

Estimación de la Probabilidad de Eventos Sísmicos Inducidos por la Minería usando Modelos Numéricos Inelásticos de Escala de Mina

D. Beck *Beck Arndt Engineering, Sydney, Australia*

F. Reusch *Beck Arndt Engineering, Sydney, Australia*

S. Arndt *Beck Arndt Engineering, Sydney, Australia*

RESUMEN

Los modelos numéricos detallados de escala de mina no lineales se han calibrado usando observaciones de desplazamiento y daño en tres minas profundas. Los modelos calibrados luego se usaron para investigar la correlación entre la Energía Plástica Disipada (DPE) y la probabilidad de evento sísmico. Se observó una fuerte relación no lineal entre la DPE y la probabilidad de evento que describe el desarrollo, punto máximo y declinación en la sismicidad a medida que se deforma la roca. Las correlaciones están presentes para eventos en todas las magnitudes y donde había suficientes datos disponibles para comparación, se encontró una relación entre DPE y probabilidad de evento consistente con la relación entre magnitud de evento y la frecuencia descrita por la ecuación Gutenberg Richter. La aplicación del análisis DPE durante el diseño y el secuenciamiento de minas permitirán una descripción más cuantitativa de los riesgos sísmicos que actualmente está disponible.

1. Introducción

En el último tiempo los avances computacionales y analíticos han permitido la simulación no lineal de Elementos Finitos (FE) de todo el volumen e historia de excavación de minas complejas. El amplio rango de escalas de longitud válidas simuladas en estos modelos y el uso de elementos de orden alto permite la simulación del comportamiento de material más complejo, proporcionando una mejor plataforma numérica para probar teorías acerca de las causas y efectos de la sismicidad inducida. Los modelos de FE modernos han superado muchos de los problemas de condición de límite, problemas de ruta de esfuerzo y problemas de incompatibilidad de desplazamiento comunes en paquetes de simulación geotécnica de legado.

A medida que los modelos de FE modernos inelásticos con elementos de orden alto producen mejores estimaciones más realistas de la extensión y magnitud del daño en la roca y los desplazamientos son más realistas, los términos de energía también son más exactos, permitiendo la comparación directa del potencial de evento sísmico con la energía liberada debido al daño simulado en el modelo.

2. Paquete de Modelo

Los paquetes de modelamiento usados para este trabajo fueron ABAQUS *Explicit e Implicit*. ABAQUS es un producto de análisis orientado a especialistas, de propósitos generales, 3-D, non-lineal, FE, continuo y discontinuo. Está diseñado específicamente para análisis avanzado de problemas donde hay plasticidad importante, altos niveles de deformación y grandes cantidades de discontinuidades de material.

2.1 Supuestos de Material

Los criterios de límite de fluencia de Mohr-Coulomb y Drucker-Prager se usaron para hacer coincidir mejor los criterios de límite de fluencia desarrollados en los análisis previos en la mina. El modelo constitutivo en ambos casos es un modelo que ablanda la deformación, de material dilatante. Las fallas pueden ser

modeladas ya sea como zonas de material tipo falla dentro del continuo o como discontinuidades de contacto. Las discontinuidades de contacto permiten al bloque formado por las fallas, comportarse de una manera similar a los Elementos Discretos, excepto que la formulación utilizada se basa exclusivamente en elementos de orden alto y el ablandamiento y debilitamiento de las fallas se describe como una función de la deformación. Una ventaja de los elementos de modelo de alto orden, discretizados de manera fina es que ceden a través de las masas intactas formadas por las fallas de modo muy realista.

Se muestra un ejemplo de dislocación de falla y cedimiento a través de una masa de roca modelada para un pequeño volumen de roca del modelo real en la Figura 1. El volumen que se muestra es solo una parte muy pequeña de un modelo total, pero muestra los fenómenos de roca compleja que se simulan y la extensión a la cual se puede distorsionar la roca modelada. Este acople de movimientos discretos y daño intenso localizado del continuo es esencial en algunas aplicaciones para capturar deformación importante de la masa de roca pertinente al problema.

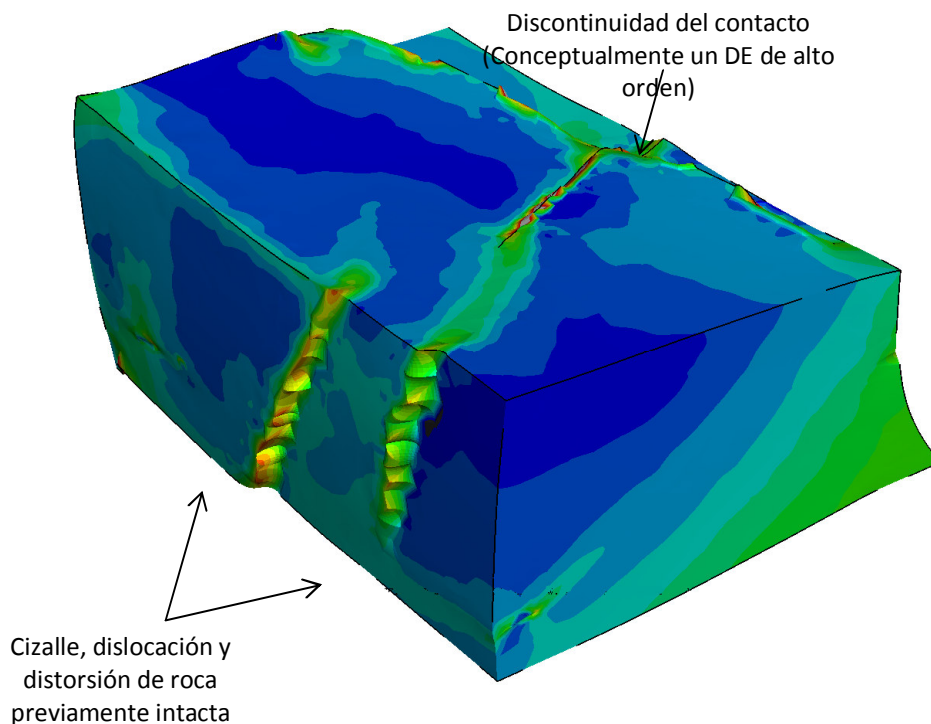


Figura 1 Deformación plástica y movimiento dentro de un pequeño volumen de roca en el modelo. La dislocación de discontinuidades de contacto en una falla es clara, como lo es el cedimiento, el cizalle y la dislocación a través de la masa

