



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**Evaluación del riesgo potencial de estallidos de roca en minería subterránea  
mediante la integración de Análisis de árbol de fallas (FTA), Análisis de Árbol  
de Eventos (ETA) y el algoritmo Fu-ETO.**

POR

**Constanza Javiera Romero Castillo**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de  
Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil de Minas

**Profesor Guía**

Asieh Hekmat

**Miembros de la Comisión**

Roberto Gómez Espina

Marzo 2026

Concepción (Chile)

© 2026 Constanza Javiera Romero Castillo

## DEDICATORIA

*A mis padres, por creer en mis sueños incluso cuando estaban lejos, y por darme la libertad de elegir mi propio camino. Todo mi esfuerzo es para ustedes.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por darme la oportunidad de estudiar la carrera que amo en la universidad que siempre soñé, a pesar de la distancia. Su apoyo incondicional y su confianza en mí han sido el motor que me permitió llegar a esta meta. Todo este esfuerzo es también de ustedes.

A mis amigos, que hicieron que el trayecto universitario fuera una experiencia inolvidable. Un agradecimiento especial al grupo "Chechitos" y a mis amigas Katy, Fran, Cristel, Frani e Ibis, quienes han sido fundamentales en este camino. Asimismo, agradezco a mis mejores amigas, Sole, Aiyen y Karla que a pesar de la distancia siempre estuvieron para mí.

A mis roomies, Cristobal, Seba y Diego por hacer del espacio un hogar (el 1250) durante este proceso.

A mi mejor amigo, Leandro. No existen palabras suficientes para agradecerte. Has sido el apoyo más grande en todo este camino; sin tu compañía, nada de esto habría sido lo mismo. Gracias por estar siempre.

A mi pololo Enzo, a quien conocí lo últimos años de universidad y que, desde ese primer día, se convirtió en un pilar esencial, acompañándome con amor y paciencia en cada paso de esta etapa final.

A mis dos ángeles que me apoyan desde el cielo, mi Abuelita y mi amiga Consuelo.

A mis profesores, por su guía y generosidad. A la Profesora Asieh, por haber confiado en mis capacidades desde el inicio. Al Profesor René, por su disposición y ayuda constante, incluso sin ser mi profesor guía. Un agradecimiento especial al Profesor Ramón, a quien admiro profundamente por su calidad humana; su presencia en la universidad me brindó seguridad y me enseñó a confiar en mis propias habilidades.

Finalmente, a mis gatitos Nala y Obito. Gracias por acompañarme en este proceso y por hacer que mi vida en Conce no se sintiera sola. Su compañía constante fue el refugio perfecto en los momentos de mayor esfuerzo. Y, sobre todo, a Dios, por darme la fortaleza necesaria para completar este ciclo y por poner en mi camino a cada una de las personas mencionadas anteriormente.

## RESUMEN

Los estallidos de roca constituyen uno de los principales riesgos geomecánicos en minería subterránea profunda, debido a la liberación súbita y violenta de energía acumulada en el macizo rocoso. La ocurrencia de este fenómeno responde a la interacción compleja entre condiciones geomecánicas, estructurales y operacionales, lo que dificulta su análisis mediante enfoques deterministas y limita la disponibilidad de datos cuantitativos, los cuales suelen ser confidenciales a nivel industrial.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla un modelo probabilístico de evaluación de riesgo de estallidos de roca, basado en la integración del análisis de árbol de fallas (*FTA*) y el análisis de árbol de eventos (*ETA*) bajo un marco de lógica difusa, incorporando el juicio experto como fuente principal de información. El objetivo es identificar los mecanismos causales críticos del fenómeno, cuantificar su probabilidad de ocurrencia y evaluar escenarios de consecuencia asociados a la sismicidad inducida.

El *FTA* se estructura considerando el estallido de roca como evento superior (*EB*), descompuesto en eventos intermedios ( $A_n$ ) asociados a acumulación crítica de energía, sismicidad inducida y condiciones locales que permiten la expulsión del macizo. A partir de esta estructura se identifican conjuntos mínimos de corte (*CMC*), permitiendo reconocer los escenarios críticos de falla. Las probabilidades de los eventos básicos ( $P_{EB}$ ) se estiman mediante evaluaciones lingüísticas de expertos, transformadas en números difusos trapezoidales y agregadas utilizando la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal (*TOPSIS*), con ponderación de expertos mediante el método de la entropía. La desfuzzificación se realiza mediante el método del Centroide (*CoA*) y las posibilidades obtenidas se convierten en probabilidades siguiendo el enfoque de Onisawa.

Con base en los resultados del *FTA*, se desarrolla un *ETA* utilizando la sismicidad inducida como evento iniciador (*EI*), por tratarse del mecanismo más observable y operacionalmente medible. El *ETA* permite evaluar distintos escenarios de respuesta del sistema de soporte y control operacional, asignando probabilidades a cada trayectoria y cuantificando las consecuencias esperadas.

El análisis revela que el riesgo máximo ocurre al coincidir sismicidad crítica con soporte insuficiente, subrayando la importancia del diseño dinámico. El modelo *FTA-ETA* se valida como una herramienta probabilística consistente para la gestión de estallidos de roca. Esta metodología facilita la toma de decisiones estratégicas en entornos de minería subterránea profunda.

## ABSTRACT

Rockbursts constitute one of the main geomechanical risks in deep underground mining, due to the sudden and violent release of energy accumulated in the rock mass. The occurrence of this phenomenon results from the complex interaction between geomechanical, structural, and operational conditions, which makes its analysis difficult using deterministic approaches and limits the availability of quantitative data, which is often confidential at the industry level.

In this context, this work develops a probabilistic model for assessing the risk of rockbursts, based on the integration of fault tree analysis (*FTA*) and event tree analysis (*ETA*) within a fuzzy logic framework, incorporating expert judgment as the primary source of information. The objective is to identify the critical causal mechanisms of the phenomenon, quantify its probability of occurrence, and evaluate consequence scenarios associated with induced seismicity.

The *FTA* is structured by considering rock bursting as the top event (*TE*), decomposed into intermediate events ( $A_n$ ) associated with critical energy accumulation, induced seismicity, and local conditions that allow for the expulsion of the rock mass. From this structure, minimum shear sets (*SMS*) are identified, allowing for the recognition of critical failure scenarios. The probabilities of the basic events ( $P_{EB}$ ) are estimated through expert linguistic evaluations, transformed into trapezoidal fuzzy numbers, and aggregated using the technique for ordering preference by similarity to the ideal solution (*TOPSIS*), with expert weighting using the entropy method. Defuzzification is performed using the Centroid (*CoA*) method, and the resulting probabilities are converted into probabilities following the Onisawa approach.

Based on the *FTA* results, an *ETA* is developed using induced seismicity as the initiating event (*EI*), as it is the most observable and operationally measurable mechanism. The *ETA* allows for the evaluation of different response scenarios for the operational control and support system, assigning probabilities to each trajectory and quantifying the expected consequences.

The analysis reveals that the maximum risk occurs when critical seismicity coincides with insufficient support, underscoring the importance of dynamic design. The *FTA-ETA* model is validated as a consistent probabilistic tool for rockburst management. This methodology facilitates strategic decision-making in deep underground mining environments.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Contexto y motivación del estudio .....</b>                 | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Planteamiento del problema .....</b>                        | <b>1</b>  |
| <b>1.3 Justificación del estudio .....</b>                         | <b>2</b>  |
| <b>1.4 Hipótesis de investigación .....</b>                        | <b>3</b>  |
| <b>1.5 Objetivo general.....</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>1.6 Objetivos específicos .....</b>                             | <b>3</b>  |
| <b>1.7 Alcances y Limitaciones del estudio .....</b>               | <b>4</b>  |
| <b>1.8 Metodología del Estudio.....</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL .....</b>               | <b>6</b>  |
| <b>2.1 Antecedentes y Contexto de los Estallidos de Roca .....</b> | <b>6</b>  |
| 2.1.1 Definición y Mecánica del Fenómeno .....                     | 6         |
| 2.1.2 Dinámica de Propagación y Falla .....                        | 6         |
| 2.1.3 Clasificación según el Mecanismo de Falla .....              | 7         |
| 2.1.4 Impacto en la Minería Subterránea Profunda .....             | 9         |
| <b>2.2 Fundamentos de Geomecánica y Dinámica de Rocas .....</b>    | <b>11</b> |
| 2.2.1 Teoría de Acumulación de Energía Elástica .....              | 11        |
| <b>2.3 Sismicidad Inducida por Minería.....</b>                    | <b>12</b> |
| 2.3.1 Factores Locales de Expulsión .....                          | 14        |
| <b>2.4 Evolución del Análisis de Riesgo en Minería.....</b>        | <b>15</b> |
| 2.4.1 Del Empirismo Tradicional al Paradigma Probabilístico.....   | 15        |
| <b>2.5 Lógica Difusa como Herramienta de Cuantificación .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2.6 Métodos de Decisión Multicriterio .....</b>                 | <b>17</b> |
| 2.6.1 Ponderación de expertos mediante entropía difusa .....       | 17        |
| 2.6.2 Método TOPSIS .....                                          | 18        |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.7 Modelo de posibilidad de falla por el método de Onisawa.....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>2.8 Modelamiento de Confiabilidad de Sistemas .....</b>                                   | <b>20</b> |
| 2.8.1 Árbol de Fallas: Lógica deductiva y causas raíz .....                                  | 20        |
| 2.8.2 Árbol de Eventos: Análisis inductivo de trayectorias .....                             | 21        |
| <b>CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>                                             | <b>23</b> |
| <b>3.1 Arquitectura operativa y propagación de riesgo .....</b>                              | <b>23</b> |
| <b>3.2 El Algoritmo Fu-ETO.....</b>                                                          | <b>24</b> |
| <b>3.3 Desarrollo del Árbol de Fallas .....</b>                                              | <b>25</b> |
| 3.3.1 Estructura del FTA y justificación del Evento Superior .....                           | 25        |
| 3.3.2 Definición de Eventos Intermedios.....                                                 | 26        |
| 3.3.3 Definición y clasificación de Eventos Básicos .....                                    | 27        |
| <b>3.4 Aplicación Algoritmo Fu-ETO.....</b>                                                  | <b>29</b> |
| 3.4.1 Diseño del cuestionario de juicio experto.....                                         | 29        |
| 3.4.2 Selección y clasificación de expertos .....                                            | 29        |
| 3.4.3 Escalas lingüísticas empleadas y Números difusos asociados.....                        | 32        |
| 3.4.4 Construcción de la matriz de decisión .....                                            | 32        |
| 3.4.5 Cálculo de la entropía de los criterios.....                                           | 33        |
| 3.4.6 Determinación de los pesos de los criterios .....                                      | 34        |
| 3.4.7 Normalización de la matriz de decisión.....                                            | 34        |
| 3.4.8 Soluciones ideal y anti-ideal.....                                                     | 35        |
| 3.4.9 Cálculo de la cercanía relativa y pesos finales .....                                  | 35        |
| 3.4.10 Procedimiento de agregación difusa.....                                               | 36        |
| 3.4.11 Desfuzzificación por el método del Centroide .....                                    | 37        |
| 3.4.12 Conversión de posibilidad a probabilidad del Análisis de árbol de falla (Onisawa). 38 |           |
| <b>3.5 Descomposición del Riesgo: Conjuntos Mínimos de Corte.....</b>                        | <b>39</b> |
| <b>3.6 Metodología del Análisis de Importancia Estructural.....</b>                          | <b>40</b> |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.1 Ponderación Jerárquica y Cuantificación de Eventos Intermedios.....                    | 41        |
| 3.6.2 Cuantificación del Evento superior .....                                               | 41        |
| 3.6.3 Selección del Evento Iniciador para el Análisis de Consecuencias .....                 | 41        |
| <b>3.7 Desarrollo del Árbol de Eventos.....</b>                                              | <b>42</b> |
| 3.7.1 Metodología de captura y procesamiento de datos del Análisis de árbol de eventos ...   | 43        |
| 3.7.2 Conversión de posibilidad a probabilidad mediante el método de Onisawa .....           | 44        |
| 3.7.3 Cálculo de probabilidades de escenarios de consecuencia .....                          | 45        |
| <b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>                                              | <b>46</b> |
| <b>4.1 Caracterización del panel de expertos .....</b>                                       | <b>46</b> |
| 4.1.1 Jerarquización por competencia técnica .....                                           | 46        |
| 4.1.2 Diversidad de enfoques y captura de la realidad .....                                  | 46        |
| 4.1.3 Identificación de factores críticos para el Análisis de Árbol de Fallas .....          | 46        |
| 4.1.4 Análisis de la incertidumbre y variabilidad de los factores .....                      | 47        |
| 4.1.5 Interconexión entre esfuerzos y geología estructural.....                              | 47        |
| <b>4.2 Determinación de pesos mediante el método de Entropía .....</b>                       | <b>48</b> |
| 4.2.1 Análisis de la matriz de caracterización.....                                          | 48        |
| 4.2.2 Aplicación del algoritmo de Entropía.....                                              | 48        |
| <b>4.3 Cuantificación y ponderación del Árbol de Fallas.....</b>                             | <b>49</b> |
| 4.3.1 Determinación de pesos y probabilidades para los eventos intermedios .....             | 49        |
| 4.3.2 Probabilidad Final del Evento Superior.....                                            | 49        |
| <b>4.4 Análisis y jerarquización de los resultados del Análisis de Árbol de Fallas .....</b> | <b>49</b> |
| 4.4.1 Categorización de Eventos Básicos .....                                                | 50        |
| 4.4.2 Determinación de la ruta crítica.....                                                  | 50        |
| 4.4.3 Interpretación de la Probabilidad del Evento Superior y salto de magnitud .....        | 51        |
| 4.4.4 Análisis de los Conjuntos Mínimos de Corte .....                                       | 51        |
| 4.4.5 Análisis de los resultados de Importancia Estructural .....                            | 52        |

