85	0,15	1442	9872	1625	9622	0,47	0,51	-0,04	-0,02
100	0,85	0,2	1584	10684	1483	8810	0,52	0,55	-0,03	-0,01
100	0,9	0,02	1013	5059	2054	14435	0,33	0,26	0,07	0,05
100	0,9	0,05	1081	7642	1986	11852	0,35	0,39	-0,04	-0,02
100	0,9	0,1	1163	8798	1904	10696	0,38	0,45	-0,07	-0,04
100	0,9	0,15	1322	9332	1745	10162	0,43	0,48	-0,05	-0,02
100	0,9	0,2	1464	10144	1603	9350	0,48	0,52	-0,04	-0,02
100	0,95	0,02	783	3919	2284	15575	0,26	0,20	0,05	0,04
100	0,95	0,05	851	6502	2216	12992	0,28	0,33	-0,06	-0,04
100	0,95	0,1	933	7658	2134	11836	0,30	0,39	-0,09	-0,05
100	0,95	0,15	1092	8192	1975	11302	0,36	0,42	-0,06	-0,03
100	0,95	0,2	1234	9004	1833	10490	0,40	0,46	-0,06	-0,03
100	0,98	0,02	734	3087	2333	16407	0,24	0,16	0,08	0,07
100	0,98	0,05	802	5670	2265	13824	0,26	0,29	-0,03	-0,02
100	0,98	0,1	884	6826	2183	12668	0,29	0,35	-0,06	-0,04
100	0,98	0,15	1043	7360	2024	12134	0,34	0,38	-0,04	-0,02

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
100	0,98	0,2	1185	8172	1882	11322	0,39	0,42	-0,03	-0,02
125	0,8	0,02	1276	6756	1791	12738	0,42	0,35	0,07	0,04
125	0,8	0,05	1340	9371	1727	10123	0,44	0,48	-0,04	-0,02
125	0,8	0,1	1433	10807	1634	8687	0,47	0,55	-0,09	-0,04
125	0,8	0,15	1610	11542	1457	7952	0,52	0,59	-0,07	-0,03
125	0,8	0,2	1711	12020	1356	7474	0,56	0,62	-0,06	-0,02
125	0,85	0,02	1082	5635	1985	13859	0,35	0,29	0,06	0,04
125	0,85	0,05	1146	8250	1921	11244	0,37	0,42	-0,05	-0,03
125	0,85	0,1	1239	9686	1828	9808	0,40	0,50	-0,09	-0,04
125	0,85	0,15	1416	10421	1651	9073	0,46	0,53	-0,07	-0,03
125	0,85	0,2	1517	10899	1550	8595	0,49	0,56	-0,06	-0,03
125	0,9	0,02	964	4943	2103	14551	0,31	0,25	0,06	0,04
125	0,9	0,05	1028	7558	2039	11936	0,34	0,39	-0,05	-0,03
125	0,9	0,1	1121	8994	1946	10500	0,37	0,46	-0,10	-0,05
125	0,9	0,15	1298	9729	1769	9765	0,42	0,50	-0,08	-0,04
125	0,9	0,2	1399	10207	1668	9287	0,46	0,52	-0,07	-0,03
125	0,95	0,02	761	3943	2306	15551	0,25	0,20	0,05	0,04
125	0,95	0,05	825	6558	2242	12936	0,27	0,34	-0,07	-0,04
125	0,95	0,1	918	7994	2149	11500	0,30	0,41	-0,11	-0,06
125	0,95	0,15	1095	8729	1972	10765	0,36	0,45	-0,09	-0,05
125	0,95	0,2	1196	9207	1871	10287	0,39	0,47	-0,08	-0,04
125	0,98	0,02	717	3023	2350	16471	0,23	0,16	0,08	0,07
125	0,98	0,05	781	5638	2286	13856	0,25	0,29	-0,03	-0,02
125	0,98	0,1	874	7074	2193	12420	0,28	0,36	-0,08	-0,05
125	0,98	0,15	1051	7809	2016	11685	0,34	0,40	-0,06	-0,03
125	0,98	0,2	1152	8287	1915	11207	0,38	0,43	-0,05	-0,03
150	0,8	0,02	1221	6768	1846	12726	0,40	0,35	0,05	0,03
150	0,8	0,05	1285	9409	1782	10085	0,42	0,48	-0,06	-0,03
150	0,8	0,1	1376	10909	1691	8585	0,45	0,56	-0,11	-0,05
150	0,8	0,15	1567	11765	1500	7729	0,51	0,60	-0,09	-0,04
150	0,8	0,2	1619	12180	1448	7314	0,53	0,62	-0,10	-0,04
150	0,85	0,02	1067	5676	2000	13818	0,35	0,29	0,06	0,04
150	0,85	0,05	1131	8317	1936	11177	0,37	0,43	-0,06	-0,03
150	0,85	0,1	1222	9817	1845	9677	0,40	0,50	-0,11	-0,05
150	0,85	0,15	1413	10673	1654	8821	0,46	0,55	-0,09	-0,04
150	0,85	0,2	1465	11088	1602	8406	0,48	0,57	-0,09	-0,04
150	0,9	0,02	954	5093	2113	14401	0,31	0,26	0,05	0,04
150	0,9	0,05	1018	7734	2049	11760	0,33	0,40	-0,06	-0,04
150	0,9	0,1	1109	9234	1958	10260	0,36	0,47	-0,11	-0,06
150	0,9	0,15	1300	10090	1767	9404	0,42	0,52	-0,09	-0,04
150	0,9	0,2	1352	10505	1715	8989	0,44	0,54	-0,10	-0,04
150	0,95	0,02	758	3887	2309	15607	0,25	0,20	0,05	0,04

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
150	0,95	0,05	822	6528	2245	12966	0,27	0,33	-0,07	-0,04
150	0,95	0,1	913	8028	2154	11466	0,30	0,41	-0,11	-0,06
150	0,95	0,15	1104	8884	1963	10610	0,36	0,46	-0,10	-0,05
150	0,95	0,2	1156	9299	1911	10195	0,38	0,48	-0,10	-0,05
150	0,98	0,02	704	2994	2363	16500	0,23	0,15	0,08	0,07
150	0,98	0,05	768	5635	2299	13859	0,25	0,29	-0,04	-0,03
150	0,98	0,1	859	7135	2208	12359	0,28	0,37	-0,09	-0,05
150	0,98	0,15	1050	7991	2017	11503	0,34	0,41	-0,07	-0,04
150	0,98	0,2	1102	8406	1965	11088	0,36	0,43	-0,07	-0,04
175	0,8	0,02	1224	6729	1843	12765	0,40	0,35	0,05	0,03
175	0,8	0,05	1310	9751	1757	9743	0,43	0,50	-0,07	-0,03
175	0,8	0,1	1434	10843	1633	8651	0,47	0,56	-0,09	-0,04
175	0,8	0,15	1576	11558	1491	7936	0,51	0,59	-0,08	-0,03
175	0,8	0,2	1651	12247	1416	7247	0,54	0,63	-0,09	-0,04
175	0,85	0,02	1059	5632	2008	13862	0,35	0,29	0,06	0,04
175	0,85	0,05	1145	8654	1922	10840	0,37	0,44	-0,07	-0,04
175	0,85	0,1	1269	9746	1798	9748	0,41	0,50	-0,09	-0,04
175	0,85	0,15	1411	10461	1656	9033	0,46	0,54	-0,08	-0,03
175	0,85	0,2	1486	11150	1581	8344	0,48	0,57	-0,09	-0,04
175	0,9	0,02	933	5033	2134	14461	0,30	0,26	0,05	0,03
175	0,9	0,05	1019	8055	2048	11439	0,33	0,41	-0,08	-0,04
175	0,9	0,1	1143	9147	1924	10347	0,37	0,47	-0,10	-0,05
175	0,9	0,15	1285	9862	1782	9632	0,42	0,51	-0,09	-0,04
175	0,9	0,2	1360	10551	1707	8943	0,44	0,54	-0,10	-0,04
175	0,95	0,02	771	3829	2296	15665	0,25	0,20	0,05	0,05
175	0,95	0,05	857	6851	2210	12643	0,28	0,35	-0,07	-0,04
175	0,95	0,1	981	7943	2086	11551	0,32	0,41	-0,09	-0,05
175	0,95	0,15	1123	8658	1944	10836	0,37	0,44	-0,08	-0,04
175	0,95	0,2	1198	9347	1869	10147	0,39	0,48	-0,09	-0,04
175	0,98	0,02	702	3021	2365	16473	0,23	0,15	0,07	0,07
175	0,98	0,05	788	6043	2279	13451	0,26	0,31	-0,05	-0,03
175	0,98	0,1	912	7135	2155	12359	0,30	0,37	-0,07	-0,04
175	0,98	0,15	1054	7850	2013	11644	0,34	0,40	-0,06	-0,03
175	0,98	0,2	1129	8539	1938	10955	0,37	0,44	-0,07	-0,04
200	0,8	0,02	1227	6594	1840	12900	0,40	0,34	0,06	0,04
200	0,8	0,05	1340	9699	1727	9795	0,44	0,50	-0,06	-0,03
200	0,8	0,1	1408	10588	1659	8906	0,46	0,54	-0,08	-0,04
200	0,8	0,15	1573	11417	1494	8077	0,51	0,59	-0,07	-0,03
200	0,8	0,2	1660	12436	1407	7058	0,54	0,64	-0,10	-0,04
200	0,85	0,02	1047	5587	2020	13907	0,34	0,29	0,05	0,04
200	0,85	0,05	1160	8692	1907	10802	0,38	0,45	-0,07	-0,04
200	0,85	0,1	1228	9581	1839	9913	0,40	0,49	-0,09	-0,04