El modelo constitutivo inelástico para materiales y fallas en el modelo asumió que cada material tiene una propiedad máxima y propiedades residuales y que el cedimiento tiene como resultado la dilatación. Una vez que la resistencia máxima definida por el criterio de cedimiento se excede, se introducen las propiedades residuales. La cohesión, ángulo de fricción, rigidez y resistencia de compresión se reducen como resultado del cedimiento y se calibra un ángulo de dilatación para materiales que han cedido. Con datos adicionales para calibración, existe la opción de extender esta conducta de las partes del continuo del modelo para incorporar los efectos de confinamiento en el comportamiento de masa de roca residual. En ese momento, la respuesta de alto confinamiento es más relevante y es lo que se ha calibrado en cada caso de los estudios de caso, pero al incorporar repuesta residual más compleja, dependiente del confinamiento se mejora la exactitud del modelo y su precisión.

También existe la capacidad con esfuerzo mínimo de incorporar efectos anisotropicos adicionales debido a estructuras de pequeña escala. Estas pequeñas estructuras se podrían construir discretamente como una Red de Fractura Discreta (DFN), con la falla mapeada disponible y las superficies de unión representadas en una escala de sub-modelo, o existe la capacidad de incorporar cedimiento en las discontinuidades en una escala

sub-elemento (nodal) y través de la masa de roca. Si se usa esta última opción de un modelo de continuo para uniones, aún se simula el cedimiento en las discontinuidades y a través de la masa. Esta capacidad de cierta manera es única.

3. Correlación Sismogénica

La calibración sismogénica se describió en detalle en Beck et. al. 2006. En resumen, la Energía Plástica Disipada (DPE) se compara con la ocurrencia de evento sísmico usando el “método de evaluación de celda” descrito por Beck y Brady (2001), involucrando la discretización de todo el modelo en “celdas” regulares, volumétricas o ‘bloques de prueba’.

La tasa de liberación de DPE se calcula en cada uno de los bloques de prueba para etapas de extracción históricas y se compara con la proporción de bloques para cada rango de la tasa de liberación de DPE que contiene y no contiene eventos. La relación entre la tasa de liberación de DPE y la probabilidad de evento, (x) de un temblor pequeño de una cierta magnitud, X , que ocurre en un bloque de prueba, se iba a denotar:

$$p(X) = x \approx \frac{n_{DPEi}}{e_{DPEj}} \quad [1]$$

Donde el número total de bloques de prueba que tienen valores dentro de cualquier rango de tasa de liberación de DPE se denota e_{DPEi} , donde i es el intervalo fijo de la DPE que se está evaluando (Ej. 1000J/m^3 a 2000J/m^3) y la suma de bloques que contienen eventos dentro de un rango de magnitud como n_{DPEj} , donde j es el rango de magnitud de evento (Ej. $0M_L$ a $1M_L$) que se está considerando.

3.1 Mina 1: Secuencia de avance continuo, estudio de 1 año

La Mina 1 se discute en detalle en Beck et. al. 2006. La Mina 1 es un ejemplo de calibración sismogénica de un modelo donde está disponible una cantidad moderada de datos. De acuerdo a los estándares mundiales, la extensión de la antena sísmica y la densidad del sensor solo son moderadas, típico de las grandes minas subterráneas de Australia.

El modelo de la mina primero se calibre utilizando daño, desplazamiento y datos de desempeño de fortificación. El procedimiento de correlación sismogénica luego se ejecutó usando 12 meses de datos, simulados en etapas de excavación mensuales. Se usaron etapas de modelo más grandes en las etapas de excavación ante del periodo de estudio, pero en total se requirieron más de 50 etapas de modelo para recrear una ruta de esfuerzo realista.