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.5 Análisis de consecuencias mediante el Árbol de Eventos .....</b>                  | <b>53</b> |
| 4.5.1 Procesamiento de juicios expertos y algoritmo Fu-ETO .....                         | 53        |
| 4.5.2 Cuantificación integral y diagrama del Árbol de Eventos.....                       | 53        |
| 4.5.3 Análisis de los hitos de Resultados Intermedios .....                              | 54        |
| 4.5.4 Análisis de las categorías de consecuencia operativa .....                         | 55        |
| 4.5.5 Interpretación de la jerarquía de impacto .....                                    | 55        |
| 4.5.6 Interpretación de la severidad frente a la probabilidad.....                       | 56        |
| 4.5.7 Interpretación de las ramificaciones y salto de magnitud.....                      | 57        |
| <b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>                                  | <b>58</b> |
| <b>5.1 Conclusiones .....</b>                                                            | <b>58</b> |
| <b>5.2 Recomendaciones .....</b>                                                         | <b>60</b> |
| <b>6 GLOSARIO.....</b>                                                                   | <b>61</b> |
| <b>7 REFERENCIAS.....</b>                                                                | <b>61</b> |
| <b>8 ANEXOS.....</b>                                                                     | <b>66</b> |
| Anexo A: Estructura lógica y representación gráfica del Árbol de Fallas (FTA) .....      | 66        |
| Anexo B: Instrumento de recolección de juicios expertos FTA.....                         | 66        |
| Anexo C: Matriz de decisión inicial para la caracterización del perfil de expertos. .... | 68        |
| Anexo D: Niveles de incertidumbre mediante el cálculo de Entropía Difusa.....            | 70        |
| Anexo E: Normalización y estandarización de las matrices de decisión.....                | 71        |
| Anexo F: Determinación de soluciones ideales y distancias euclidianas. ....              | 71        |
| Anexo G: Cercanía relativa y asignación de pesos de influencia. ....                     | 72        |
| Anexo H: Procesamiento de juicios expertos y defuzzificación.....                        | 73        |
| Anexo I: Conversión a Probabilidades de Falla .....                                      | 74        |
| Anexo J: Identificación y listado de los CMC para el sistema analizado.....              | 75        |
| Anexo K: Valores de importancia estructural para cada evento básico en el FTA.....       | 77        |
| Anexo L: Análisis de Entropía Difusa para la ponderación de $A_n$ del FTA.....           | 77        |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo M: Cuantificación de la probabilidad de los eventos intermedios. ....         | 78 |
| Anexo N: Estructura completa del ETA y determinación de trayectorias de riesgo..... | 79 |
| Anexo Ñ: Encuesta cualitativa para la cuantificación de barreras de seguridad. .... | 80 |
| Anexo O: Procesamiento de juicios expertos y defuzzificación del ETA. ....          | 82 |
| Anexo P: Conversión a Probabilidades de Falla del ETA. ....                         | 82 |
| Anexo Q: Cuantificación probabilística de las ramas del ETA. ....                   | 83 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 2

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2. 1: Mecanismo de estallidos de rocas .....                                     | 6  |
| Figura 2. 2: Influencia de la ubicación de la fuente sísmica.....                       | 7  |
| Figura 2. 3: Clasificación de estallidos de roca por mecanismo y energía liberada ..... | 8  |
| Figura 2. 4: Daños estructurales en labores del Proyecto Andesita .....                 | 11 |
| Figura 2. 5: Comportamiento esfuerzo–deformación y energía.....                         | 12 |
| Figura 2. 6: Ciclo de sismicidad inducida por procesos de hundimiento.....              | 13 |
| Figura 2. 7: Esquema conceptual de un FTA.....                                          | 21 |
| Figura 2. 8: Estructura general de un ETA .....                                         | 22 |

## Capítulo 3

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3. 1: Arquitectura sistémica del algoritmo híbrido F-ETOS.....                       | 24 |
| Figura 3. 2: FTA codificado para el análisis de causas raíz de estallidos de roca.....      | 26 |
| Figura 3. 3: Distribución de posibilidad asignada a los Eventos Básicos .....               | 38 |
| Figura 3. 4: Probabilidad de ocurrencia estimada para los Eventos Básicos.....              | 39 |
| Figura 3. 5: Gráfico de dispersión y jerarquización de los CMC.....                         | 40 |
| Figura 3. 6: Estructura codificada del ETA.....                                             | 42 |
| Figura 3. 7: Distribución de niveles de posibilidad para los eventos de control del ETA.... | 44 |
| Figura 3. 8: Distribución Probabilística de Falla por Evento de Control. ....               | 44 |

## Capítulo 4

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4. 1: Esquema cuantificado del FTA para el evento superior.....                 | 50 |
| Figura 4. 2: Contribución porcentual de los CMC más críticos al riesgo total.....      | 52 |
| Figura 4. 3: Diagrama de Cuantificación Integral del ETA para Sismicidad Inducida..... | 54 |
| Figura 4. 4: Distribución de Probabilidades de Escenarios (ETA) .....                  | 57 |

# ÍNDICE DE TABLAS

## Capítulo 2

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2. 1: Rango orientativo de distancia crítica según magnitud del evento sísmico..... | 15 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Capítulo 3

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3. 1: Definición conceptual de los eventos intermedios en el FTA .....   | 26 |
| Tabla 3. 2: Puntajes asignados a los expertos.....                             | 30 |
| Tabla 3. 3: Puntajes asignados basado en la trayectoria del experto. ....      | 31 |
| Tabla 3. 4: Puntajes asignados basado en el área de trabajo del experto .....  | 31 |
| Tabla 3. 5: Escala lingüística y valores difusos asociados. ....               | 32 |
| Tabla 3. 6: Matriz de decisión según puntajes asignados por criterio. ....     | 33 |
| Tabla 3. 7: Valor de Entropía y Peso de cada criterio. ....                    | 34 |
| Tabla 3. 8: Valores normalizados para la determinación de las soluciones. .... | 35 |
| Tabla 3. 9: Resultados peso de cada experto según criterios evaluados.....     | 36 |
| Tabla 3. 10: Pesos de influencia difusos calculados para la agregación.....    | 37 |
| Tabla 3. 11: Descripción Técnica del ETA.....                                  | 43 |

## Capítulo 4

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4. 1: Composición y probabilidad de los principales Conjuntos Mínimos de Corte. .... | 51 |
| Tabla 4. 2: Comparativa de criticidad según importancia estructural. ....                  | 52 |
| Tabla 4. 3: Cuantificación del Potencial de Estallido .....                                | 54 |
| Tabla 4. 4: Probabilidades de escenarios para la determinación de la ocurrencia .....      | 55 |

## ACRÓNIMOS

*CoA*: Centroide (Centroid of Area)

*CMC*: Conjuntos mínimos de corte

*EB*: Eventos básicos

*EI*: Evento iniciador

*P(EI)*: Probabilidad evento iniciador

*ES*: Evento superior

*ETA*: Análisis de árbol de eventos (Event Tree Analysis)

*Fu-ETO*: Fuzzy-Entropy-TOPSIS-Onisawa

*FTA*: Análisis de árbol de fallas (Fault Tree Analysis)

*GSI*: Índice de resistencia geológica (Geological Strength Index)

*RMR*: Índice de clasificación del macizo rocoso (Rock Mass Rating)

*SONAMI*: Sociedad Nacional de Minería

*TOPSIS*: Orden de preferencia por similitud con la solución ideal (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

*UCS*: Resistencia a la compresión uniaxial (Uniaxial Compressive Strength)

## NOMENCLATURA

$EI_j$ : Evento Intermedio j.

$EB_i$ : Evento Básico i.

$P(EB_i)$ : Probabilidad del evento básico i.

$M_L$ : Magnitud local.

$M_0$ : Momento sísmico.

$E_s$ : Energía sísmica radiada.

$\Delta\sigma$ : Caída de esfuerzos.

$M_w$ : Magnitud de momento.

$E_j$ : Entropía del criterio j.

$w_j$ : Peso de entropía del criterio j.