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
200	0,85	0,15	1393	10410	1674	9084	0,45	0,53	-0,08	-0,04
200	0,85	0,2	1480	11429	1587	8065	0,48	0,59	-0,10	-0,04
200	0,9	0,02	906	4905	2161	14589	0,30	0,25	0,04	0,03
200	0,9	0,05	1019	8010	2048	11484	0,33	0,41	-0,08	-0,04
200	0,9	0,1	1087	8899	1980	10595	0,35	0,46	-0,10	-0,05
200	0,9	0,15	1252	9728	1815	9766	0,41	0,50	-0,09	-0,04
200	0,9	0,2	1339	10747	1728	8747	0,44	0,55	-0,11	-0,05
200	0,95	0,02	773	3839	2294	15655	0,25	0,20	0,06	0,05
200	0,95	0,05	886	6944	2181	12550	0,29	0,36	-0,07	-0,04
200	0,95	0,1	954	7833	2113	11661	0,31	0,40	-0,09	-0,05
200	0,95	0,15	1119	8662	1948	10832	0,36	0,44	-0,08	-0,04
200	0,95	0,2	1206	9681	1861	9813	0,39	0,50	-0,10	-0,05
200	0,98	0,02	698	3041	2369	16453	0,23	0,16	0,07	0,07
200	0,98	0,05	811	6146	2256	13348	0,26	0,32	-0,05	-0,03
200	0,98	0,1	879	7035	2188	12459	0,29	0,36	-0,07	-0,04
200	0,98	0,15	1044	7864	2023	11630	0,34	0,40	-0,06	-0,03
200	0,98	0,2	1131	8883	1936	10611	0,37	0,46	-0,09	-0,04

Tabla K2. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda auto-poblacional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,8	0,02	676	5956	2391	13538	0,22	0,31	-0,09	-0,06
50	0,8	0,05	859	7415	2208	12079	0,28	0,38	-0,10	-0,06
50	0,8	0,1	1016	8410	2051	11084	0,33	0,43	-0,10	-0,05
50	0,8	0,15	1290	9249	1777	10245	0,42	0,47	-0,05	-0,03
50	0,8	0,2	1424	10048	1643	9446	0,46	0,52	-0,05	-0,02
50	0,85	0,02	562	5432	2505	14062	0,18	0,28	-0,10	-0,07
50	0,85	0,05	745	6891	2322	12603	0,24	0,35	-0,11	-0,07
50	0,85	0,1	902	7886	2165	11608	0,29	0,40	-0,11	-0,06
50	0,85	0,15	1176	8725	1891	10769	0,38	0,45	-0,06	-0,03
50	0,85	0,2	1310	9524	1757	9970	0,43	0,49	-0,06	-0,03
50	0,9	0,02	465	4797	2602	14697	0,15	0,25	-0,09	-0,07
50	0,9	0,05	648	6256	2419	13238	0,21	0,32	-0,11	-0,07
50	0,9	0,1	805	7251	2262	12243	0,26	0,37	-0,11	-0,06
50	0,9	0,15	1079	8090	1988	11404	0,35	0,41	-0,06	-0,03
50	0,9	0,2	1213	8889	1854	10605	0,40	0,46	-0,06	-0,03
50	0,95	0,02	265	3476	2802	16018	0,09	0,18	-0,09	-0,08
50	0,95	0,05	448	4935	2619	14559	0,15	0,25	-0,11	-0,08
50	0,95	0,1	605	5930	2462	13564	0,20	0,30	-0,11	-0,07
50	0,95	0,15	879	6769	2188	12725	0,29	0,35	-0,06	-0,04
50	0,95	0,2	1013	7568	2054	11926	0,33	0,39	-0,06	-0,03