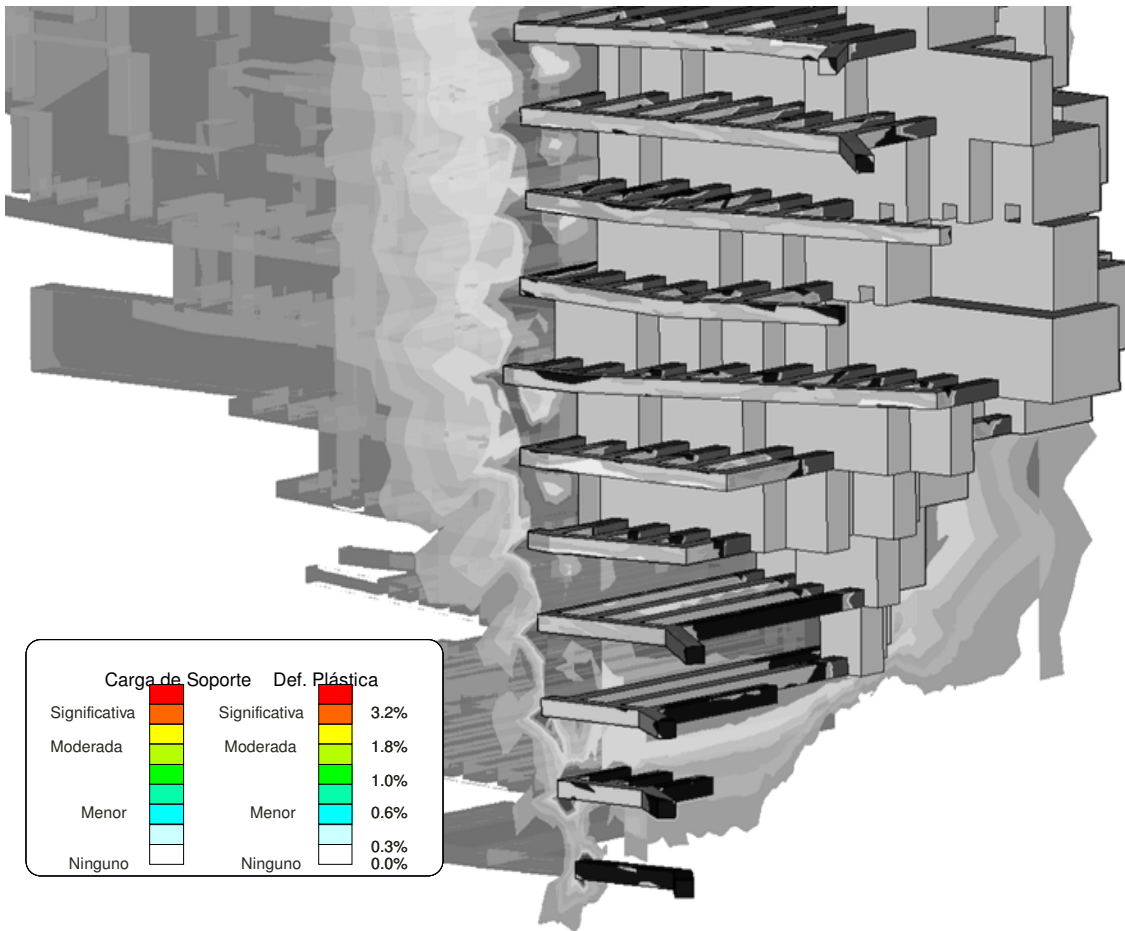


Figura 2 Ejemplo de complejidad de modelo FE usado en el estudio de la Mina 1

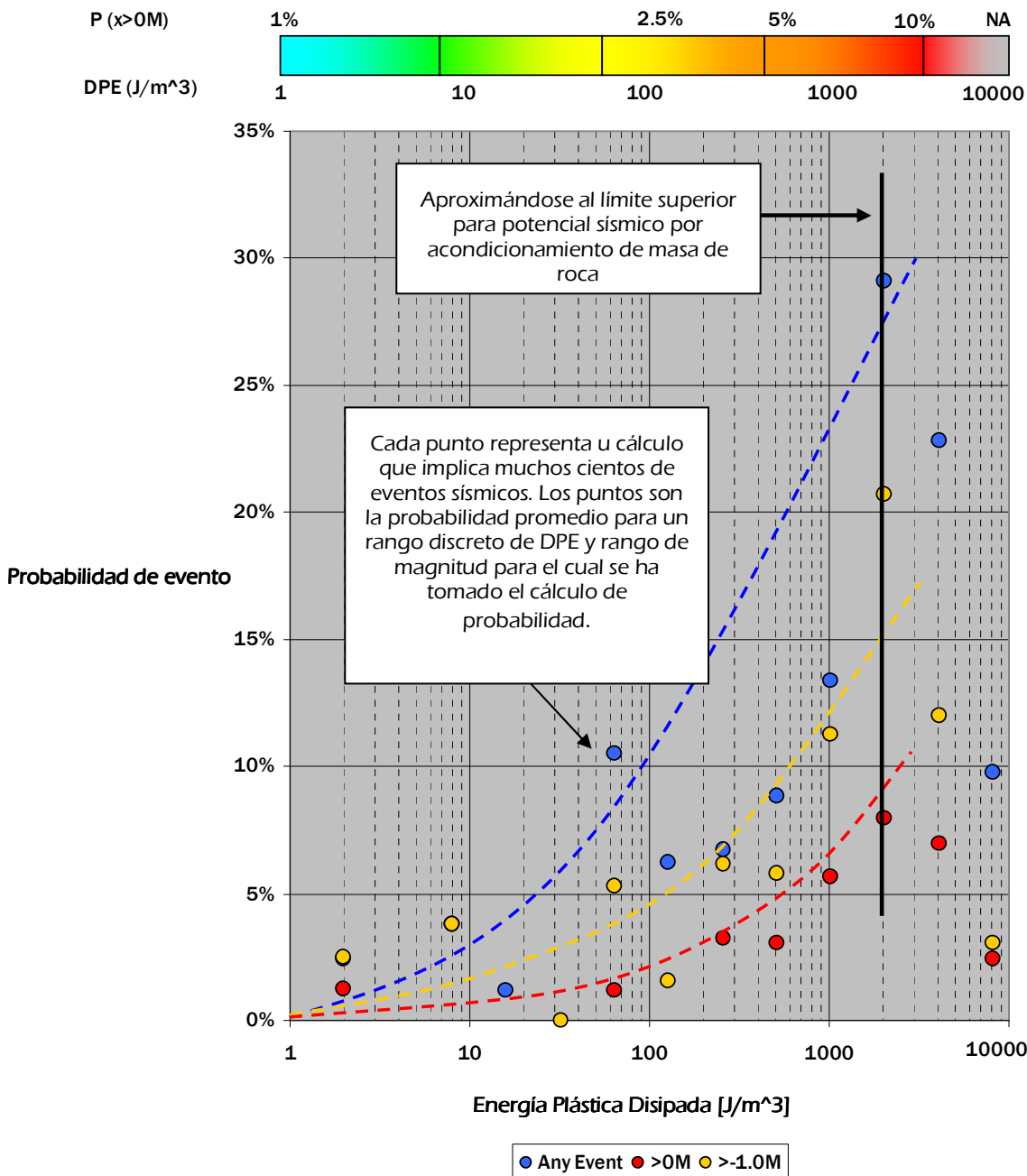


Figura 3. Correlación entre la probabilidad de evento y la Energía Plástica Disipada [DPE] para una etapa de modelamiento de 1 mes

Se muestra un ejemplo de la complejidad del modelo FE aparece en la Figura 2. Esta etapa en el modelo muestra la deformación plástica en una sección a través de la masa de roca, así como la carga de soporte contorneada en las superficies de la galería.

Los resultados de la calibración DPE aparecen en la Figura 3 y muestran que el límite para la ocurrencia de un evento es continuo y está asociado con una probabilidad de evento cercana a tasa de liberación DPE cero. Esencialmente, esto significa que casi no hay eventos sísmicos sin registrar por la relación DPE.