$w_E$ : Peso del experto.

$A_n$ : Evento iniciador<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> En este estudio el Evento intermedio del FTA se denota como  $A_n$  para diferenciarlo del Evento iniciador (EI) del ETA.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO**

## **1.1 Contexto y motivación del estudio**

La minería subterránea profunda enfrenta crecientes desafíos geomecánicos asociados al aumento de la profundidad de explotación, la concentración de esfuerzos y la complejidad estructural del macizo rocoso. Entre estos desafíos, los estallidos de roca constituyen uno de los fenómenos más críticos, debido a su carácter súbito, violento y potencialmente fatal. Estos eventos han sido históricamente responsables de daños severos a la infraestructura minera, interrupciones operacionales y, en los casos más graves, pérdidas humanas.

El estallido de roca se produce como consecuencia de la liberación inestable de energía elástica acumulada en el macizo rocoso, generalmente asociada a condiciones de alta rigidez, elevados estados tensionales y perturbaciones dinámicas inducidas por la actividad minera. En este contexto, la sismicidad inducida adquiere un rol central como mecanismo observable y cuantificable que refleja la respuesta dinámica del macizo frente a los cambios en el estado de esfuerzos.

La motivación de este estudio surge de la necesidad de comprender y cuantificar el riesgo potencial asociado a los estallidos de roca, considerando la naturaleza incierta, no lineal y altamente dependiente del contexto geomecánico del fenómeno. Dado que muchos de los parámetros físicos relevantes no se encuentran disponibles de forma pública o sistemática, se hace necesario el uso de enfoques probabilísticos avanzados que integren el conocimiento experto y permitan apoyar la toma de decisiones en materia de diseño, operación y gestión del riesgo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

A pesar de los avances en la instrumentación sísmica y en el diseño de fortificación dinámica, la predicción y prevención de los estallidos de roca continúa siendo un problema abierto en la ingeniería de minas. La principal dificultad radica en que el fenómeno no responde a una única causa, sino a la interacción simultánea de múltiples factores geomecánicos, estructurales y operacionales.

En la práctica, los datos que permiten caracterizar de manera determinista estos factores (como la energía sísmica liberada, la magnitud momento, la distancia a la excavación o las propiedades

detalladas del macizo) suelen ser escasos, incompletos o confidenciales, lo que limita la aplicación de modelos puramente cuantitativos. Como consecuencia, la evaluación del riesgo de estallido de roca se basa frecuentemente en criterios empíricos o en evaluaciones cualitativas no integradas.

En este escenario, surge la necesidad de desarrollar un modelo probabilístico estructurado que permita:

- Identificar los mecanismos causales críticos del estallido de roca,
- Evaluar su probabilidad de ocurrencia bajo condiciones de incertidumbre,
- Analizar las consecuencias asociadas a la ocurrencia de eventos dinámicos,
- Y priorizar medidas de mitigación de manera objetiva y trazable.

### **1.3 Justificación del estudio**

El presente estudio se justifica desde los puntos de vista técnico, metodológico y operativo.

Desde el punto de vista técnico, la integración del análisis árbol de fallas (*FTA*) y el análisis de árbol de eventos (*ETA*), permite modelar de forma sistemática tanto las causas como las consecuencias del estallido de roca, capturando la lógica causal del fenómeno. La incorporación de lógica difusa y juicio experto permite representar adecuadamente la incertidumbre inherente a los procesos geomecánicos y compensar la falta de datos instrumentales completos.

Desde el punto de vista metodológico, el uso del método orden de preferencia por similitud con la solución ideal (*TOPSIS*), con ponderación por entropía permite asignar pesos objetivos a las opiniones expertas, reduciendo el sesgo subjetivo y fortaleciendo la robustez del análisis. Asimismo, la utilización del método de Onisawa para la conversión de posibilidad a probabilidad permite traducir resultados difusos en métricas probabilísticas útiles para la gestión del riesgo.

Desde el punto de vista operativo, el modelo propuesto constituye una herramienta de apoyo para la identificación de escenarios críticos, la priorización de controles y la optimización del diseño de fortificación dinámica, especialmente en contextos de minería profunda donde el riesgo sísmico es elevado.

## 1.4 Hipótesis de investigación

La hipótesis central de esta investigación establece que la integración del *FTA* y *ETA*, bajo un enfoque probabilístico basado en juicio experto y lógica difusa, permite identificar de manera consistente los mecanismos críticos y los escenarios de mayor riesgo asociados a los estallidos de roca en minería subterránea.

De manera complementaria, se plantea que la sismicidad inducida constituye el mecanismo intermedio más observable y operacionalmente medible dentro de la cadena causal del estallido de roca, lo que justifica su selección como evento iniciador del *ETA*.

## 1.5 Objetivo general

Desarrollar un modelo probabilístico de evaluación del potencial riesgo de estallidos de roca en minería subterránea, mediante la integración de un *FTA* y un *ETA* bajo el algoritmo Fuzzy-Entropy-TOPSIS-Onisawa (*Fu-ETO*). Este modelo permite identificar mecanismos causales críticos, cuantificar probabilidades de ocurrencia ante la sismicidad inducida y evaluar escenarios de consecuencia mediante un enfoque de lógica difusa y juicio experto.

## 1.6 Objetivos específicos

**Estructurar el mecanismo causal del estallido de roca** mediante un *FTA*, definiendo los eventos básicos (*EB*) y las relaciones lógicas que convergen en el evento superior (*ES*).

**Identificar y priorizar los escenarios críticos del sistema** a través del cálculo de conjuntos mínimos de corte (*CMC*), determinando así los mecanismos dominantes para la ocurrencia del estallido de roca.

**Cuantificar integralmente el riesgo de estallidos de roca** mediante el algoritmo *Fu-ETO*, integrando la incertidumbre y el juicio experto en la estimación de probabilidades.

**Evaluar los escenarios de consecuencia mediante un *ETA***, partiendo del evento iniciador seleccionado del *FTA* para estimar la contribución de cada trayectoria al riesgo total de la operación.

## 1.7 Alcances y Limitaciones del estudio

El estudio evalúa de forma probabilística el potencial riesgo de estallidos de roca en minería profunda mediante factores geomecánicos y operacionales.

- **Alcances**

El uso de juicio experto como fuente principal de información.

La aplicación de lógica difusa para representar la incertidumbre.

El análisis de riesgo enfocado en la ocurrencia y consecuencias del estallido de roca.

- **Limitaciones**

No se utilizan bases de datos sísmicas reales debido a restricciones de confidencialidad.

Los resultados representan escenarios comparativos, más que valores absolutos.

El modelo no sustituye el diseño geotécnico detallado, sino que lo complementa.

## 1.8 Metodología del Estudio

La investigación se desarrolla mediante un enfoque cuantitativo y sistémico, estructurado en cinco fases principales que corresponden a la organización capitular del documento:

**Capítulo 1: Introducción:** Se define la problemática del estallido de rocas en minería, estableciendo los objetivos y la justificación técnica basada en la seguridad operacional.

**Capítulo 2: Marco Teórico:** Se exponen las bases científicas de la sismicidad inducida y se fundamenta el uso del modelo *Fu-ETO*, detallando la lógica del *FTA* y *ETA*.

**Capítulo 3: Desarrollo Metodológico:** Se estructura el mecanismo causal mediante el *FTA* y se realiza la captura de datos del juicio de expertos. Se aplica el algoritmo *Fu-ETO* para transformar juicios cualitativos en parámetros matemáticos.

**Capítulo 4: Análisis de Resultados:** Se identifican los *CMC* y se cuantifica el riesgo total. Se evalúan las trayectorias de consecuencia mediante el *ETA*, determinando la contribución de cada escenario al riesgo de la operación.

**Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones:** Se interpretan los hallazgos finales para proponer medidas de control focalizadas en los mecanismos dominantes identificados, validando el cumplimiento de los objetivos planteados.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

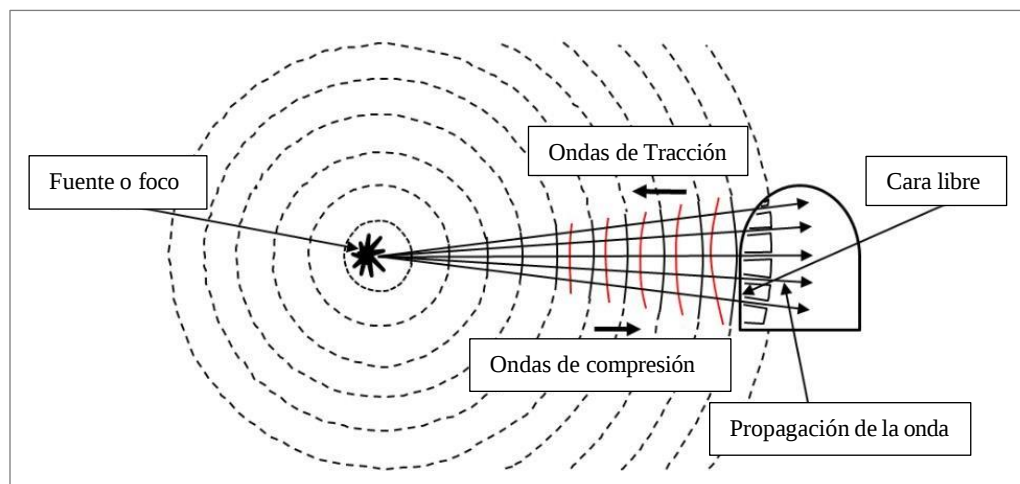
### 2.1 Antecedentes y Contexto de los Estallidos de Roca

#### 2.1.1 Definición y Mecánica del Fenómeno

El estallido de roca (*rockburst*) se define como una inestabilidad dinámica que se manifiesta cuando el material rocoso alcanza su resistencia máxima (*peak*). Este fenómeno se origina por la liberación rápida de energía potencial elástica acumulada, la cual supera la capacidad de absorción del sistema bajo altos niveles de esfuerzos confinados [1].

#### 2.1.2 Dinámica de Propagación y Falla

De acuerdo con los mecanismos de ocurrencia establecidos, el proceso se descompone en tres etapas cinemáticas fundamentales (**Figura 2.1**).



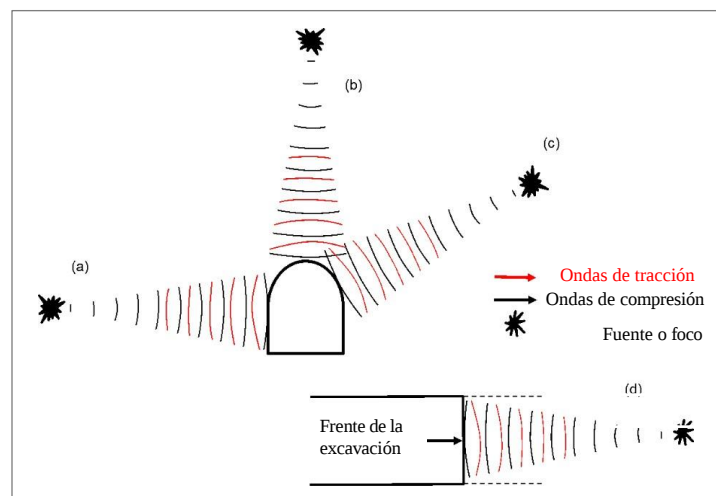
**Figura 2. 1: Mecanismo de estallidos de rocas [2].**

**Etapas 1: Generación de Ondas de Compresión:** Se produce una liberación inicial de energía en el foco o fuente (gatillada por sismicidad remota o falla local al alcanzar la resistencia *peak*), propagándose a través del macizo rocoso.