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,98	0,02	166	2782	2901	16712	0,05	0,14	-0,09	-0,09
50	0,98	0,05	349	4241	2718	15253	0,11	0,22	-0,10	-0,09
50	0,98	0,1	506	5236	2561	14258	0,16	0,27	-0,10	-0,08
50	0,98	0,15	780	6075	2287	13419	0,25	0,31	-0,06	-0,04
50	0,98	0,2	914	6874	2153	12620	0,30	0,35	-0,05	-0,03
75	0,8	0,02	851	6056	2216	13438	0,28	0,31	-0,03	-0,02
75	0,8	0,05	986	7470	2081	12024	0,32	0,38	-0,06	-0,04
75	0,8	0,1	1169	8747	1898	10747	0,38	0,45	-0,07	-0,03
75	0,8	0,15	1433	9788	1634	9706	0,47	0,50	-0,03	-0,02
75	0,8	0,2	1640	10728	1427	8766	0,53	0,55	-0,02	-0,01
75	0,85	0,02	711	5616	2356	13878	0,23	0,29	-0,06	-0,04
75	0,85	0,05	846	7030	2221	12464	0,28	0,36	-0,08	-0,05
75	0,85	0,1	1029	8307	2038	11187	0,34	0,43	-0,09	-0,05
75	0,85	0,15	1293	9348	1774	10146	0,42	0,48	-0,06	-0,03
75	0,85	0,2	1500	10288	1567	9206	0,49	0,53	-0,04	-0,02
75	0,9	0,02	549	5007	2518	14487	0,18	0,26	-0,08	-0,06
75	0,9	0,05	684	6421	2383	13073	0,22	0,33	-0,11	-0,07
75	0,9	0,1	867	7698	2200	11796	0,28	0,39	-0,11	-0,06
75	0,9	0,15	1131	8739	1936	10755	0,37	0,45	-0,08	-0,04
75	0,9	0,2	1338	9679	1729	9815	0,44	0,50	-0,06	-0,03
75	0,95	0,02	400	3636	2667	15858	0,13	0,19	-0,06	-0,05
75	0,95	0,05	535	5050	2532	14444	0,17	0,26	-0,08	-0,06
75	0,95	0,1	718	6327	2349	13167	0,23	0,32	-0,09	-0,06
75	0,95	0,15	982	7368	2085	12126	0,32	0,38	-0,06	-0,03
75	0,95	0,2	1189	8308	1878	11186	0,39	0,43	-0,04	-0,02
75	0,98	0,02	266	2854	2801	16640	0,09	0,15	-0,06	-0,06
75	0,98	0,05	401	4268	2666	15226	0,13	0,22	-0,09	-0,07
75	0,98	0,1	584	5545	2483	13949	0,19	0,28	-0,09	-0,07
75	0,98	0,15	848	6586	2219	12908	0,28	0,34	-0,06	-0,04
75	0,98	0,2	1055	7526	2012	11968	0,34	0,39	-0,04	-0,02
100	0,8	0,02	911	5157	2156	14337	0,30	0,26	0,03	0,02
100	0,8	0,05	1006	7559	2061	11935	0,33	0,39	-0,06	-0,03
100	0,8	0,1	1254	8963	1813	10531	0,41	0,46	-0,05	-0,03
100	0,8	0,15	1523	10302	1544	9192	0,50	0,53	-0,03	-0,01
100	0,8	0,2	1698	11462	1369	8032	0,55	0,59	-0,03	-0,01
100	0,85	0,02	755	4811	2312	14683	0,25	0,25	0,00	0,00
100	0,85	0,05	850	7213	2217	12281	0,28	0,37	-0,09	-0,06
100	0,85	0,1	1098	8617	1969	10877	0,36	0,44	-0,08	-0,04
100	0,85	0,15	1367	9956	1700	9538	0,45	0,51	-0,07	-0,03
100	0,85	0,2	1542	11116	1525	8378	0,50	0,57	-0,07	-0,03
100	0,9	0,02	587	4179	2480	15315	0,19	0,21	-0,02	-0,02
100	0,9	0,05	682	6581	2385	12913	0,22	0,34	-0,12	-0,07

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
100	0,9	0,1	930	7985	2137	11509	0,30	0,41	-0,11	-0,06
100	0,9	0,15	1199	9324	1868	10170	0,39	0,48	-0,09	-0,04
100	0,9	0,2	1374	10484	1693	9010	0,45	0,54	-0,09	-0,04
100	0,95	0,02	450	2597	2617	16897	0,15	0,13	0,01	0,01
100	0,95	0,05	545	4999	2522	14495	0,18	0,26	-0,08	-0,06
100	0,95	0,1	793	6403	2274	13091	0,26	0,33	-0,07	-0,04
100	0,95	0,15	1062	7742	2005	11752	0,35	0,40	-0,05	-0,03
100	0,95	0,2	1237	8902	1830	10592	0,40	0,46	-0,05	-0,03
100	0,98	0,02	322	1946	2745	17548	0,10	0,10	0,01	0,01
100	0,98	0,05	417	4348	2650	15146	0,14	0,22	-0,09	-0,07
100	0,98	0,1	665	5752	2402	13742	0,22	0,30	-0,08	-0,05
100	0,98	0,15	934	7091	2133	12403	0,30	0,36	-0,06	-0,04
100	0,98	0,2	1109	8251	1958	11243	0,36	0,42	-0,06	-0,03
125	0,8	0,02	905	5853	2162	13641	0,30	0,30	-0,01	0,00
125	0,8	0,05	1054	7575	2013	11919	0,34	0,39	-0,04	-0,03
125	0,8	0,1	1269	9259	1798	10235	0,41	0,47	-0,06	-0,03
125	0,8	0,15	1555	11076	1512	8418	0,51	0,57	-0,06	-0,03
125	0,8	0,2	1646	12174	1421	7320	0,54	0,62	-0,09	-0,04
125	0,85	0,02	702	5454	2365	14040	0,23	0,28	-0,05	-0,04
125	0,85	0,05	851	7176	2216	12318	0,28	0,37	-0,09	-0,05
125	0,85	0,1	1066	8860	2001	10634	0,35	0,45	-0,11	-0,06
125	0,85	0,15	1352	10677	1715	8817	0,44	0,55	-0,11	-0,05
125	0,85	0,2	1443	11775	1624	7719	0,47	0,60	-0,13	-0,06
125	0,9	0,02	582	4582	2485	14912	0,19	0,24	-0,05	-0,04
125	0,9	0,05	731	6304	2336	13190	0,24	0,32	-0,09	-0,06
125	0,9	0,1	946	7988	2121	11506	0,31	0,41	-0,10	-0,06
125	0,9	0,15	1232	9805	1835	9689	0,40	0,50	-0,10	-0,05
125	0,9	0,2	1323	10903	1744	8591	0,43	0,56	-0,13	-0,06
125	0,95	0,02	376	3124	2691	16370	0,12	0,16	-0,04	-0,04
125	0,95	0,05	525	4846	2542	14648	0,17	0,25	-0,08	-0,06
125	0,95	0,1	740	6530	2327	12964	0,24	0,33	-0,09	-0,06
125	0,95	0,15	1026	8347	2041	11147	0,33	0,43	-0,09	-0,05
125	0,95	0,2	1117	9445	1950	10049	0,36	0,48	-0,12	-0,06
125	0,98	0,02	308	2477	2759	17017	0,10	0,13	-0,03	-0,03
125	0,98	0,05	457	4199	2610	15295	0,15	0,22	-0,07	-0,05
125	0,98	0,1	672	5883	2395	13611	0,22	0,30	-0,08	-0,06
125	0,98	0,15	958	7700	2109	11794	0,31	0,39	-0,08	-0,05
125	0,98	0,2	1049	8798	2018	10696	0,34	0,45	-0,11	-0,06
150	0,8	0,02	854	5410	2213	14084	0,28	0,28	0,00	0,00
150	0,8	0,05	997	7687	2070	11807	0,33	0,39	-0,07	-0,04
150	0,8	0,1	1218	9695	1849	9799	0,40	0,50	-0,10	-0,05
150	0,8	0,15	1483	11053	1584	8441	0,48	0,57	-0,08	-0,04