La figura también muestra que hay un máximo de DPE más allá del cual la probabilidad de evento disminuye. Esto ocurre porque más allá de este límite, el suelo ha sido acondicionado (ablandado por el daño) y la actividad sísmica por lo tanto debe disminuir. Para propósitos de pronóstico, se asume que una vez que un DPE total (acumulado para todas las etapas) excede $5000 J/m^3$ en las etapas de extracción previas, no se debería esperar más sismicidad y este ha probado ser un límite confiable. Si se libera un DPE superior a $2000 J/m^3$ DPE en un bloque de prueba en una sola etapa, la probabilidad disminuye como se muestra en el

grafico. Las etapas de minería más pequeñas y los periodos de predicción más breves reducen el número de celdas de prueba afectadas por la deformación excesiva durante una etapa de minería individual.

Hay una gran cantidad de información en el gráfico de la Figura 3:

1. El gráfico permite interpretar el DPE modelado como probabilidad de evento directamente con un rango de error cuantificable.
2. La “eficacia media” para cada magnitud que aparece en el gráfico es la correlación promedio entre la ocurrencia de un evento y DPE, expresada como una probabilidad en el periodo del estudio. La eficacia media es la relación que normalmente se usaría para cuantificar la relación entre DPE y la probabilidad de un evento
3. Los gráficos muestran que hay una probabilidad de evento casi cero a una tasa de liberación DPE cero. Esencialmente, esto significa que hay relativamente pocos eventos sísmicos no registrados (eventos sísmicos que ocurren donde no hay DPE). Esto implica una buena calibración de modelo, porque los límites de la zona sismogénica (el contorno de probabilidad de cero evento) deberían corresponder al contorno de cero DPE, ya que el contorno de cero DPE en el modelo es donde el modelo indica que no ocurre nuevo daño de masa de roca.
4. Las figuras también muestran que hay un máximo DPE más allá de cual la probabilidad de evento comienza a disminuir. Esto ocurre porque más allá de este límite, el suelo ha sido acondicionado (ablandado por el daño) y la actividad sísmica por lo tanto debe disminuir.

3.2 Mina 2: Minería de vestigios, estudio de 7 años

Se llevó a cabo el mismo procedimiento de calibración en la Mina 2 para todos los eventos sísmicos que ocurren dentro de 250m de una ubicación de interés por siete años de datos y los resultados se presentan en las Figuras 3 a 5.

Este estudio difiere de la mina 1 debido al gran número de eventos sísmicos, la gran cantidad de datos, así como la extensión de la minería que se realizó durante el periodo de estudio. También difiere porque la Mina 1 empleó una secuencia de avance de extracción continua, pero la Mina 2 es casi exclusivamente una mina de vestigios. Esto es relevante porque la ruta de esfuerzo típica difiere considerablemente en cada caso.

Nuevamente, el modelo de mina fue calibrado usando desplazamientos antes de que la correlación sismogénica se probara. En cuanto al cálculo de la Mina 1, cada punto de dato visible representa un cálculo que involucra muchos cientos de eventos sísmicos dentro de una cierta magnitud y rango DPE. Los puntos de datos son la probabilidad promedio (no eventos individuales) para un rango discreto de DPE para el cual se ha realizado el cálculo de probabilidad. En este caso la probabilidad es igual a la posibilidad de tener un evento a la magnitud indicada, dentro de 20 metros de la ubicación de la prueba durante el periodo de tiempo de la etapa de modelo.

Se pueden sacar las mismas conclusiones de las relaciones de la Mina 2 que se obtuvieron del estudio de la Mina 1, pero en este caso, se encontró una diferencia entre la “eficacia media” a largo plazo y periodos más cortos. Esto se puede apreciar en la Figura 4, la que muestra la correlación media, la mejor correlación y el rango de datos.

En contraste con la predicción de eficacia media de largo plazo, que tuvo un máximo a aproximadamente 17% para 2500J DPE/m³, la mayor eficacia de predicción lograda en cualquier periodo de prueba fue 63%, también a aproximadamente 2500J. A pesar de esta aparente amplia variación en eficacia, las tendencias generales para las relaciones son las mismas.

Si esto es verdad para los datos posteriores de otras minas se define una relación útil:

$$P(x > M_L) = \alpha f(DPE, M_L) [2]$$

Donde $P(x > M_L)$ es la probabilidad de que un evento x exceda una magnitud particular, α es un cierto escalar que varía entre periodos de estudio y M_L es la magnitud. Es una observación clave que la función f

(DPE, M_L), que se calcula usando el método de evaluación de bloque de prueba en este caso, tiene una forma similar, mínima y máxima en el tiempo.

Esta consistencia del máximo y la disminución de la probabilidad de evento respecto de DPE son esperables, como ciertamente lo son las propiedades de la masa de roca.

Más interesante aún es que la proporción de las probabilidades de eventos a distintas magnitudes es más o menos constante para la mayoría del rango DPE. Por ejemplo a $DPE=2500J/m^3$, $P(\text{cualquier evento})=17\%$ es más o menos el doble $P(-0.4ML) = 9\%$ y más de cinco veces $P(0ML) = 3\%$, para la correlación promedio a largo plazo y los periodos de mejor correlación en el estudio. Las proporciones son muy similares e los niveles no máximos del DPE también.