**Etapas 2: Transformación por Reflexión:** Al alcanzar una cara libre del contorno de la excavación, las ondas de compresión experimentan un fenómeno de reflexión, transformándose en ondas de tracción.

**Etapla 3: Fracturamiento y Expulsión:** Debido a que la resistencia a la tracción del material rocoso es significativamente inferior a su capacidad compresiva, la onda reflejada provoca el descostramiento y la proyección violenta de fragmentos hacia el interior de la labor.

La ubicación espacial de la fuente condiciona la dirección de propagación de las ondas y, por consiguiente, la severidad del daño observado en la infraestructura. Como se ilustra en la **Figura 2.2**, la fuente puede situarse en los costados, techo, diagonales o en el frente posterior de la excavación. Esta posición relativa determina el patrón de afectación del contorno, permitiendo identificar sectores de mayor vulnerabilidad según la geometría de la labor y el estado tensional local.



**Figura 2. 2: Influencia de la ubicación de la fuente sísmica en el contorno y frente de la excavación [2].**

El estallido de rocas se origina por sismicidad inducida externa o por el colapso inestable del macizo. Independientemente de su origen, este evento genera sismicidad local capaz de propagar la inestabilidad hacia zonas adyacentes.

### 2.1.3 Clasificación según el Mecanismo de Falla

Los estallidos de roca se clasifican de acuerdo con el mecanismo físico que los origina:

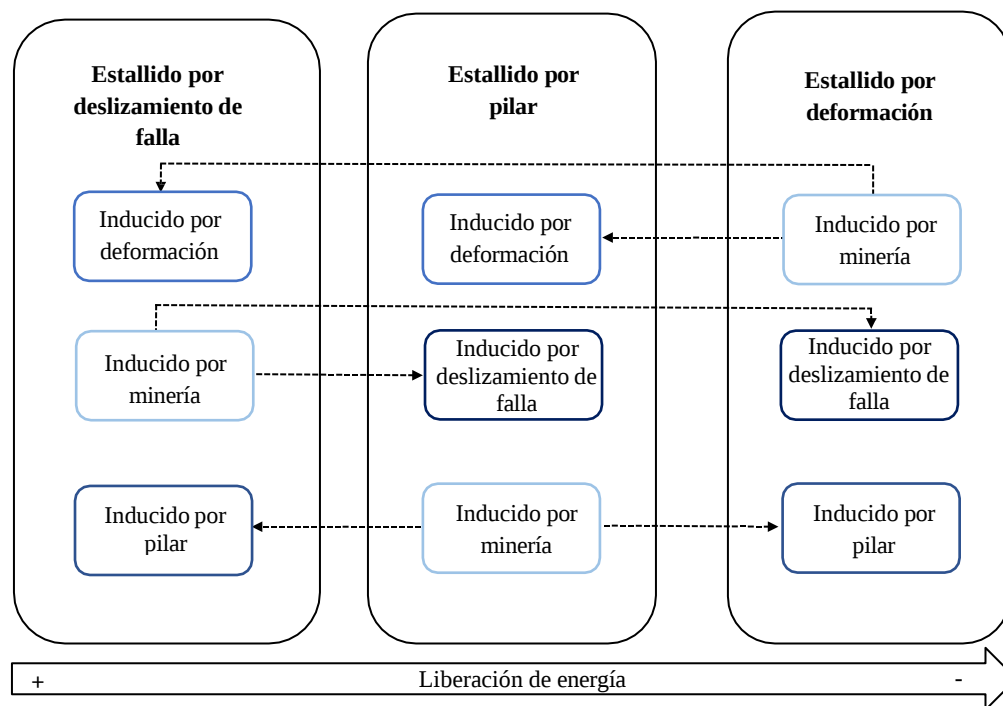
**Estallido por deformación (*strainburst*):** Se presenta cuando los esfuerzos inducidos en la periferia de la excavación superan la capacidad resistente del macizo. Se caracteriza por una falla súbita con la aparición conjunta de fracturas por extensión y corte [3]. En macizos rocosos masivos y frágiles, el potencial y la severidad del evento se encuentran condicionados por la resistencia a la

compresión uniaxial (*UCS*) y la relación de esfuerzos locales. Bajo este mecanismo, relaciones de esfuerzos críticas indican un mayor potencial de ocurrencia.

**Estallido de pilar** (*pillar burst*): Corresponde a la falla violenta del núcleo de un pilar, generada por una ruptura cortante o un colapso total de la estructura [3]. La resistencia y rigidez del pilar determinan la magnitud de la energía acumulada antes de la falla. No obstante, es la relación entre el comportamiento *post-peak* del pilar y la rigidez del sistema de carga lo que condiciona la posibilidad de una liberación energética súbita.

**Estallido por deslizamiento en falla** (*fault-slip burst*): Se origina por el movimiento súbito de una falla geológica preexistente o por la formación de una nueva superficie de corte. El evento sísmico primario genera ondas elásticas que se propagan hacia las excavaciones, provocando daños estructurales significativos.

Estos eventos suelen representar los escenarios más energéticos, con magnitud local ( $M_L$ ) que pueden alcanzar rangos entre 2.5 y 5.0 [3]. La interacción entre estos mecanismos y su transición desde procesos sísmicos de alta energía hacia fenómenos de deformación localizados se esquematiza en el modelo conceptual (**Figura 2.3**).



**Figura 2. 3: Clasificación de estallidos de roca por mecanismo y energía liberada [4].**

El esquema de la **Figura 2.3** establece una jerarquía mediante la liberación de energía que recorre el eje horizontal de izquierda a derecha y las causas e interacciones de los tipos de estallido de rocas:

**Inducido por la minería:** Se observa que la actividad extractiva es el motor principal que alimenta los tres tipos de estallidos, actuando como la perturbación inicial que rompe el equilibrio.

**Inducido por deformación:** Existe una retroalimentación entre los estallidos de pilar y los de falla, donde la deformación excesiva del macizo contribuye a la inestabilidad de las estructuras mayores.

**Inducido por pilar y falla:** Las líneas punteadas sugieren una relación de dependencia donde la falla de una estructura (como un pilar) puede transferir esfuerzos hacia una falla geológica, escalando el nivel de riesgo.

La interpretación global del esquema indica que la seguridad depende de identificar qué mecanismo está activo. Mientras que los estallidos por deformación pueden gestionarse con fortificación convencional, los eventos por deslizamiento de falla requieren estrategias de monitoreo sísmico avanzado y diseño de pilares robustos debido a su alta liberación de energía [4].

#### **2.1.4 Impacto en la Minería Subterránea Profunda**

La relevancia del estudio de los estallidos de roca radica en su capacidad de generar consecuencias críticas a nivel estructural, operativo y humano. La gestión de este fenómeno se posiciona como un eje estratégico, dado que sus efectos trascienden el daño material, afectando la viabilidad misma de los proyectos mineros de gran profundidad.

- **Implicancias en la Seguridad del Personal**

La expulsión violenta de bloques de roca hacia las excavaciones constituye un peligro crítico con potencial de provocar lesiones graves o fatalidades. De acuerdo con los registros de la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), el tipo de accidente denominado “Golpeado/ Aplastado por rocas” representa aproximadamente el 34%<sup>2</sup> de las fatalidades en la minería chilena, cifra que incluye tanto

---

<sup>2</sup> Entre 2011 y 2024 se registran 77 decesos por la causa "Golpeado/Aplastado por rocas". Al sumar las 6 fatalidades de 2025, el total asciende a 83 víctimas, lo que representa el 34% de la mortalidad total en la minería para dicho periodo.

desprendimientos convencionales como eventos severos vinculados a estallidos de roca [5]. Esta estadística subraya la necesidad de implementar diseños de fortificación dinámica capaces de absorber la energía liberada durante un evento sísmico.

- **Daño Estructural y Continuidad Operacional**

Desde una perspectiva técnica y económica, los estallidos de roca se manifiestan mediante fracturamiento extenso del macizo, proyecciones a alta velocidad y deformaciones severas en galerías, rampas y caserones. Estas condiciones derivan en:

**Pérdida de capacidad de sostenimiento:** El daño a los sistemas de soporte reduce la vida útil de las labores y exige costosos procesos de reforzamiento y rehabilitación.

**Interrupciones logísticas:** La ocurrencia de un evento genera suspensiones parciales o totales de la producción, retrasos en los planes de avance y un incremento significativo en los costos operacionales debido a las detenciones no programadas.

- **Antecedentes Recientes: El Caso de Mina El Teniente**

La gravedad de estos fenómenos se ilustra mediante la ocurrencia de episodios críticos en la Mina El Teniente, específicamente en el sector del Proyecto Andesita. Un evento ocurre el 24 de julio de 2023, donde se registra un estallido de roca asociado a un evento de  $M_L$  3.9 [6], [7]. Este siniestro resulta en el aislamiento de un trabajador, doce operarios lesionados y daños severos en la infraestructura, lo que obliga a la paralización de la producción y genera alertas sobre la suficiencia de los sistemas de fortificación (**Figura 2.4**).

Esta secuencia de inestabilidad precede a una tragedia mayor ocurrida el 31 de julio de 2025. En esta última instancia, un sismo  $M_L$  4.2 desencadena una liberación violenta de energía producto de las elevadas presiones acumuladas en el macizo rocoso, provocando un colapso de gran escala con pérdida de vidas humanas y daños estructurales severos [8].

Este accidente evidencia cómo la interacción entre la alta concentración de esfuerzos, la sismicidad inducida y las condiciones locales desfavorables puede derivar en escenarios catastróficos. La magnitud de estos impactos justifica la implementación de evaluaciones probabilísticas, como las propuestas en este estudio, para priorizar zonas de alta vulnerabilidad y optimizar las estrategias de control de riesgos.



Figura 2. 4: Daños estructurales en labores del Proyecto Andesita tras evento sísmico el 24 de julio de 2023 [6].

## 2.2 Fundamentos de Geomecánica y Dinámica de Rocas

El estudio de los estallidos de roca requiere comprender la interacción entre el estado de esfuerzos, la capacidad de almacenamiento energético del macizo y los mecanismos de liberación de carga. A continuación, se analizan los pilares geomecánicos que sustentan este fenómeno.