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
150	0,8	0,2	1657	12250	1410	7244	0,54	0,63	-0,09	-0,04
150	0,85	0,02	696	4788	2371	14706	0,23	0,25	-0,02	-0,01
150	0,85	0,05	839	7065	2228	12429	0,27	0,36	-0,09	-0,05
150	0,85	0,1	1060	9073	2007	10421	0,35	0,47	-0,12	-0,06
150	0,85	0,15	1325	10431	1742	9063	0,43	0,54	-0,10	-0,05
150	0,85	0,2	1499	11628	1568	7866	0,49	0,60	-0,11	-0,05
150	0,9	0,02	583	3742	2484	15752	0,19	0,19	0,00	0,00
150	0,9	0,05	726	6019	2341	13475	0,24	0,31	-0,07	-0,05
150	0,9	0,1	947	8027	2120	11467	0,31	0,41	-0,10	-0,06
150	0,9	0,15	1212	9385	1855	10109	0,40	0,48	-0,09	-0,04
150	0,9	0,2	1386	10582	1681	8912	0,45	0,54	-0,09	-0,04
150	0,95	0,02	352	2557	2715	16937	0,11	0,13	-0,02	-0,02
150	0,95	0,05	495	4834	2572	14660	0,16	0,25	-0,09	-0,07
150	0,95	0,1	716	6842	2351	12652	0,23	0,35	-0,12	-0,07
150	0,95	0,15	981	8200	2086	11294	0,32	0,42	-0,10	-0,05
150	0,95	0,2	1155	9397	1912	10097	0,38	0,48	-0,11	-0,05
150	0,98	0,02	278	1961	2789	17533	0,09	0,10	-0,01	-0,01
150	0,98	0,05	421	4238	2646	15256	0,14	0,22	-0,08	-0,07
150	0,98	0,1	642	6246	2425	13248	0,21	0,32	-0,11	-0,07
150	0,98	0,15	907	7604	2160	11890	0,30	0,39	-0,09	-0,05
150	0,98	0,2	1081	8801	1986	10693	0,35	0,45	-0,10	-0,05
175	0,8	0,02	824	5812	2243	13682	0,27	0,30	-0,03	-0,02
175	0,8	0,05	974	7526	2093	11968	0,32	0,39	-0,07	-0,04
175	0,8	0,1	1212	9716	1855	9778	0,40	0,50	-0,10	-0,05
175	0,8	0,15	1496	11021	1571	8473	0,49	0,57	-0,08	-0,03
175	0,8	0,2	1604	12547	1463	6947	0,52	0,64	-0,12	-0,05
175	0,85	0,02	724	5141	2343	14353	0,24	0,26	-0,03	-0,02
175	0,85	0,05	874	6855	2193	12639	0,28	0,35	-0,07	-0,04
175	0,85	0,1	1112	9045	1955	10449	0,36	0,46	-0,10	-0,05
175	0,85	0,15	1396	10350	1671	9144	0,46	0,53	-0,08	-0,03
175	0,85	0,2	1504	11876	1563	7618	0,49	0,61	-0,12	-0,05
175	0,9	0,02	542	4189	2525	15305	0,18	0,21	-0,04	-0,03
175	0,9	0,05	692	5903	2375	13591	0,23	0,30	-0,08	-0,05
175	0,9	0,1	930	8093	2137	11401	0,30	0,42	-0,11	-0,06
175	0,9	0,15	1214	9398	1853	10096	0,40	0,48	-0,09	-0,04
175	0,9	0,2	1322	10924	1745	8570	0,43	0,56	-0,13	-0,06
175	0,95	0,02	353	3025	2714	16469	0,12	0,16	-0,04	-0,04
175	0,95	0,05	503	4739	2564	14755	0,16	0,24	-0,08	-0,06
175	0,95	0,1	741	6929	2326	12565	0,24	0,36	-0,11	-0,07
175	0,95	0,15	1025	8234	2042	11260	0,33	0,42	-0,09	-0,05
175	0,95	0,2	1133	9760	1934	9734	0,37	0,50	-0,13	-0,06
175	0,98	0,02	271	2430	2796	17064	0,09	0,12	-0,04	-0,04

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
175	0,98	0,05	421	4144	2646	15350	0,14	0,21	-0,08	-0,06
175	0,98	0,1	659	6334	2408	13160	0,21	0,32	-0,11	-0,07
175	0,98	0,15	943	7639	2124	11855	0,31	0,39	-0,08	-0,05
175	0,98	0,2	1051	9165	2016	10329	0,34	0,47	-0,13	-0,06
200	0,8	0,02	801	5925	2266	13569	0,26	0,30	-0,04	-0,03
200	0,8	0,05	994	7604	2073	11890	0,32	0,39	-0,07	-0,04
200	0,8	0,1	1192	9628	1875	9866	0,39	0,49	-0,11	-0,05
200	0,8	0,15	1413	10981	1654	8513	0,46	0,56	-0,10	-0,04
200	0,8	0,2	1563	12476	1504	7018	0,51	0,64	-0,13	-0,05
200	0,85	0,02	734	5145	2333	14349	0,24	0,26	-0,02	-0,02
200	0,85	0,05	927	6824	2140	12670	0,30	0,35	-0,05	-0,03
200	0,85	0,1	1125	8848	1942	10646	0,37	0,45	-0,09	-0,04
200	0,85	0,15	1346	10201	1721	9293	0,44	0,52	-0,08	-0,04
200	0,85	0,2	1496	11696	1571	7798	0,49	0,60	-0,11	-0,05
200	0,9	0,02	505	4426	2562	15068	0,16	0,23	-0,06	-0,05
200	0,9	0,05	698	6105	2369	13389	0,23	0,31	-0,09	-0,06
200	0,9	0,1	896	8129	2171	11365	0,29	0,42	-0,12	-0,07
200	0,9	0,15	1117	9482	1950	10012	0,36	0,49	-0,12	-0,06
200	0,9	0,2	1267	10977	1800	8517	0,41	0,56	-0,15	-0,07
200	0,95	0,02	354	3301	2713	16193	0,12	0,17	-0,05	-0,05
200	0,95	0,05	547	4980	2520	14514	0,18	0,26	-0,08	-0,06
200	0,95	0,1	745	7004	2322	12490	0,24	0,36	-0,12	-0,07
200	0,95	0,15	966	8357	2101	11137	0,31	0,43	-0,11	-0,06
200	0,95	0,2	1116	9852	1951	9642	0,36	0,51	-0,14	-0,07
200	0,98	0,02	271	2635	2796	16859	0,09	0,14	-0,05	-0,05
200	0,98	0,05	464	4314	2603	15180	0,15	0,22	-0,07	-0,06
200	0,98	0,1	662	6338	2405	13156	0,22	0,33	-0,11	-0,07
200	0,98	0,15	883	7691	2184	11803	0,29	0,39	-0,11	-0,06
200	0,98	0,2	1033	9186	2034	10308	0,34	0,47	-0,13	-0,07

Tabla K3. Matriz de contingencia y métricas de desempeño para la banda proporcional. Indicador aglomeramiento espacial. Mina Creighton.

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,1	0,1	2503	17505	564	1989	0,82	0,90	-0,08	-0,02
50	0,1	0,2	2293	16749	774	2745	0,75	0,86	-0,11	-0,03
50	0,1	0,3	2156	15930	911	3564	0,70	0,82	-0,11	-0,04
50	0,1	0,4	2073	15044	994	4450	0,68	0,77	-0,10	-0,03
50	0,1	0,5	1991	13849	1076	5645	0,65	0,71	-0,06	-0,02
50	0,2	0,1	2342	16879	725	2615	0,76	0,87	-0,10	-0,03
50	0,2	0,2	2132	16123	935	3371	0,70	0,83	-0,13	-0,04
50	0,2	0,3	1995	15304	1072	4190	0,65	0,79	-0,13	-0,05