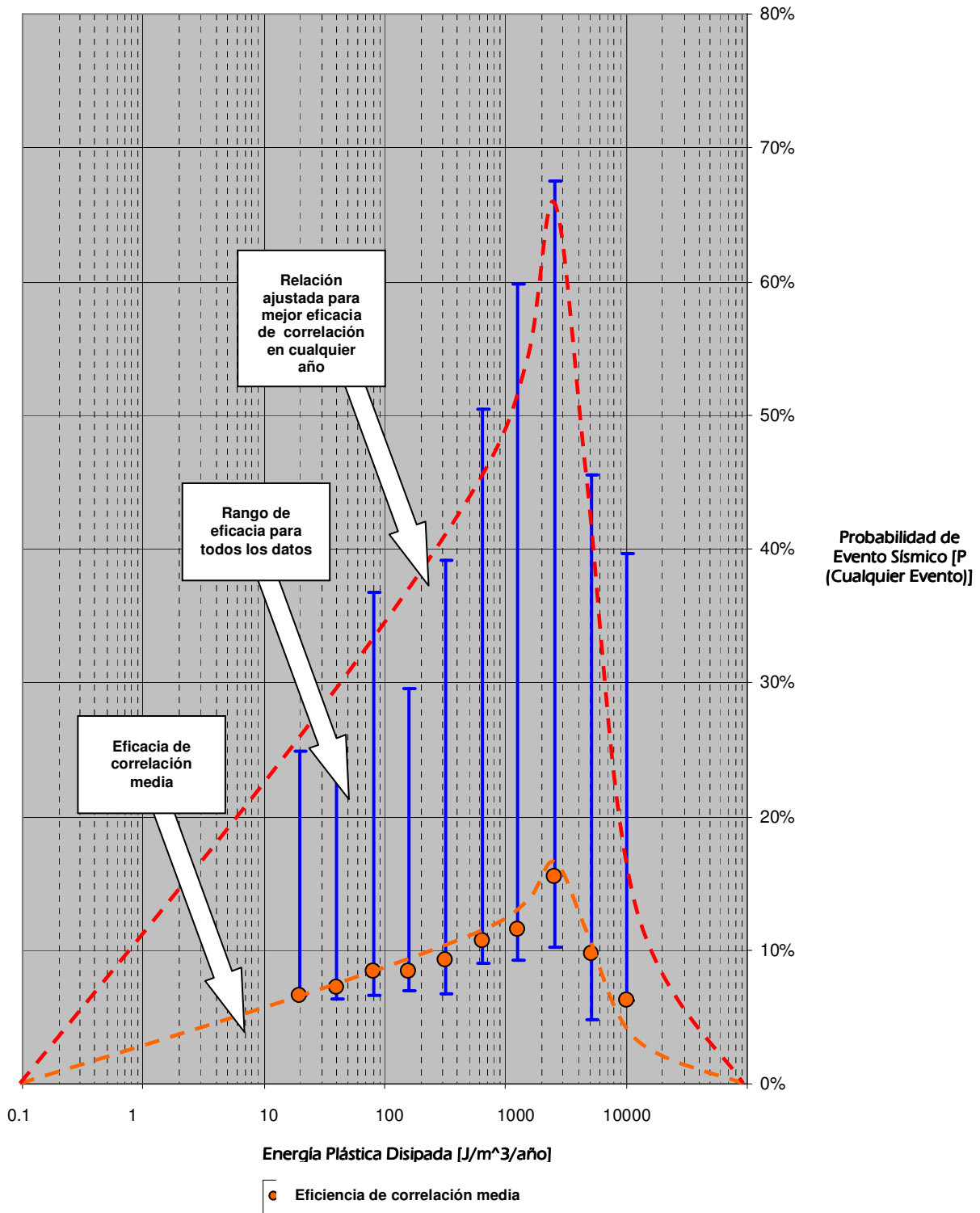


Figura 4 Probabilidad de un evento sísmico dentro de 20m en cualquier magnitud como una función de DPE modelado