### 2.2.1 Teoría de Acumulación de Energía Elástica

La ocurrencia de un estallido de roca se encuentra supeditada a la capacidad del sistema para almacenar energía potencial elástica [9]. Este proceso depende de la interacción entre la rigidez del macizo rocoso y la rigidez del sistema de carga (el entorno geológico circundante).

- **Capacidad de Almacenamiento y Rigidez**

La acumulación de energía es proporcional a la rigidez y a la fragilidad del material. En rocas fuertes y masivas, el macizo actúa como un acumulador que, al ser sometido a altos esfuerzos, almacena energía de deformación de manera eficiente [10].

- **Relación Sistema de Carga-Macizo**

La inestabilidad dinámica se produce cuando la rigidez del sistema de carga es menor que la rigidez *post-peak* de la roca. Como se ilustra en el análisis de balance energético (**Figura 2.5**), los sistemas de carga más flexibles o "suaves" no poseen la capacidad de absorber la energía liberada

durante la falla, generando un exceso de energía (área sombreada) que se traduce en una descarga violenta y explosiva.

Por el contrario, un sistema de carga rígido permite una disipación controlada de la energía, lo cual reduce significativamente el potencial de un estallido de rocas. En macizos de menor calidad, caracterizados por bajos valores de índice de resistencia geológica (*GSI*) e índice de clasificación del macizo rocoso (*RMR*), la energía se disipa progresivamente mediante deformaciones plásticas; este proceso impide la acumulación crítica necesaria para una falla dinámica [3].

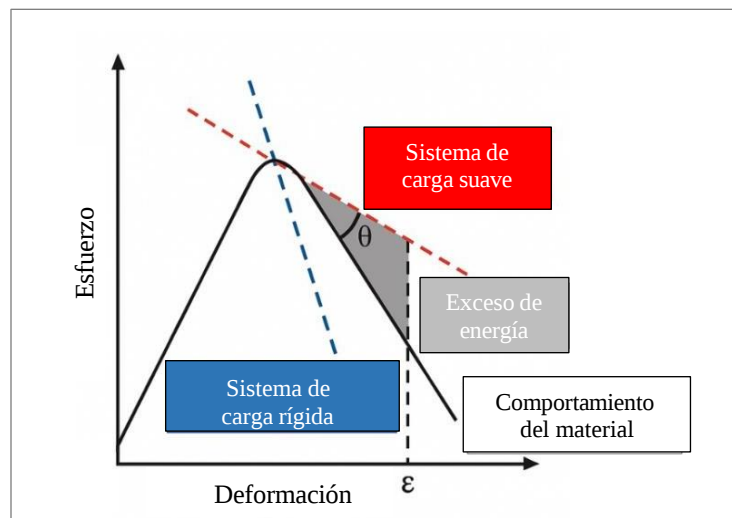


Figura 2. 5: Comportamiento esfuerzo–deformación y energía en sistemas de carga [3].

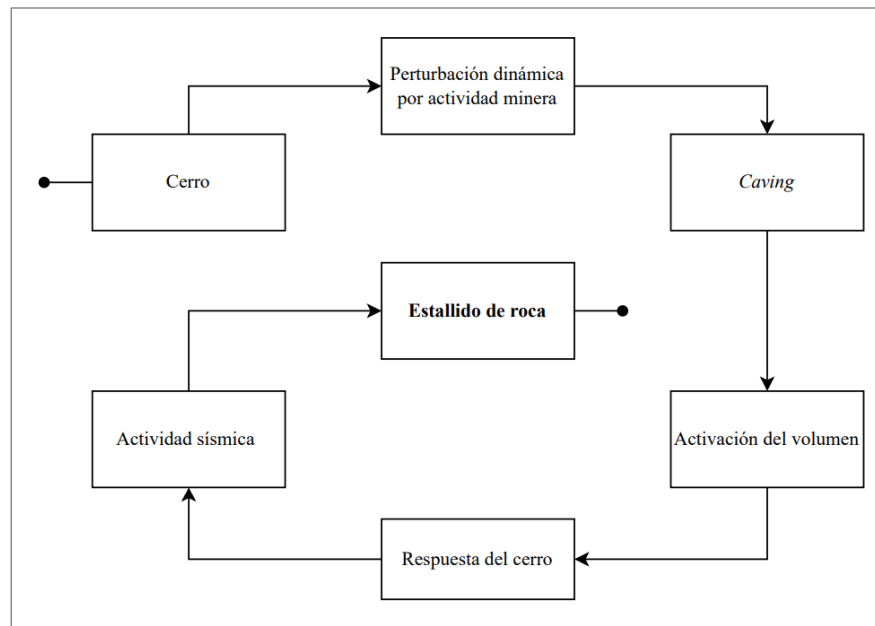
## 2.3 Sismicidad Inducida por Minería

La sismicidad inducida se origina como consecuencia directa de la actividad extractiva, la cual modifica el equilibrio natural de esfuerzos en el macizo rocoso. A diferencia de la sismicidad tectónica, este fenómeno responde a perturbaciones antropogénicas como excavaciones profundas, tronaduras o el colapso de bloques.

- **Dinámica del Hundimiento y Respuesta del Macizo**

La dinámica de inestabilidad se inicia con una perturbación inicial, donde la actividad minera rompe el estado de equilibrio litoestático del sector. Este proceso desencadena un colapso progresivo (*caving*) que propaga el quiebre hacia los niveles superiores, provocando una respuesta geomecánica en la cual el macizo reacciona mediante deformaciones que acumulan energía elástica. Finalmente, el

ciclo culmina con una liberación de energía en forma de ondas sísmicas que, bajo condiciones de alta concentración de esfuerzos, derivan en un estallido de roca [11] (**Figura 2.6**).



**Figura 2. 6: Ciclo de sismicidad inducida por procesos de hundimiento [11].**

- **Cuantificación mediante Parámetros de Fuente**

Para evaluar la potencial destructividad de estos eventos sísmicos, se recurre a modelos cinemáticos que permiten describir la física de la ruptura. De acuerdo con el modelo de Brune [12], la fuente sísmica se representa como una ruptura circular bajo corte puro, cuya magnitud y severidad se caracterizan mediante tres parámetros fundamentales: el momento sísmico ( $M_0$ ), que mide el tamaño físico de la ruptura y la energía total liberada; la energía sísmica radiada ( $E_s$ ), que corresponde a la fracción de energía de deformación propagada a través del macizo en forma de ondas elásticas; y la caída de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ), la cual representa la diferencia entre el estado de esfuerzos antes y después de la ruptura, indicando que valores elevados son precursores de eventos más violentos y con un mayor potencial de daño estructural.

A partir del  $M_0$ , se calcula la magnitud de momento ( $M_w$ ). Esta escala resulta fundamental en geomecánica debido a que no presenta saturación y permite convertir el valor físico del  $M_0$  en una métrica comparable a la  $M_L$ , pero sustentada directamente en la energía total liberada por el evento.

La relación estándar entre ambos parámetros, que permite estandarizar la severidad sísmica, viene dada por la ecuación:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6.07 \quad (2.1)$$

En minería subterránea profunda, se establece que valores de  $M_w > 2.5$  indican un potencial de daño crítico, mientras que eventos con  $M_w > 3.5$  se asocian a colapsos estructurales severos [13].

### 2.3.1 Factores Locales de Expulsión

La severidad de un estallido no depende solo de la magnitud del sismo, sino de las condiciones geomecánicas locales que facilitan o impiden la expulsión del material hacia la labor.

- **Calidad y Heterogeneidad del Macizo**

La presencia de contactos litológicos con diferentes módulos de deformación genera zonas de concentración de esfuerzos en los límites de materiales rígidos. Las rocas con alta *UCS* presentan un comportamiento más frágil, aumentando la violencia de la expulsión.

- **Influencia de Estructuras Preexistentes**

Las fallas, diaclasas y contactos influyen en la partición de la energía. Si las estructuras están orientadas favorablemente respecto a la cara libre, actúan como planos de debilidad que facilitan la cinemática de expulsión.

- **Distancia Crítica y Atenuación**

La energía sísmica disminuye con la distancia desde el foco (hipocentro). Se establece una "distancia crítica" dentro de la cual la energía transmitida supera la capacidad de absorción del soporte. Para eventos de magnitud superior a 4.0, como el registrado en El Teniente (2025), esta distancia puede extenderse hasta los 430 m, dependiendo de la geología local y la presencia de discontinuidades que puedan amplificar o dispersar las ondas (**Tabla 2.1**).

**Tabla 2. 1:Rango orientativo de distancia crítica según magnitud del evento sísmico [14],[15].**

| <b>Magnitud del evento<br/>sísmico [<math>M_w</math>]</b> | <b>Energía liberada<br/>[kJ]</b> | <b>Distancia crítica típica [m]</b> |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1.0 -1.9                                                  | <50                              | 0 – 30                              |
| 2.0 - 2.5                                                 | 50 - 200                         | 30 - 100                            |
| 2.6 – 3.5                                                 | 200 - 50000                      | 100 - 250                           |
| 3.6 - 4.3                                                 | 50000- 6100000                   | 250 - 430                           |

## **2.4 Evolución del Análisis de Riesgo en Minería**

### **2.4.1 Del Empirismo Tradicional al Paradigma Probabilístico**

Históricamente, el análisis de estabilidad en excavaciones presenta una confusión recurrente entre los conceptos de peligro y riesgo. Mientras el peligro se define como el fenómeno físico con potencial de causar daño, el riesgo constituye la probabilidad de pérdida, integrando tanto la amenaza como la vulnerabilidad de la infraestructura. Bajo la perspectiva de los enfoques empíricos tradicionales, existen limitaciones críticas al omitir la vulnerabilidad real de la excavación, la cual depende de la calidad del macizo rocoso y de la efectividad del sistema de soporte ante sollicitaciones dinámicas [15]. La mayoría de estos criterios convencionales se basa en una visión simplificada de la relación esfuerzo-resistencia, ignorando que el macizo se encuentra bajo condiciones de esfuerzos biaxiales o triaxiales complejos que alteran su comportamiento mecánico [16].

Esta simplificación técnica de los métodos empíricos impide modelar la liberación repentina de energía elástica acumulada, factor determinante en la magnitud de un estallido de roca. Al fundamentarse en correlaciones estáticas y observaciones históricas, estos métodos no logran adaptarse a la variabilidad geológica de nuevos yacimientos ni a las condiciones de minería a gran profundidad, donde la magnitud de los esfuerzos *in situ* y la calidad del macizo poseen un rol crítico. Por consiguiente, el uso exclusivo de factores de seguridad fijos resulta insuficiente, ya que no captura la incertidumbre asociada a las propiedades mecánicas de la roca ni a las perturbaciones dinámicas inducidas por la operación.

Como respuesta a estas deficiencias, la transición actual reconoce que el estallido de rocas constituye un evento estocástico bajo esquemas deterministas. A diferencia de los modelos tradicionales, los enfoques probabilísticos permiten abordar la incertidumbre mediante el uso de distribuciones de probabilidad, facilitando la cuantificación de la falla del soporte ante demandas sísmicas específicas. No obstante, en la minería profunda, la complejidad geomecánica genera vacíos de información en el monitoreo que imposibilitan la obtención automática de dicha probabilidad, debido a fenómenos como la atenuación de señales y fallas en la transmisión de datos [17].