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
50	0,2	0,4	1912	14418	1155	5076	0,62	0,74	-0,12	-0,04
50	0,2	0,5	1830	13223	1237	6271	0,60	0,68	-0,08	-0,03
50	0,3	0,1	2176	16194	891	3300	0,71	0,83	-0,12	-0,04
50	0,3	0,2	1966	15438	1101	4056	0,64	0,79	-0,15	-0,05
50	0,3	0,3	1829	14619	1238	4875	0,60	0,75	-0,15	-0,05
50	0,3	0,4	1746	13733	1321	5761	0,57	0,70	-0,14	-0,05
50	0,3	0,5	1664	12538	1403	6956	0,54	0,64	-0,10	-0,04
50	0,4	0,1	2023	14991	1044	4503	0,66	0,77	-0,11	-0,04
50	0,4	0,2	1813	14235	1254	5259	0,59	0,73	-0,14	-0,05
50	0,4	0,3	1676	13416	1391	6078	0,55	0,69	-0,14	-0,05
50	0,4	0,4	1593	12530	1474	6964	0,52	0,64	-0,12	-0,05
50	0,4	0,5	1511	11335	1556	8159	0,49	0,58	-0,09	-0,04
50	0,5	0,1	1903	14401	1164	5093	0,62	0,74	-0,12	-0,04
50	0,5	0,2	1693	13645	1374	5849	0,55	0,70	-0,15	-0,06
50	0,5	0,3	1556	12826	1511	6668	0,51	0,66	-0,15	-0,06
50	0,5	0,4	1473	11940	1594	7554	0,48	0,61	-0,13	-0,05
50	0,5	0,5	1391	10745	1676	8749	0,45	0,55	-0,10	-0,04
75	0,1	0,1	2542	17358	525	2136	0,83	0,89	-0,06	-0,02
75	0,1	0,2	2239	16213	828	3281	0,73	0,83	-0,10	-0,03
75	0,1	0,3	2043	15420	1024	4074	0,67	0,79	-0,12	-0,04
75	0,1	0,4	1976	13690	1091	5804	0,64	0,70	-0,06	-0,02
75	0,1	0,5	1886	12520	1181	6974	0,61	0,64	-0,03	-0,01
75	0,2	0,1	2356	16195	711	3299	0,77	0,83	-0,06	-0,02
75	0,2	0,2	2053	15050	1014	4444	0,67	0,77	-0,10	-0,04
75	0,2	0,3	1857	14257	1210	5237	0,61	0,73	-0,13	-0,05
75	0,2	0,4	1790	12527	1277	6967	0,58	0,64	-0,06	-0,02
75	0,2	0,5	1700	11357	1367	8137	0,55	0,58	-0,03	-0,01
75	0,3	0,1	2163	14937	904	4557	0,71	0,77	-0,06	-0,02
75	0,3	0,2	1860	13792	1207	5702	0,61	0,71	-0,10	-0,04
75	0,3	0,3	1664	12999	1403	6495	0,54	0,67	-0,12	-0,05
75	0,3	0,4	1597	11269	1470	8225	0,52	0,58	-0,06	-0,02
75	0,3	0,5	1507	10099	1560	9395	0,49	0,52	-0,03	-0,01
75	0,4	0,1	2072	14398	995	5096	0,68	0,74	-0,06	-0,02
75	0,4	0,2	1769	13253	1298	6241	0,58	0,68	-0,10	-0,04
75	0,4	0,3	1573	12460	1494	7034	0,51	0,64	-0,13	-0,05
75	0,4	0,4	1506	10730	1561	8764	0,49	0,55	-0,06	-0,03
75	0,4	0,5	1416	9560	1651	9934	0,46	0,49	-0,03	-0,01
75	0,5	0,1	1969	13790	1098	5704	0,64	0,71	-0,07	-0,02
75	0,5	0,2	1666	12645	1401	6849	0,54	0,65	-0,11	-0,04
75	0,5	0,3	1470	11852	1597	7642	0,48	0,61	-0,13	-0,05
75	0,5	0,4	1403	10122	1664	9372	0,46	0,52	-0,06	-0,03
75	0,5	0,5	1313	8952	1754	10542	0,43	0,46	-0,03	-0,02

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
100	0,1	0,1	2508	17216	559	2278	0,82	0,88	-0,07	-0,02
100	0,1	0,2	2227	15699	840	3795	0,73	0,81	-0,08	-0,03
100	0,1	0,3	2011	14309	1056	5185	0,66	0,73	-0,08	-0,03
100	0,1	0,4	1854	12911	1213	6583	0,60	0,66	-0,06	-0,02
100	0,1	0,5	1731	11324	1336	8170	0,56	0,58	-0,02	-0,01
100	0,2	0,1	2291	15898	776	3596	0,75	0,82	-0,07	-0,02
100	0,2	0,2	2010	14381	1057	5113	0,66	0,74	-0,08	-0,03
100	0,2	0,3	1794	12991	1273	6503	0,58	0,67	-0,08	-0,03
100	0,2	0,4	1637	11593	1430	7901	0,53	0,59	-0,06	-0,03
100	0,2	0,5	1514	10006	1553	9488	0,49	0,51	-0,02	-0,01
100	0,3	0,1	2167	15051	900	4443	0,71	0,77	-0,07	-0,02
100	0,3	0,2	1886	13534	1181	5960	0,61	0,69	-0,08	-0,03
100	0,3	0,3	1670	12144	1397	7350	0,54	0,62	-0,08	-0,03
100	0,3	0,4	1513	10746	1554	8748	0,49	0,55	-0,06	-0,03
100	0,3	0,5	1390	9159	1677	10335	0,45	0,47	-0,02	-0,01
100	0,4	0,1	2058	14315	1009	5179	0,67	0,73	-0,06	-0,02
100	0,4	0,2	1777	12798	1290	6696	0,58	0,66	-0,08	-0,03
100	0,4	0,3	1561	11408	1506	8086	0,51	0,59	-0,08	-0,03
100	0,4	0,4	1404	10010	1663	9484	0,46	0,51	-0,06	-0,03
100	0,4	0,5	1281	8423	1786	11071	0,42	0,43	-0,01	-0,01
100	0,5	0,1	1930	13706	1137	5788	0,63	0,70	-0,07	-0,03
100	0,5	0,2	1649	12189	1418	7305	0,54	0,63	-0,09	-0,04
100	0,5	0,3	1433	10799	1634	8695	0,47	0,55	-0,09	-0,04
100	0,5	0,4	1276	9401	1791	10093	0,42	0,48	-0,07	-0,03
100	0,5	0,5	1153	7814	1914	11680	0,38	0,40	-0,02	-0,01
125	0,1	0,1	2525	16416	542	3078	0,82	0,84	-0,02	-0,01
125	0,1	0,2	2199	14880	868	4614	0,72	0,76	-0,05	-0,02
125	0,1	0,3	2018	13220	1049	6274	0,66	0,68	-0,02	-0,01
125	0,1	0,4	1855	10857	1212	8637	0,60	0,56	0,05	0,02
125	0,1	0,5	1624	9570	1443	9924	0,53	0,49	0,04	0,02
125	0,2	0,1	2300	15307	767	4187	0,75	0,79	-0,04	-0,01
125	0,2	0,2	1974	13771	1093	5723	0,64	0,71	-0,06	-0,02
125	0,2	0,3	1793	12111	1274	7383	0,58	0,62	-0,04	-0,01
125	0,2	0,4	1630	9748	1437	9746	0,53	0,50	0,03	0,01
125	0,2	0,5	1399	8461	1668	11033	0,46	0,43	0,02	0,01
125	0,3	0,1	2142	14674	925	4820	0,70	0,75	-0,05	-0,02
125	0,3	0,2	1816	13138	1251	6356	0,59	0,67	-0,08	-0,03
125	0,3	0,3	1635	11478	1432	8016	0,53	0,59	-0,06	-0,02
125	0,3	0,4	1472	9115	1595	10379	0,48	0,47	0,01	0,01
125	0,3	0,5	1241	7828	1826	11666	0,40	0,40	0,00	0,00
125	0,4	0,1	2046	14004	1021	5490	0,67	0,72	-0,05	-0,02
125	0,4	0,2	1720	12468	1347	7026	0,56	0,64	-0,08	-0,03