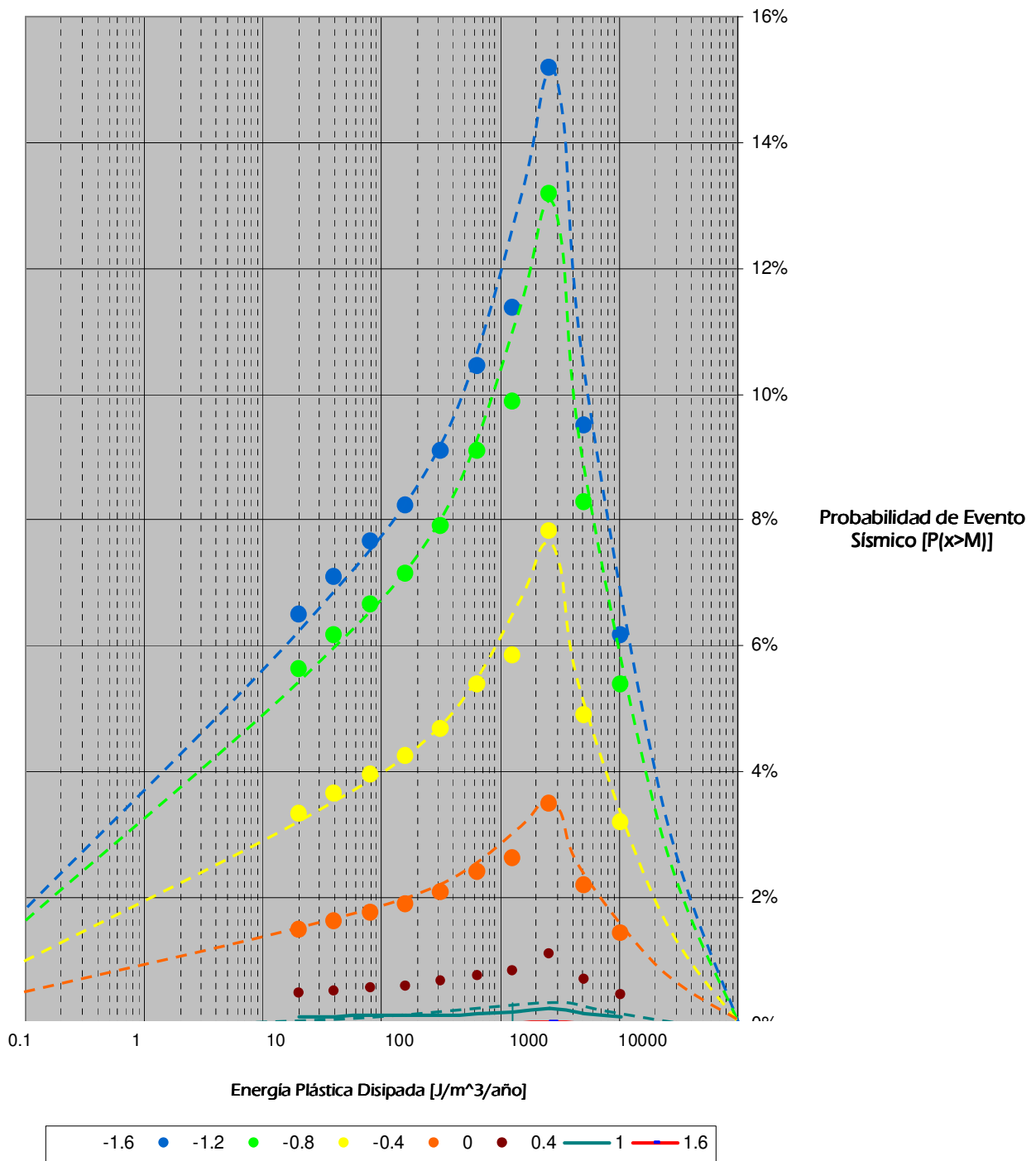


Figura 5 Probabilidad de un evento sísmico dentro de 20m que sobrepase las magnitudes listadas, como una función del DPE modelado

En efecto, esta proporción se puede describir como:

$$\frac{P(x > M_L)}{P(x > -\infty)} = f(M_L) \quad [3]$$

Si uno recuerda de la relación Gutenberg-Richter que las proporciones relativas de un evento que ocurre dentro de los rangos de magnitud y la magnitud es constante en el tiempo para mucha de la población sísmica, entonces esta constancia en la proporción relativa de eventos de distintas magnitudes sería esperable y por lo tanto podría ser posible que la función que describe $P(x > ML)$ y la relación Gutenberg-Richter estén relacionadas linealmente o sean la misma.

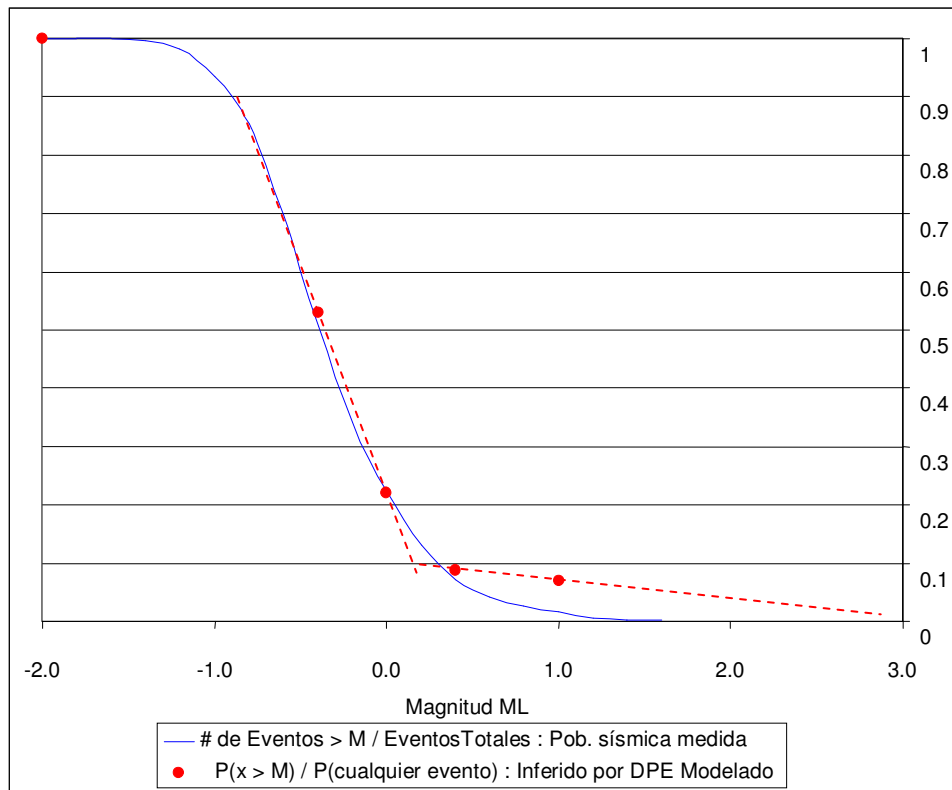


Figura 6 Una comparación de la ocurrencia relativa de eventos a magnitudes dadas en base a la Relación Gutenberg Richter observada y la predicha por la eficacia de predicción media de largo plazo

Para probar esta hipótesis, se traza la ecuación 3 para las eficacias medias a partir del modelo en comparación con la proporción modelada de $P(x > M_L)$ a $P(x > -\infty)$ en la Figura 6. Es una comparación directa de la ocurrencia relativa de eventos a magnitudes dadas basadas en la Relación Gutenberg Richter real observada y la predicha por la eficacia de predicción media de largo plazo para DPE.

Esto compara efectivamente la capacidad del modelo para predecir la ocurrencia de eventos para distintas magnitudes y la proporción que ocurre en la práctica y la correspondencia entre los datos medidos y modelados es excelente para magnitudes de hasta $0,3ML$. La sobre-predicción de eventos con magnitudes superiores a aproximadamente $0,3ML$ se podría deber a la influencia estadística de tan pocos eventos a esa magnitud, la incompatibilidad entre el tamaño de la etapa de modelo o escalas de longitud representativa y el tamaño o de dichos grandes eventos, o también podría ser una consecuencia de una rareza; dichos eventos pueden ocurrir debido a factores no muestreados estadísticamente por el resto de la población sísmica o el tiempo de dichos eventos puede ser más al azar. La investigación de la disparidad de este evento de alta magnitud continúa, pero hay algunas indicaciones tempranas de que la magnitud de la disparidad se correlaciona con gran potencial de evento.

La variabilidad remanente en la relación entre DPE y la probabilidad de evento es α , que es el escalar de la ecuación 3 que describe la variabilidad en la eficacia de la predicción año a año para las secciones

representativas de la curva. Como se discutió, la forma de la función en la ecuación 3 parece ser una constante para la masa de roca, así que la influencia más probable sobre α es la intensidad de la liberación de DPE, es decir la proporción del volumen sísmogenico que contiene altos niveles de tasa DPE en un periodo de tiempo.