## 2.5 Lógica Difusa como Herramienta de Cuantificación

Dada la incapacidad de los métodos probabilísticos convencionales para operar con datos puramente cualitativos o incompletos, la lógica difusa surge como una solución robusta para formalizar matemáticamente el juicio experto. Este paradigma permite tratar la ambigüedad inherente al lenguaje técnico mediante el uso de variables lingüísticas y números difusos, transformando observaciones subjetivas sobre el estado del soporte o el comportamiento del macizo rocoso en parámetros de entrada precisos para modelos de confiabilidad. La aplicación de la lógica difusa en esta investigación se fundamenta en los siguientes componentes operativos:

**Variables Lingüísticas:** Constituyen los términos del lenguaje natural (como "Muy Probable") que los expertos utilizan para describir fenómenos geomecánicos. Estas palabras se vinculan a conjuntos difusos para permitir su procesamiento computacional.

**Funciones de Pertenencia:** Las funciones trapezoidales determinan el grado de pertenencia de un valor al conjunto difuso. Su estructura integra una base mayor para la incertidumbre y una menor para la certeza del experto. Este método transforma juicios cualitativos en parámetros matemáticos para la cuantificación del riesgo.

**Números Difusos Trapezoidales:** Representan la estructura matemática donde el intervalo  $[b, c]$  define el valor más probable del evento, mientras que los extremos  $a$  y  $d$  establecen los límites inferior y superior de la posibilidad.

De este modo, la incertidumbre técnica no se ignora, sino que se cuantifica sistemáticamente. Este proceso permite que la experiencia operacional de los especialistas se integre directamente en el cálculo de la probabilidad de falla en entornos de alta complejidad sísmica. Al normalizar estos juicios,

la lógica difusa actúa como el motor que alimenta tanto al análisis de entropía para la ponderación de expertos como al método de Onisawa para la obtención de datos cuantitativos destinados a los árboles de fallas y eventos [18].

## **2.6 Métodos de Decisión Multicriterio**

En entornos de alta complejidad geomecánica, la integración de la lógica difusa con métodos de decisión multicriterio permite una cuantificación más rigurosa de las variables cualitativas.

### **2.6.1 Ponderación de expertos mediante entropía difusa**

El análisis de entropía difusa constituye una herramienta objetiva para la determinación de los pesos de importancia de los evaluadores dentro de un panel de expertos. En el estudio de sistemas con alta incertidumbre, se reconoce que la calidad de la información recolectada depende directamente de la idoneidad y el perfil técnico de quienes la proporcionan. La teoría de la entropía, integrada con la lógica difusa, permite medir el grado de dispersión o desorden en los datos que describen a los expertos, asignando una mayor carga de importancia a aquellos atributos que poseen una mayor capacidad de discriminación informativa.

Este enfoque parte de la premisa de que el valor de un juicio experto no es uniforme, sino que se encuentra sujeto a criterios específicos como el nivel de instrucción, los años de experiencia profesional, el cargo desempeñado y el conocimiento técnico especializado. A diferencia de las asignaciones arbitrarias de pesos, la entropía difusa evalúa la variabilidad de estos criterios entre los miembros del panel. Si un atributo presenta una baja entropía, se interpreta que existe una alta diversidad de información, lo que otorga a dicho criterio un peso mayor en el cálculo del coeficiente de credibilidad final de cada experto [19].

- **Metodología de la Entropía Difusa**

La metodología para establecer la ponderación de los expertos se desarrolla de manera sistemática a través de las siguientes fases:

**Identificación de atributos de idoneidad:** Se definen los criterios clave que califican la competencia de un experto para el área de estudio (ej. formación académica, experiencia en el sector, especializaciones).

**Construcción de la matriz de evaluación de expertos:** Se recopila la información socio profesional de cada miembro del panel y se traduce a escalas numéricas o lingüísticas estandarizadas.

**Normalización de la información:** Se ajustan los valores de los criterios para asegurar la comparabilidad entre magnitudes distintas, eliminando sesgos derivados de las unidades de medida.

**Cálculo del valor de entropía por criterio:** Se cuantifica el nivel de incertidumbre para cada atributo. Un criterio con menor entropía indica que los expertos presentan perfiles muy distintos en esa área, lo que lo convierte en un factor determinante para diferenciarlos.

**Determinación de pesos de importancia:** Se derivan los pesos finales para cada criterio y, consecuentemente, se obtiene el peso individual de cada experto ( $w_E$ ). Este coeficiente resulta fundamental para la posterior etapa de agregación de juicios, donde las opiniones individuales se consolidan en un número difuso trapezoidal único.

### 2.6.2 Método TOPSIS

El método de Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (*TOPSIS*) se fundamenta en el principio geométrico de que la alternativa elegida debe poseer la distancia más corta hacia una solución ideal positiva y la distancia más larga respecto a una solución ideal negativa. Esta metodología constituye una herramienta robusta para la toma de decisiones multicriterio, permitiendo la jerarquización de alternativas complejas mediante la evaluación de su proximidad relativa a los extremos óptimos y críticos del sistema [20].

En el contexto de la presente investigación, la estructura base del *TOPSIS* se integra con la lógica difusa para procesar la incertidumbre inherente a los datos geomecánicos y operativos. Esta adaptación permite que el algoritmo trabaje con números difusos trapezoidales, transformando las evaluaciones cualitativas del panel de expertos en indicadores cuantitativos de prioridad. El método se aplica específicamente para jerarquizar los escenarios de riesgo obtenidos en el *FTA* y *ETA* facilitando la identificación de los eventos causales o fallas en las barreras de control que representan la mayor amenaza crítica para la operación minera.

- **Metodología del proceso TOPSIS**

El funcionamiento de esta metodología se desarrolla de manera sistemática a través de las siguientes fases operativas:

**Construcción de la matriz de decisión difusa:** Se estructura una matriz donde las alternativas (escenarios de riesgo) son evaluadas bajo distintos criterios de impacto y probabilidad, utilizando los juicios consolidados del panel de expertos.

**Normalización de la matriz:** Se ajustan las escalas de los números difusos trapezoidales para permitir la comparabilidad entre criterios de distinta naturaleza, garantizando que todos los parámetros se sitúen en un rango uniforme.

**Cálculo de la matriz ponderada:** Se integran los pesos de importancia de cada criterio (obtenidos previamente mediante el análisis de entropía) multiplicándolos por los valores normalizados de la matriz de decisión.

**Identificación de soluciones ideales:** Se determinan los vectores de la solución ideal positiva (la menor probabilidad de falla y menor impacto) y la solución ideal negativa (la mayor criticidad), definidos en el espacio de los números difusos.

**Cálculo de distancias euclidianas y coeficiente de proximidad:** Se miden las distancias geométricas de cada escenario de riesgo hacia ambos extremos ideales. Finalmente, se calcula el **coeficiente de proximidad relativa**, el cual permite ordenar jerárquicamente los riesgos de mayor a menor criticidad, fundamentando la toma de decisiones basada en niveles de riesgo tolerables.

## **2.7 Modelo de posibilidad de falla por el método de Onisawa**

El método de transformación de Onisawa [21] constituye un marco analítico diseñado para la cuantificación de la incertidumbre en entornos donde la escasez de datos históricos impide el uso de estadísticas convencionales. La metodología se fundamenta en la interrelación entre la teoría de la posibilidad y la probabilidad, empleando un enfoque de lógica difusa que traduce el juicio experto en parámetros cuantitativos manejables para la evaluación de fiabilidad. En este estudio, el flujo operativo inicia con la captación de valoraciones cualitativas representadas matemáticamente a través

de números difusos trapezoidales, los cuales permiten capturar la imprecisión inherente al evaluador en sistemas complejos.

Para consolidar las diversas opiniones del panel de expertos, se aplica un proceso de agregación por suma ponderada, donde los parámetros de cada número difuso individual se multiplican por el peso relativo del experto (calculado previamente mediante la técnica de entropía) para obtener un único número difuso trapezoidal de consenso.

Posteriormente, este conjunto difuso agregado se somete a una fase de defuzzificación mediante la técnica del centroide para obtener la puntuación de posibilidad difusa. Finalmente, este valor nítido se introduce en la función de transformación logarítmica de Onisawa, la cual convierte la medida de posibilidad en una probabilidad de falla nominal. Este procedimiento asegura que los resultados originados en la subjetividad técnica sean integrables en las puertas lógicas del árbol de fallas, facilitando una toma de decisiones robusta y alineada con los estándares internacionales de seguridad industrial.

## **2.8 Modelamiento de Confiabilidad de Sistemas**

El análisis de riesgo mediante modelos de confiabilidad permite descomponer el fenómeno del estallido de roca en una estructura lógica manejable, separando las causas (*FTA*) que lo originan de las consecuencias (*ETA*) que produce.

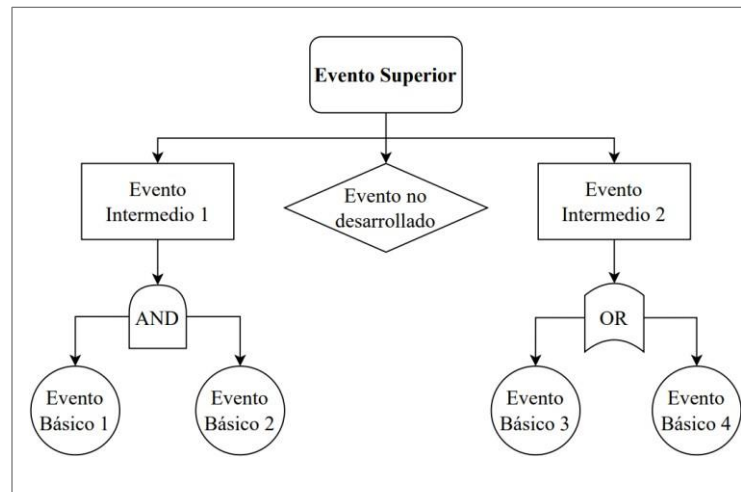
### **2.8.1 Árbol de Fallas: Lógica deductiva y causas raíz**

El *FTA* constituye una técnica deductiva y sistemática orientada a la identificación de las causas raíz que originan un evento no deseado o evento superior (*ES*). Este método permite descomponer fallas complejas hasta alcanzar sus eventos básicos (*EB*) mediante el uso de la lógica booleana, estableciendo una jerarquía visual y matemática que facilita la comprensión de las interdependencias dentro del sistema [22].