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
125	0,4	0,3	1539	10808	1528	8686	0,50	0,55	-0,05	-0,02
125	0,4	0,4	1376	8445	1691	11049	0,45	0,43	0,02	0,01
125	0,4	0,5	1145	7158	1922	12336	0,37	0,37	0,01	0,00
125	0,5	0,1	1947	13348	1120	6146	0,63	0,68	-0,05	-0,02
125	0,5	0,2	1621	11812	1446	7682	0,53	0,61	-0,08	-0,03
125	0,5	0,3	1440	10152	1627	9342	0,47	0,52	-0,05	-0,02
125	0,5	0,4	1277	7789	1790	11705	0,42	0,40	0,02	0,01
125	0,5	0,5	1046	6502	2021	12992	0,34	0,33	0,01	0,00
150	0,1	0,1	2465	16130	602	3364	0,80	0,83	-0,02	-0,01
150	0,1	0,2	2072	14346	995	5148	0,68	0,74	-0,06	-0,02
150	0,1	0,3	1863	12287	1204	7207	0,61	0,63	-0,02	-0,01
150	0,1	0,4	1675	9959	1392	9535	0,55	0,51	0,04	0,02
150	0,1	0,5	1523	8922	1544	10572	0,50	0,46	0,04	0,02
150	0,2	0,1	2307	14879	760	4615	0,75	0,76	-0,01	0,00
150	0,2	0,2	1914	13095	1153	6399	0,62	0,67	-0,05	-0,02
150	0,2	0,3	1705	11036	1362	8458	0,56	0,57	-0,01	0,00
150	0,2	0,4	1517	8708	1550	10786	0,49	0,45	0,05	0,02
150	0,2	0,5	1365	7671	1702	11823	0,45	0,39	0,05	0,03
150	0,3	0,1	2213	14214	854	5280	0,72	0,73	-0,01	0,00
150	0,3	0,2	1820	12430	1247	7064	0,59	0,64	-0,04	-0,02
150	0,3	0,3	1611	10371	1456	9123	0,53	0,53	-0,01	0,00
150	0,3	0,4	1423	8043	1644	11451	0,46	0,41	0,05	0,03
150	0,3	0,5	1271	7006	1796	12488	0,41	0,36	0,06	0,03
150	0,4	0,1	2064	13466	1003	6028	0,67	0,69	-0,02	-0,01
150	0,4	0,2	1671	11682	1396	7812	0,54	0,60	-0,05	-0,02
150	0,4	0,3	1462	9623	1605	9871	0,48	0,49	-0,02	-0,01
150	0,4	0,4	1274	7295	1793	12199	0,42	0,37	0,04	0,02
150	0,4	0,5	1122	6258	1945	13236	0,37	0,32	0,04	0,03
150	0,5	0,1	1857	12931	1210	6563	0,61	0,66	-0,06	-0,02
150	0,5	0,2	1464	11147	1603	8347	0,48	0,57	-0,09	-0,04
150	0,5	0,3	1255	9088	1812	10406	0,41	0,47	-0,06	-0,03
150	0,5	0,4	1067	6760	2000	12734	0,35	0,35	0,00	0,00
150	0,5	0,5	915	5723	2152	13771	0,30	0,29	0,00	0,00
175	0,1	0,1	2576	16135	491	3359	0,84	0,83	0,01	0,00
175	0,1	0,2	2120	14330	947	5164	0,69	0,74	-0,04	-0,02
175	0,1	0,3	1830	11498	1237	7996	0,60	0,59	0,01	0,00
175	0,1	0,4	1626	9367	1441	10127	0,53	0,48	0,05	0,02
175	0,1	0,5	1477	7859	1590	11635	0,48	0,40	0,08	0,04
175	0,2	0,1	2449	15041	618	4453	0,80	0,77	0,03	0,01
175	0,2	0,2	1993	13236	1074	6258	0,65	0,68	-0,03	-0,01
175	0,2	0,3	1703	10404	1364	9090	0,56	0,53	0,02	0,01
175	0,2	0,4	1499	8273	1568	11221	0,49	0,42	0,06	0,03

D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
175	0,2	0,5	1350	6765	1717	12729	0,44	0,35	0,09	0,05
175	0,3	0,1	2374	14290	693	5204	0,77	0,73	0,04	0,01
175	0,3	0,2	1918	12485	1149	7009	0,63	0,64	-0,02	-0,01
175	0,3	0,3	1628	9653	1439	9841	0,53	0,50	0,04	0,02
175	0,3	0,4	1424	7522	1643	11972	0,46	0,39	0,08	0,04
175	0,3	0,5	1275	6014	1792	13480	0,42	0,31	0,11	0,07
175	0,4	0,1	2150	13564	917	5930	0,70	0,70	0,01	0,00
175	0,4	0,2	1694	11759	1373	7735	0,55	0,60	-0,05	-0,02
175	0,4	0,3	1404	8927	1663	10567	0,46	0,46	0,00	0,00
175	0,4	0,4	1200	6796	1867	12698	0,39	0,35	0,04	0,03
175	0,4	0,5	1051	5288	2016	14206	0,34	0,27	0,07	0,05
175	0,5	0,1	1975	13029	1092	6465	0,64	0,67	-0,02	-0,01
175	0,5	0,2	1519	11224	1548	8270	0,50	0,58	-0,08	-0,03
175	0,5	0,3	1229	8392	1838	11102	0,40	0,43	-0,03	-0,02
175	0,5	0,4	1025	6261	2042	13233	0,33	0,32	0,01	0,01
175	0,5	0,5	876	4753	2191	14741	0,29	0,24	0,04	0,03
200	0,1	0,1	2561	15984	506	3510	0,84	0,82	0,02	0,00
200	0,1	0,2	2147	14324	920	5170	0,70	0,73	-0,03	-0,01
200	0,1	0,3	1816	11020	1251	8474	0,59	0,57	0,03	0,01
200	0,1	0,4	1609	9075	1458	10419	0,52	0,47	0,06	0,03
200	0,1	0,5	1429	7577	1638	11917	0,47	0,39	0,08	0,04
200	0,2	0,1	2454	14841	613	4653	0,80	0,76	0,04	0,01
200	0,2	0,2	2040	13181	1027	6313	0,67	0,68	-0,01	0,00
200	0,2	0,3	1709	9877	1358	9617	0,56	0,51	0,05	0,02
200	0,2	0,4	1502	7932	1565	11562	0,49	0,41	0,08	0,04
200	0,2	0,5	1322	6434	1745	13060	0,43	0,33	0,10	0,06
200	0,3	0,1	2298	14123	769	5371	0,75	0,72	0,02	0,01
200	0,3	0,2	1884	12463	1183	7031	0,61	0,64	-0,03	-0,01
200	0,3	0,3	1553	9159	1514	10335	0,51	0,47	0,04	0,02
200	0,3	0,4	1346	7214	1721	12280	0,44	0,37	0,07	0,04
200	0,3	0,5	1166	5716	1901	13778	0,38	0,29	0,09	0,06
200	0,4	0,1	2113	13435	954	6059	0,69	0,69	0,00	0,00
200	0,4	0,2	1699	11775	1368	7719	0,55	0,60	-0,05	-0,02
200	0,4	0,3	1368	8471	1699	11023	0,45	0,43	0,01	0,01
200	0,4	0,4	1161	6526	1906	12968	0,38	0,33	0,04	0,03
200	0,4	0,5	981	5028	2086	14466	0,32	0,26	0,06	0,04
200	0,5	0,1	1979	12769	1088	6725	0,65	0,66	-0,01	0,00
200	0,5	0,2	1565	11109	1502	8385	0,51	0,57	-0,06	-0,03
200	0,5	0,3	1234	7805	1833	11689	0,40	0,40	0,00	0,00
200	0,5	0,4	1027	5860	2040	13634	0,33	0,30	0,03	0,02
200	0,5	0,5	847	4362	2220	15132	0,28	0,22	0,05	0,04

Anexo L. Matriz de contingencia aglomeramiento espacial, validación. RENO

En este anexo se presenta el detalle de la matriz de contingencia del indicador aglomeramiento espacial para el período de validación. Los resultados están divididos por el tipo de banda utilizada y el parámetro óptimo de cada caso.

Tabla L1. Matriz de contingencia del indicador aglomeramiento espacial para el período de validación.