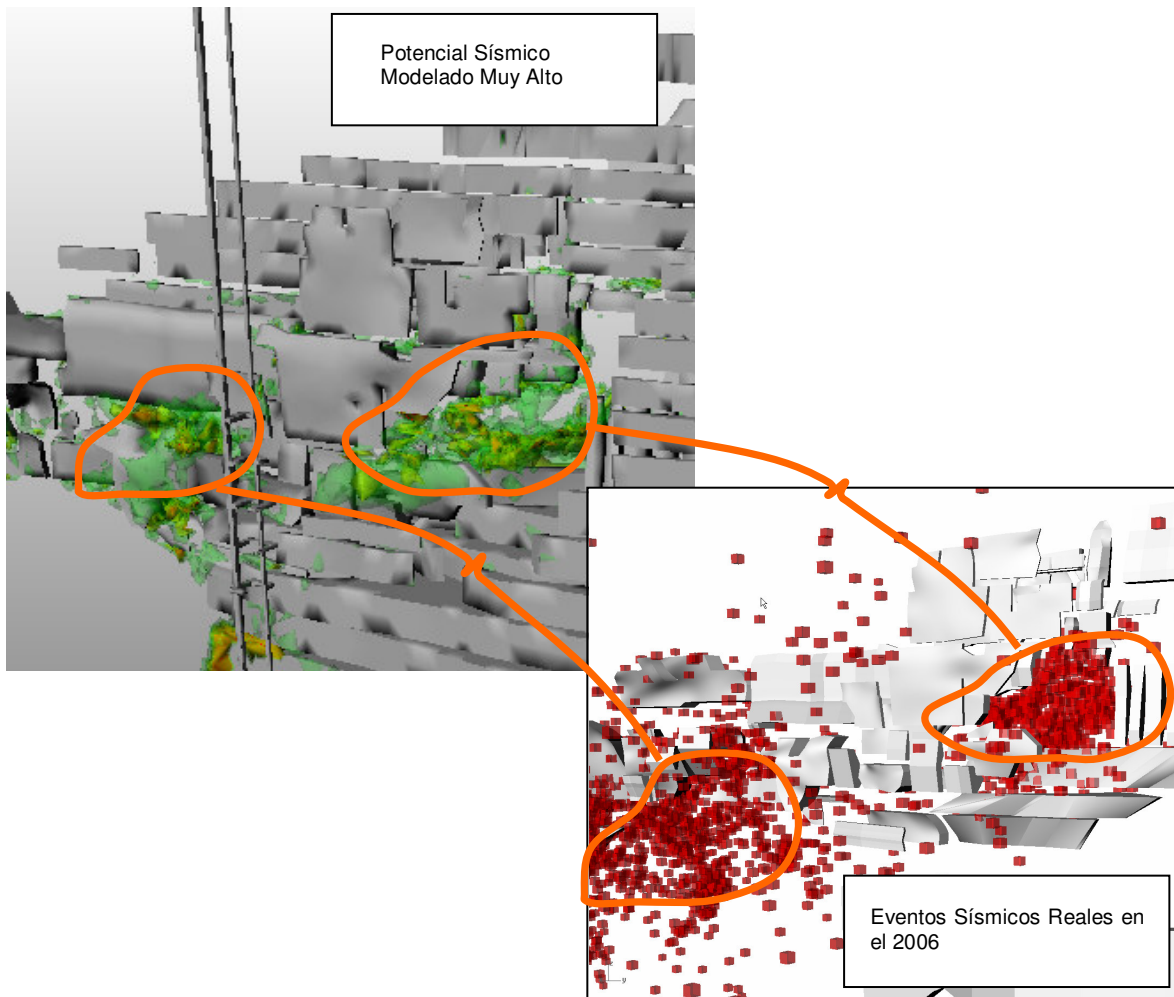


Figura 7 Una comparación del agrupamiento espacial de la sismicidad en la mina para contornos de 1 año y DPE

Anecdóticamente es bien sabido que los cambios rápidos en el volumen de daño en una masa de roca corresponderán a la mayor probabilidad de grandes eventos sísmicos, así que es posible que el control principal sobre α pueda simplemente estar, haya o no grandes volúmenes cerrados de intensa liberación de DPE en cualquier periodo de prueba. La Ecuación 3 confirma que no es el nivel real de DPE el que influye directamente en la eficacia de predicción y que hay otra variable subyacente, α que influye en la actividad sísmica máxima.

En efecto, α puede describir la influencia del tamaño y forma del volumen DPE en una unidad de tiempo sobre como el daño se concentrará y fusionará como eventos sísmicos individuales, o hipotéticamente:

$$\alpha = f(M) \quad [4]$$

Donde M es el momento modelado (escalares del tensor de momento modelado) de un volumen cerrado de DPE. Nuevamente, esta hipótesis es sujeto de investigación continua.

Cualquiera sean los controles sobre la variación de α , es aparente que hay variables adicionales que se tienen que considerar para mejorar aún más la predicción de probabilidad de evento, pero es claro que el máximo de probabilidad de evento observado previamente y una probabilidad de evento media se pueden describir mediante DPE para la mayoría de los rangos de magnitud. En esta etapa, se recomienda que la

media y el valor más alto indicado de probabilidad de evento se usen para describir los rangos de planificación para riesgo sísmico.

Este uso de un rango de probabilidades no es una imposición costosa sobre la planificación ya que las eficacias de predicción para la probabilidad media de evento aún son muy altas en comparación con las medidas tradicionales de potencia sísmica tales como ERR, ESS o potencia sísmica.

También se puede concluir, en base al ajuste observado entre el modelo y los resultados reales, que el modelo está muy bien calibrado. Simplemente no sería posible obtener tan buena coincidencia entre la aparición de sismicidad medida por cero DPE, la consistencia de la máxima eficacia sísmica y la coincidencia cercana para las poblaciones de eventos predichas y reales si la calibración no fue muy buena.