La arquitectura del *FTA* se organiza de manera descendente, donde la interconexión entre los niveles se realiza a través de compuertas lógicas que definen la relación causal. Los componentes fundamentales de esta estructura se describen a continuación:

El modelo se estructura mediante el *ES*, que define el estallido de roca como el estado crítico a evitar, y se desglosa hacia los *EB*, que representan las causas primarias y reciben las probabilidades de Onisawa. Entre ambos niveles se sitúan los Eventos Intermedios ( $A_n$ ), los cuales actúan como fallas derivadas que propagan la lógica del sistema hasta gatillar el accidente principal. La relación entre estos componentes se establece mediante Compuertas **OR**, que activan el evento si ocurre al menos una entrada individual, y Compuertas **AND**, que exigen la combinación simultánea de todos los factores de ingreso.

En el presente estudio, el *FTA* se emplea para mapear la progresión de las amenazas geomecánicas y operacionales que actúan como detonantes del estallido de roca. Al integrar esta estructura con la probabilidad cuantitativa derivada de la lógica difusa, el modelo permite calcular la probabilidad total de ocurrencia del evento crítico, proporcionando una base sólida para la gestión de riesgos y el diseño de barreras de control efectivas (**Figura 2.7**).



**Figura 2. 7: Esquema conceptual de un FTA con compuertas AND/OR.**

### 2.8.2 Árbol de Eventos: Análisis inductivo de trayectorias

El *ETA* constituye una técnica inductiva que parte de la ocurrencia de un evento iniciador (*EI*) para explorar y cuantificar las posibles secuencias de eventos posteriores. A diferencia del análisis deductivo, el *ETA* se orienta hacia adelante en el tiempo, evaluando el desempeño de las barreras de seguridad diseñadas para mitigar o prevenir consecuencias adversas [23].

La metodología se fundamenta en una estructura de ramificación donde cada nodo representa un punto de decisión crítico respecto al estado de una medida de control. Los componentes fundamentales de este análisis se describen a continuación:

**Evento Iniciador:** Representa la falla primaria que pone a prueba la respuesta del sistema.

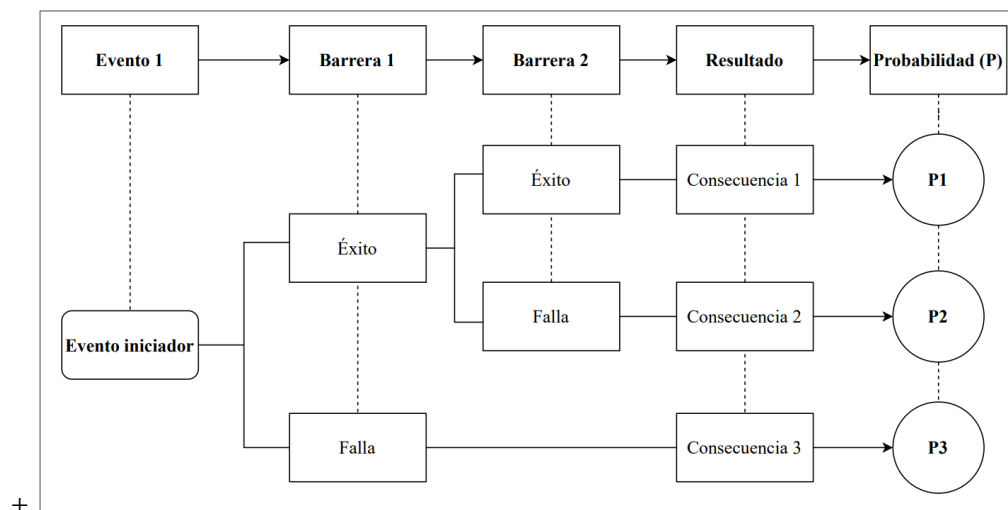
**Barreras de Seguridad:** Constituyen las medidas de control dispuestos para intervenir tras el *EI*.

**Nodos de Decisión:** Representan los puntos de ramificación donde se evalúa el éxito o la falla de cada barrera.

**Trayectorias o Secuencias:** Corresponden a los distintos caminos lógicos resultantes de la combinación de éxitos y fallas de las barreras.

**Resultados o Consecuencias:** Representan el estado final del sistema tras el *EI*. Estas consecuencias se clasifican según su nivel de severidad y se les asigna una probabilidad final derivada del producto de las probabilidades de cada rama en la trayectoria.

En el presente estudio, el *ETA* permite determinar los niveles de criticidad asociados al estallido de roca una vez que las amenazas han superado la primera línea de defensa. Esta progresión facilita la visualización de los escenarios de riesgo y proporciona los datos necesarios para que el método *TOPSIS* realice la jerarquización final de las consecuencias en función de su impacto y probabilidad (**Figura 2.8**).



**Figura 2. 8: Estructura general de un ETA y ramificación de consecuencias.**

## CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 Arquitectura operativa y propagación de riesgo

La metodología se fundamenta en la implementación del algoritmo híbrido Fuzzy- Entropy- TOPSIS- Onisawa (*Fu-ETO*) como motor de cálculo integral. Este sistema articula la lógica difusa y modelos de posibilidad para transformar juicios expertos en métricas probabilísticas, asegurando una trazabilidad matemática desde las causas raíz hasta las consecuencias finales.

La ejecución experimental se estructura mediante una cadena causal de tres fases interconectadas

- **Cuantificación y Ponderación en el Árbol de fallas**

El proceso inicia con la evaluación de los eventos básicos (*EB*) mediante variables lingüísticas. El algoritmo *Fu-ETO* transforma estas entradas en índices de posibilidad y, posteriormente, en probabilidades nominales. Una característica distintiva de este desarrollo es la asignación de pesos a los eventos intermedios ( $A_n$ ); estos pesos se multiplican por las probabilidades de los eventos básicos ( $P_{EB}$ ) precedentes, permitiendo que la probabilidad final de cada evento intermedio ( $P_{A_n}$ ) refleje tanto su frecuencia estimada como su importancia relativa dentro de la cadena causal hasta alcanzar el evento global.

- **Vinculación mediante el Evento iniciador**

La probabilidad del evento más relevante ( $A_3$ ) obtenida en el *FTA*, al ser la métrica más representativa de la falla sistémica, se transfiere directamente como el *EI* del *ETA*. Esta integración garantiza que el análisis de consecuencias parta de un valor calculado mediante un modelo de posibilidad robusto y no de una estimación arbitraria.

- **Evaluación de Escenarios en el Árbol de Eventos**

El algoritmo se aplica nuevamente para cuantificar las probabilidades de éxito o falla de las barreras de seguridad en el *ETA*. Al combinar la probabilidad del *EI* con el desempeño ponderado de las barreras de seguridad, se determinan las frecuencias de los distintos escenarios de impacto y el riesgo residual del proyecto.

## 3.2 El Algoritmo Fu-ETO

El algoritmo *Fu-ETO* se constituye como una herramienta integral de jerarquización y cuantificación del riesgo, diseñada en cuatro etapas para operar en entornos de alta incertidumbre técnica. Este sistema híbrido fusiona la capacidad de procesamiento de la *lógica difusa*, la objetividad en la ponderación de la *entropía*, la potencia de ordenamiento del *TOPSIS* y la capacidad predictiva del modelo de posibilidad de falla.

En la **Figura 3.1**, se presenta el esquema sistémico del algoritmo, el cual ilustra la trazabilidad del dato desde su captura cualitativa hasta su salida en términos de probabilidad nominal.

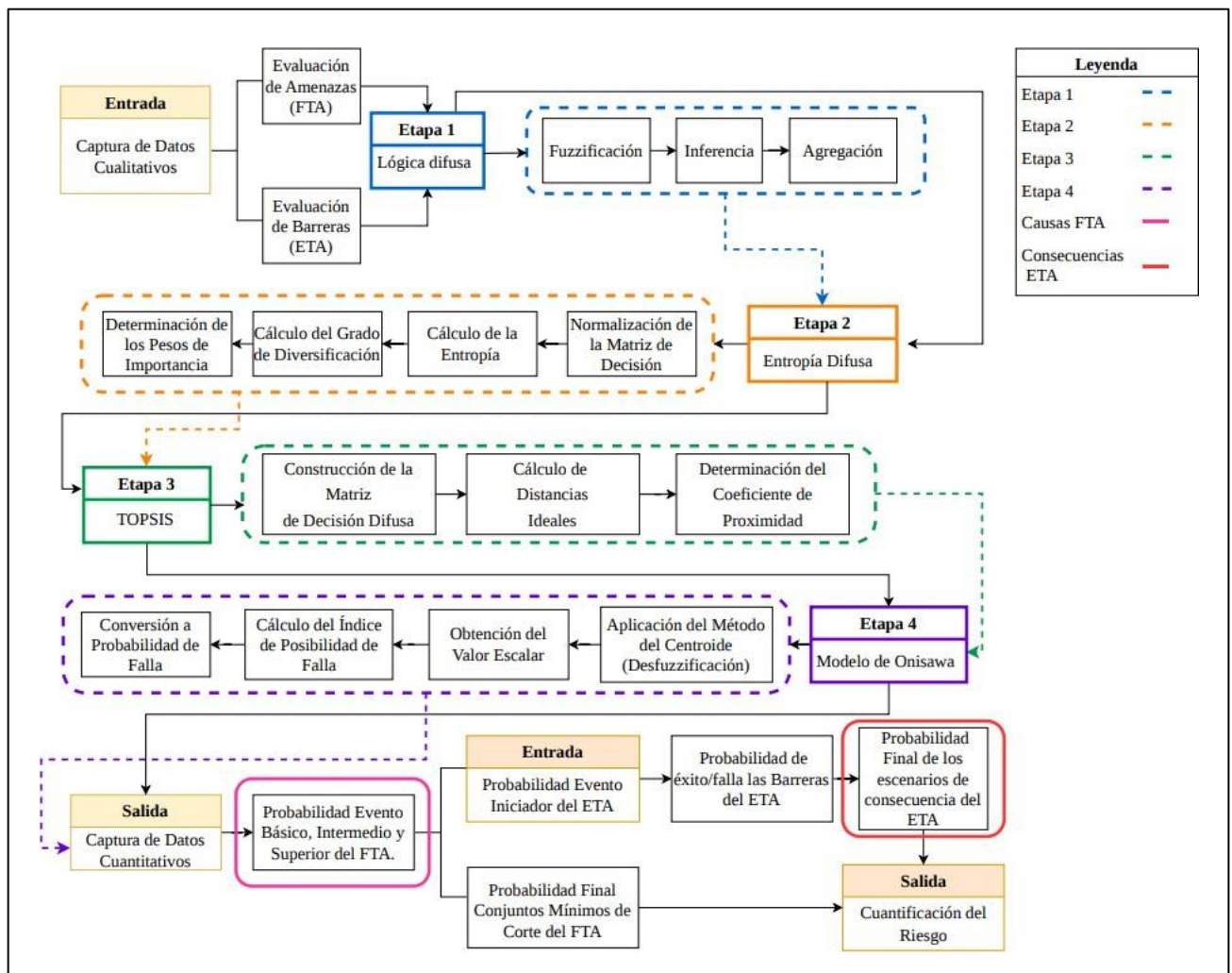


Figura 3. 1: Arquitectura sistémica del algoritmo híbrido Fu-ETO

El algoritmo procesa matrices de decisión donde las alternativas y los pesos de los criterios se expresan mediante números difusos trapezoidales, definidos por un cuádruplo de parámetros (a, b, c, d). Estos parámetros delimitan la base y el núcleo del conjunto difuso, donde el intervalo [b, c] representa el rango de valores con una pertenencia total. La preferencia por geometrías trapezoidales dentro del algoritmo *Fu-ETO* se fundamenta en los siguientes criterios técnicos [24].