Banda Poblacional											
Período	Parámetros			Matriz de contingencia				Métricas			
	D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	125	0,9	0,15	934	66355	652	60703	0,59	0,52	0,07	0,00
Validación 2	70 - 150	0,9	0,15	336	83826	307	83538	0,52	0,50	0,02	0,00
Global				1270	150181	959	144241	0,57	0,51	0,06	0,00

Banda Auto-poblacional											
Período	Parámetros			Matriz de contingencia				Métricas			
	D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	125	0,8	0,15	733	47110	853	79948	0,46	0,37	0,09	0,01
Validación 2	70 - 150	0,8	0,15	284	57928	359	109436	0,44	0,35	0,10	0,00
Global				1017	105038	1212	189384	0,46	0,36	0,10	0,00

Banda Proporcional											
Período	Parámetros			Matriz de contingencia				Métricas			
	D*	ub	lb	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	PSS	HSS
Validación 1	125	0,2	0,1	760	66560	826	60498	0,48	0,52	-0,04	0,00
Validación 2	70 - 150	0,2	0,1	348	92771	295	74593	0,54	0,55	-0,01	0,00
Global				1108	159331	1121	135091	0,50	0,54	-0,04	0,00

Anexo M. Gráficos indicador probabilístico, calibración. RENO

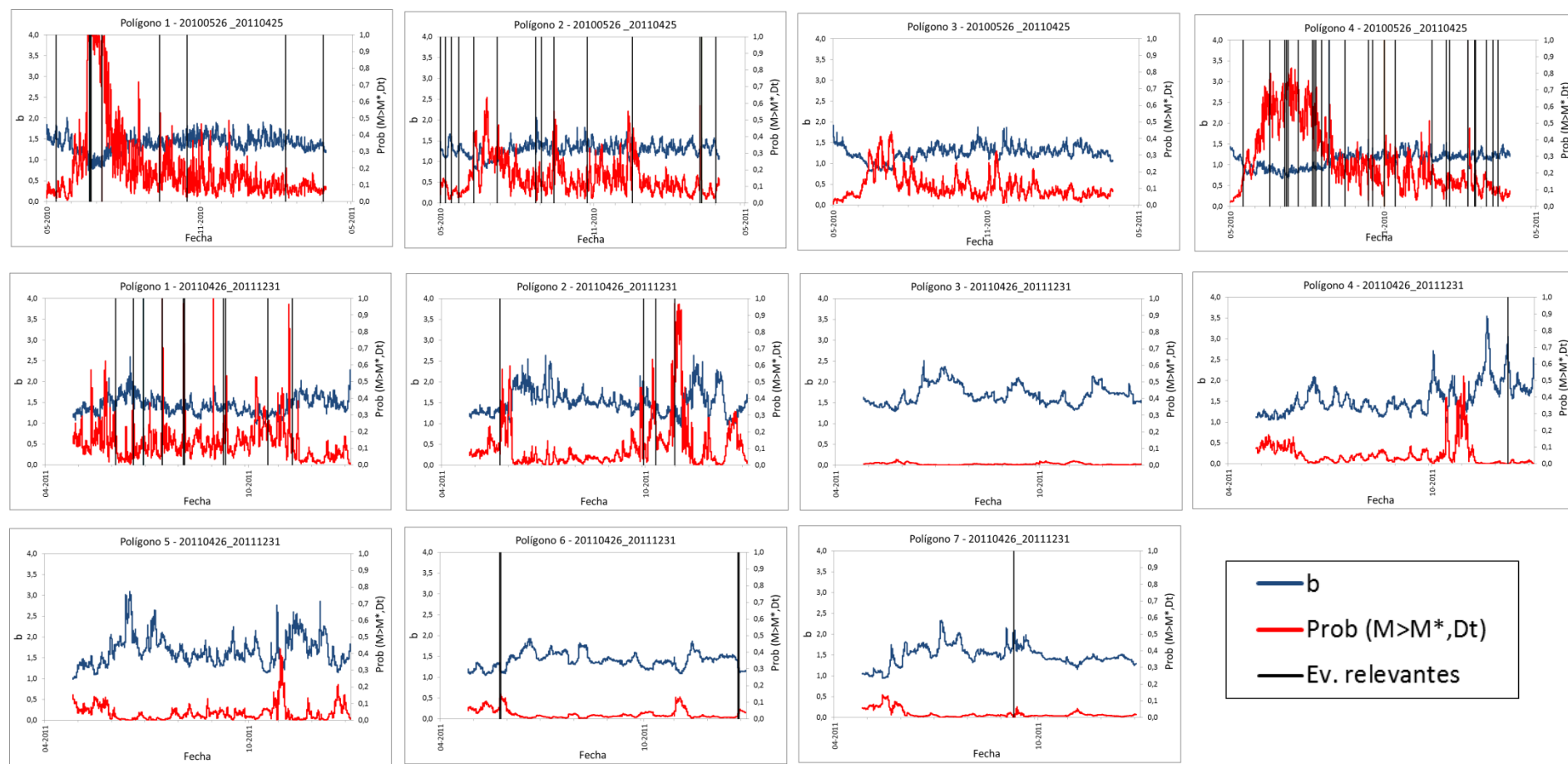


Figura M1. Comportamiento del indicador probabilístico y del parámetro b de Gutenberg-Richter en el período de validación (26-05-2010 al 31-12-2011) para los polígonos de análisis en la mina RENO. Notar que a partir del 26-04-2011 los polígonos fueron modificados (ver capítulo 3).

Bibliografía

- ALCOTT, J.M., KAISER, P.K. y SIMSER, B.P. 1998. Use of microseismic source parameters for rockburst hazard assessment. *Pure and Applied Geophysics* 153: 41-65.
- ANAGNOS, T. y KIREMIDJIAN., A. 1988. A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 3, N° 1.
- ATLASCOPCO, 2007. Mining methods in underground mining. Segunda Edición, Suecia, 142 p.
- BENJAMIN, J.R. 1968. Probabilistic models for seismic force design. *Journal of the Structural Division of the ASCE* 94(5): 1175-1196.
- CAI, M.F., JI, H.G. y WANG, J. A. 2005. Study of the time-space-strength relation for mining seismicity at Laohutai coal mine and its prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42: 145-151.
- CODELCO. 2010. Annual Memoir. CODELCO - CHILE, 236 p.
- COOK, N.G.W. 1976. Seismicity associated with mining. *Engineering Geology* 10(2): 99-122.
- DÍAZ, G. y MORALES, E. 2008. Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day – El Teniente mine – Codelco Chile. En: 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea, Suecia.
- DUNLOP, R. y GAETE, S. 1997. Controlling the induced seismicity at El Teniente Mine: the Sub-6 sector case history. En: Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Cracovia, Polonia.
- ENEVA, M. 1998. In search of a relationship between induced seismicity and larger events in mines. *Tectonophysics* 289: 91-104.
- FAWCETT, TOM. 2005. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* 27: 861-874.
- FELZER, KAREN. 2006. Calculating the Gutenberg-Richter b value. Fall Meet. Suppl., *Eos Trans. AGU*, 87.
- FERRAES, SERGIO. 1967. Test of Poisson process for earthquakes in Mexico city. *Journal of Geophysical Research* 72: 3741 – 3742.
- GARDNER, J. K. y KNOPOFF, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America* 64: 1363 – 1367.
- GLOWACKA, E. 1993. Probabilistic seismic hazard evaluation in underground mines. *Natural Hazards* 7: 121-132.