En la Figura 7 un ejemplo de la buena coincidencia entre DPE y la ocurrencia de un evento sísmico se muestra para un periodo donde los datos del modelo se han usado para predecir. El agrupamiento de la sismicidad sigue muy de cerca los contornos de DPE.

3.3 Mina 3: Detenciones primaria y secundaria, estudio de 4 meses usando sistema sísmico portátil

La Mina 3 es un caso de estudio único, porque los datos sísmicos disponibles duraron solo unos meses y se recolectaron usando dos sistemas sísmicos portátiles ESG. El modelo de la mina fue calibrado usando observaciones de daño de roca en desarrollo. La correlación DPE aparece en la Figura 8.

Debido a la naturaleza simple del sistema sísmico, solamente alrededor del 80% de los datos se pudieron usar con el resto de eventos rechazados debido a mala exactitud de ubicación. La mayoría de los datos rechazados se ubicaron fuera de la antena sísmica, así que es razonable no incluirlo en los análisis. El volumen restante de datos fue muy pequeño, lo que tiene como resultado algo de incertidumbre práctica en la aplicación del resultado. Las curvas en el gráfico distintas a la curva “cualquier evento” también se calcularon usando la relación descrita en las ecuaciones 3 y 4, porque simplemente hay muy pocos eventos para calcular una relación DPE en cada rango de magnitud.

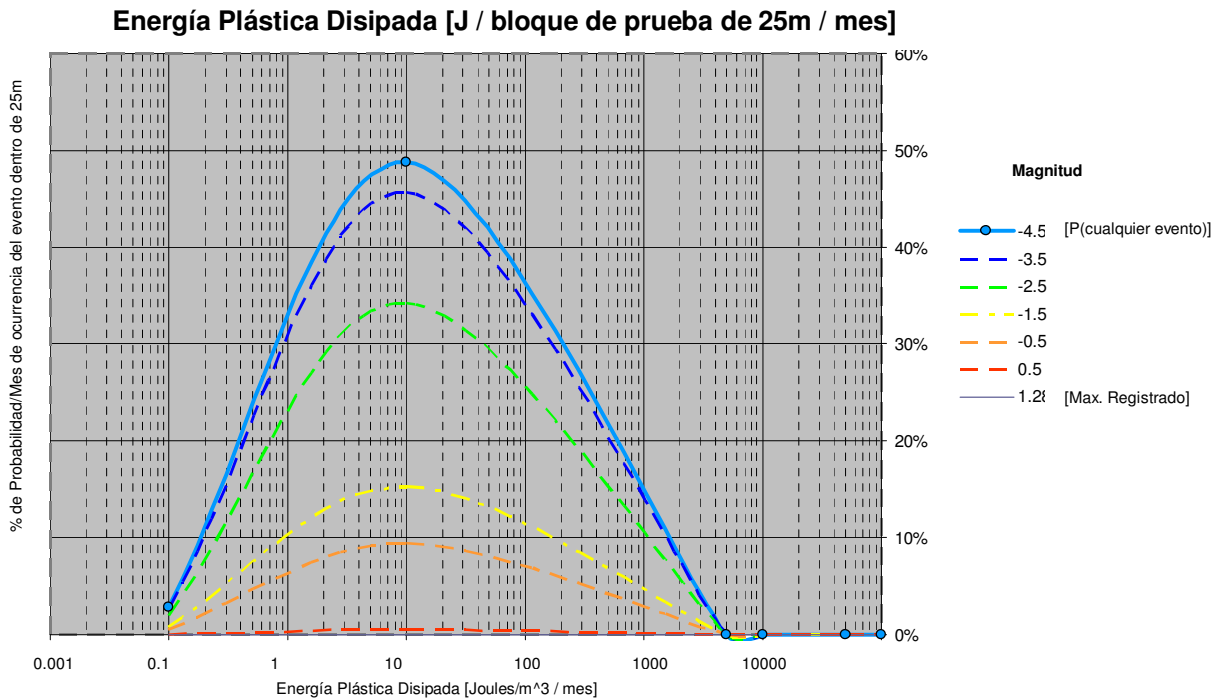


Figura 8 Probabilidad de un evento sísmico dentro de 25m en cualquier magnitud como una función de DPE modelado

Excluyendo los efectos de esta aproximación, la naturaleza de la relación entre DPE y la sismicidad replica las observaciones de las Minas 1 y 2.

1. El gráfico permite interpretar el DPE modelado como probabilidad de evento directamente con un rango de error cuantificable.
2. El gráfico muestra que hay probabilidad de evento casi-cero en tasa de liberación cero de DPE.
3. Hay un máximo DPE más allá del cual la probabilidad de evento comienza a disminuir.

El valor de este estudio, es que muestra que la medición temprana de la sismicidad puede dar una muy buena indicación de la respuesta de masa de roca de largo plazo.

4. Conclusiones

En 2 minas donde había disponible suficientes datos, el análisis mostró que hay una correlación utilizable entre DPE y la probabilidad de evento sísmico. En una tercera mina con datos limitados, se observó la naturaleza de la relación. A pesar del corto periodo de medición y la pequeña población de eventos sísmicos, la interpretación más simple del resultado sugiere que es razonable esperar que en el tiempo, se desarrolle una relación utilizable, cuantitativa y que el modelamiento de las mediciones más tempranas de sismicidad valga la pena.

La correlación observada en las tres minas permite una estimación cuantitativa de la probabilidad de tener un evento sísmico dentro de una cierta distancia de áreas acondicionadas apropiadamente dentro de un modelo FE 3D no lineal y una estimación de la probabilidad de que el evento exceda una cierta magnitud basada en la relación Gutenberg Richter medida previamente.

Este es un resultado útil. En el tiempo, con más datos será posible mejorar la resolución y nuestro entendimiento de los procesos de concentración de un evento sísmico.

Referencias

Beck. D, Reusch. F, Arndt. S, Thin. I, Heap. M, Tyler. B and Stone. C. (2006) Numerical Modelling of Seismogenic Development During Cave Initiation, Propagation and Breakthrough. Deep and High Stress Mining 2006