- GLOWACKA, E. y KIJKO, A. 1989. Continuous evaluation of seismic hazard induced by the deposit extraction in selected coal mines. *Pure and Applied Geophysics* 129: 523-533.
- GUTENBERG, B. y RICHTER, C.F. 1941. Seismicity of the Earth, *Geol. Soc. Am. Bull. Special papers* 34, pp. 1–131.
- HANKS, T. C. y KANAMORI, H. 1979. Moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2348-2350.
- HEAL, D., HUDYMA, M. y VEZINA, F. 2005. Seismic hazard at Agnico-Eagle's Laronde Mine using MS-RAP. En: *Maintenance Engineering and Mine Operators Conference*, Sudbury, Canada.
- HEIDKE, P. 1926. Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst. *Geogr. Ann.* 8: 301-349 (en alemán).
- HUDYMA, M. 2003. Interpreting mine seismicity data using MS-RAP, version 3. Australian Centre for Geomechanics.
- HUDYMA, M. 2004. Mining-induced seismicity in underground, mechanized, hard rock mines. Results of a world wide survey. Australian Centre for Geomechanics.
- HUDYMA, M. y POTVIN, Y. 2009. An engineering approach to seismic risk management in hard rock mines. *Journal Rock Mechanics and Rock Engineering* 43(6): 891-906.
- JOFRE J., YAÑEZ P. y FERGUSON G., 2000. Evolution in Panel Caving undercutting and drawbell excavation, El Teniente Mine. *Proceedings of Massmin 2000*, p. 249-260.
- KAGAN, YAN Y. 1999. Universality of the Seismic Moment-frequency Relation. *Pure and Applied Geophysics* 155: 537-573.
- KAGAN, YAN Y. 2002. Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results. *Geophysical Journal International* 148: 520-541.
- KAGAN, YAN Y. 2002. Seismic moment distribution revisited: II. Moment conservation principle. *Geophysical Journal International* 149: 731-754.
- KARZULOVIC, ANDRÉS. 1998. Evaluación Geotécnica Métodos de Socavación Previa y Avanzada Mina El teniente, estudio DT – CG – 98 – 003, división El Teniente, CODELCO CHILE, p. 1-19.
- KOLDAS, K.S. 2003. Rockburst and fall of ground investigations in deep level gold mines: South African example. En: *18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET*.
- LEIVA, L. 2010. Estudio de aplicación de pernos Swellex como elementos de soporte en Mina El Teniente. Tesis de grado, Mención Ingeniería de Minas, Universidad de Chile. 65 p.

- LAY, T. y WALLACE, T. 1995. Modern global seismology. California, Academic Press, 517 p.
- MALEK, F. y LESLIE, I. S. 2006. Using seismic data for rockburst re-entry protocol at INCO's Copper Cliff North Mine. ARMA/USRMS, paper 06-1163.
- MERCER, R.A. y BAWDEN, W.F. 2005. A statistical approach to the integrated analysis of mine induced seismicity and numerical stress estimates, a case study – Part II: evaluation of the relations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42: 73-94.
- MICHAEL-LEIBA, MARION. 1987. Temporal variation in seismicity of the southwest seismic zone, western Australia: implications for earthquake risk assessment. Journal of Australian Geology & Geophysics 10: 133 – 137.
- MUÑOZ, M. 2011. Petrogénesis de rocas intrusivas del yacimiento El Teniente y evolución del magmatismo Cenozoico de Chile central (33°00' – 34°30'S). Tesis de Doctorado en Ciencias Mención Geología, Universidad de Chile.
- OGATA, Y. 1988. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. Journal of the American Statistical Association 83: 9-27.
- OGATA, Y. 1989. *Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis*. Tectonophysics 169: 159-174.
- OGATA, Y. 1999. Seismicity analysis through point-process modeling: a review. Pure and Applied Geophysics 155: 471-507.
- OGATA, Y. 2001. Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence. Journal of Geophysical Research 106, p. 8729-8744.
- OMORI, F. 1894. On the Aftershocks of earthquakes. Journal of the College of Science University of Tokyo 7, p. 111-200.
- PEIRCE, C.S. 1884. The numerical measure of the success of predictions. Science 4: 453-454.
- POPLAWSKI, R.F. 1997. Seismic source parameters and rockburst hazard at Mt. Charlotte Mine. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 34: 1213-1228.
- POTVIN, Y., HADJIGEORGIOU, J. y STACEY, T.R. 2007. Challenges in Deep and High Stress Mining. Australian Centre for Geomechanics. ISBN 978-0-9804185-1-4, Perth, Australia.
- ROJAS E., MOLINA R., BONANI A. y CONSTANZO H. 2000. The pre undercut caving method at El Teniente Mine, Codelco – Chile, Proceedings of Massmin 2000, p. 261 – 266.
- SERNAGEOMIN 2011. Departamento de Seguridad Minera. Recuento de accidentes fatales.

- SHCHEBAKOV, R., TURCOTTE, D., RUNDLE, J., TIAMPO, K. y HOLLIDAY J. 2010. Forecasting the locations of future large earthquakes: An analysis and verification. *Pure and Applied Geophysics* 167: 743 – 749.
- SMALLEY, R. F., CHATELAIN, J.-L., TURCOTTE, D. L. y PRÉVOT, R. 1987. A fractal approach to the clustering of earthquakes: applications to the seismicity of the New Hebrides. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77: 1368 – 1381.
- STARK, P. y LUEN, B. 2010. Are declustered earthquakes catalogs Poisson? Seminario del Departament de estadístiques, Universidad estatal de Pensilvania.
- TRIFU, C-I., URBANCIC, T.I. y YOUNG, R.P. 1993. Non-similar frequency-magnitude distribution for $M < 1$ seismicity. *Geophysical Research Letters* 20 (6): 427-430.
- TRIFU, C-I. y SHUMILA, V. 2005. Seismic hazard assessment in mines using a marked spatio-temporal point process model. En: *Proceedings of the 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, Perth, Australia, p. 461-467.
- UTSU, T., OGATA, Y. y MATSU'URA, R. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth* 43 (1): 1-33.
- VALLEJOS, J. A. y McKINNON, S. D. 2008. Guidelines for development of re-entry protocols in seismically active mines. En: *Proceeding of the 42nd US Rock Mechanics Symposium*, San Francisco, California, ARMA/USRMS, paper 08-97
- VALLEJOS, J. A. y McKINNON, S. D. 2009a. Re-entry protocols for seismically active mines using statistical analysis of aftershock sequences. En: *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium*, Toronto, paper 4028.
- VALLEJOS, J. A., y McKINNON, S.D. 2009b. Scaling laws and their implications for re-entry protocol development. En: *The 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, Dalian, China.
- VALLEJOS, J. A. 2010. Analysis of Seismicity in Mines and Development of Re-entry Protocols. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Canadá, 403 p.
- VALLEJOS, J. A. y McKINNON, S. D. 2010a. Omori's law applied to mining-induced seismicity and re-entry protocol development. *Pure and Applied Geophysics* 167: 91 - 106.
- VALLEJOS, J. A. & McKINNON, S. D. 2010b. Temporal evolution of aftershock sequences for re-entry protocol development in seismically active mines. En: *The 5th International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Santiago, Chile.
- VALLEJOS, J. A. & McKINNON, S. D. 2011. Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48: 616 – 625.

- VALLEJOS, J. A., ESTAY, R., ZEPEDA, R. & JORQUIERA, P. 2012. A methodology for evaluating the performance of seismicity indicators at El Teniente Mine, Chile. En: 6th International conference & exhibition on mass mining, Massmin, Ontario, Canadá.
- VERA, B. 2003. Evaluación de errores de datos sismológicos y sus efectos sobre los parámetros y modelos derivados de estos para una región determinada cubierta por la red del Observatorio Sismológico del SurOccidente – OSSO. Tesis de grado. Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Santiago de Cali, Colombia.
- WEIBULL, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. ASME Journal of Applied Mechanics, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers: 293-297.
- WIEMER, S. & WYSS, M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Bull. Seismol. Soc. Am. 90: 859-869.
- WOESSNER, J. & WIEMER, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. Bull, Seismol. Soc. Am. 95: 684-698.
- ZHANG, L. 2009. Lectures from Utah University.