**Intervalo de Máxima Confianza:** A diferencia de los números triangulares, los trapezoidales permiten definir un rango de valores igualmente posibles. Esto resulta coherente con el juicio experto en minería, donde se suele identificar un intervalo de estabilidad en lugar de un valor puntual.

**Flexibilidad en el Modelamiento de la Vaguedad:** El formato trapezoidal captura la incertidumbre en los extremos sin sacrificar la estabilidad del valor central, reduciendo la sensibilidad del modelo ante variaciones mínimas en la opinión experta.

**Ajuste a Escalas Lingüísticas:** Los términos como "Medianamente Frecuente" o "Buena Calidad" cubren espectros de condiciones físicas que la geometría trapezoidal representa de forma natural, permitiendo un solapamiento realista entre los niveles de la escala lingüística.

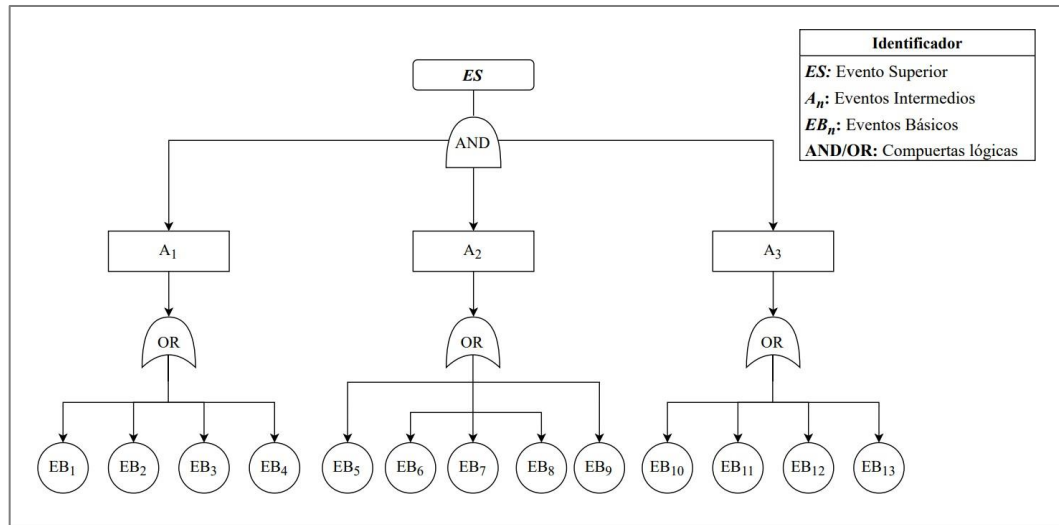
### 3.3 Desarrollo del Árbol de Fallas

#### 3.3.1 Estructura del FTA y justificación del Evento Superior

En el contexto del *FTA*, el estallido de roca se define como el *ES*, cuya ocurrencia depende de la interacción entre factores geomecánicos, energéticos y operacionales. Esta definición permite estructurar el análisis causal de manera jerárquica, descomponiendo el fenómeno en eventos intermedios (*A*) y eventos básicos (*EB*).

La estructura del *FTA* se construye considerando la evidencia reportada en la literatura especializada y la experiencia profesional en minería profunda, donde se reconoce que los estallidos de roca no son eventos aleatorios, sino el resultado de una secuencia energética y mecánica.

En la **Figura 3.2** se presenta la estructura lógica del *FTA* mediante un sistema de codificación de eventos, los cuales representan mecanismos causales de primer orden.



**Figura 3. 2: FTA codificado para el análisis de causas raíz de estallidos de roca.**

Esta metodología permite sintetizar la complejidad de las interacciones geomecánicas y operativas, donde cada nodo representa un *EB* o *A* ([Anexo A](#)). Esta codificación facilita el procesamiento matemático mediante lógica difusa.

### 3.3.2 Definición de Eventos Intermedios

Cada *A* representa un mecanismo causal necesario, pero no suficiente, para la ocurrencia del *ES*. Estos se definen conceptualmente y se tratan posteriormente como criterios dentro del proceso de ponderación mediante el método de entropía, dado su rol diferencial en la generación del estallido de roca. La definición conceptual de cada *A<sub>n</sub>* se presenta en la **Tabla 3.1**, junto con su justificación técnica y su rol dentro del modelo *FTA*.

**Tabla 3. 1: Definición conceptual, justificación técnica y rol funcional de los eventos intermedios en el FTA.**

| Evento Intermedio                                                              | Definición Conceptual                                                                 | Rol en el FTA                            |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <i>A</i> <sub>1</sub> : Acumulación crítica de energía en el macizo rocoso     | Almacenamiento elástico por altas tensiones y rigidez del macizo en minería profunda. | Condición habilitante de la sismicidad.  |
| <i>A</i> <sub>2</sub> : Sismicidad inducida por la actividad minera.           | Liberación dinámica de energía por redistribución de esfuerzos.                       | Nexo con el ETA y evento iniciador.      |
| <i>A</i> <sub>3</sub> : Condiciones locales que permiten la expulsión de roca. | Factores geomecánicos que facilitan la eyección del material.                         | Requisito final para el Evento Superior. |

### 3.3.3 Definición y clasificación de Eventos Básicos

Los *EB* corresponden a condiciones geomecánicas u operacionales específicas que contribuyen a la ocurrencia de cada *A*. Estos eventos se definen de manera que sean conceptualmente distinguibles, evaluables mediante juicio experto y coherentes con la literatura técnica. Cada *EB* se asocia a un único *A* y se conecta mediante compuertas lógicas **OR**, asumiendo que la ocurrencia de cualquiera de ellos puede activar el *A* correspondiente. La descripción detallada de los *EB*, su codificación y su relación con los *A* se presenta a continuación:

- **Eventos básicos asociados a la acumulación crítica de energía ( $A_1$ )**

**Alta rigidez del macizo ( $EB_1$ ):** Representa aquellas condiciones geomecánicas en las que la roca presenta un alto módulo elástico, lo que favorece el almacenamiento de energía elástica antes de alcanzar la falla. Macizos con alta rigidez tienden a liberar energía de manera brusca una vez superado el umbral de resistencia, aumentando el potencial de ocurrencia de eventos dinámicos.

**Alta tensión tectónica remanente ( $EB_2$ ):** Corresponde a la presencia de esfuerzos regionales preexistentes que no han sido completamente redistribuidos por la excavación minera. Estas tensiones incrementan el nivel de esfuerzo total en el macizo, contribuyendo a que se alcance más rápidamente una condición crítica de acumulación energética.

**Contraste litológico ( $EB_3$ ):** Se asocia a la presencia de cambios abruptos en las propiedades mecánicas entre unidades geológicas adyacentes. Dichos contrastes generan concentraciones locales de esfuerzo, favoreciendo la acumulación de energía y la iniciación de mecanismos de falla frágil.

**Baja confinación local ( $EB_4$ ):** Representa sectores donde el confinamiento del macizo es reducido, ya sea por geometría de la excavación o por presencia de vacíos cercanos. La disminución del confinamiento limita la capacidad del macizo para disipar energía de manera estable, aumentando el riesgo de liberación violenta.

**Eventos asociados a la sismicidad inducida ( $A_2$ )**

**Tasa de avance crítica ( $EB_5$ ):** Se refiere a ritmos elevados de excavación que generan perturbaciones rápidas en el campo de esfuerzos. Avances acelerados reducen el tiempo disponible para la redistribución gradual de esfuerzos, favoreciendo la generación de sismicidad inducida.

**Secuencia de minado inadecuada ( $EB_6$ ):** considera configuraciones de extracción que producen redistribuciones abruptas de esfuerzo, tales como cambios no planificados en el orden de minado o geometrías desfavorables. Estas condiciones incrementan la probabilidad de eventos sísmicos inducidos por la actividad minera.

**Macizo inherentemente frágil ( $EB_7$ ):** representa materiales rocosos con baja capacidad de deformación plástica y alta propensión a fallas repentinas. Este tipo de macizo responde de forma frágil ante incrementos de esfuerzo, favoreciendo la generación de sismicidad inducida.

**Zona de falla o fracturamiento local ( $EB_8$ ):** corresponde a la presencia de estructuras geológicas activas o altamente fracturadas que actúan como concentradores y transmisores de energía sísmica. Estas zonas facilitan la nucleación y propagación de eventos sísmicos inducidos.

**Excavación dentro de distancia crítica a zona sísmica ( $EB_9$ ):** considera la proximidad de las labores mineras a fuentes sísmicas activas. La cercanía espacial incrementa la interacción entre la excavación y la liberación de energía sísmica, elevando la probabilidad de daño dinámico.

#### **Eventos asociados a condiciones locales de expulsión del macizo ( $A_3$ )**

**Baja calidad estructural del macizo ( $EB_{10}$ ):** representa condiciones geomecánicas desfavorables caracterizadas por baja resistencia, alta discontinuidad y mala calidad del macizo rocoso. Estas condiciones reducen la capacidad del macizo para contener la energía liberada.

**Fracturamiento elevado ( $EB_{11}$ ):** se refiere a la presencia de múltiples planos de debilidad interconectados que facilitan la expulsión de bloques de roca una vez iniciada la liberación energética.

**Presencia de agua o presión de poros ( $EB_{12}$ ):** considera el efecto debilitante del agua en el macizo rocoso. El aumento de la presión de poros reduce la resistencia efectiva, favoreciendo mecanismos de expulsión violenta durante eventos dinámico.

**Orientación desfavorable de discontinuidades ( $EB_{13}$ ):** representa configuraciones geométricas de discontinuidades que facilitan deslizamientos, volteos o expulsiones cuando se produce una liberación súbita de energía.

## 3.4 Aplicación Algoritmo Fu-ETO

### 3.4.1 Diseño del cuestionario de juicio experto

Se diseña un cuestionario específico orientado a evaluar la frecuencia relativa y relevancia de los *EB* y *A* en el *FTA*. El cuestionario emplea escalas lingüísticas cualitativas y se estructura de manera independiente para cada grupo de eventos. El formato completo del cuestionario se presenta en el [Anexo B](#).

### 3.4.2 Selección y clasificación de expertos

Los expertos participantes son seleccionados en función de su experiencia profesional en geomecánica, minería subterránea y control de estallidos de roca, considerando tanto la trayectoria operacional como el conocimiento técnico especializado. Esta selección tiene como objetivo capturar una visión representativa e integral del fenómeno, combinando enfoques teóricos, de diseño y experiencia en terreno.

- **Criterio A ( $C_A$ ):** Cargo profesional

Los puntajes se asignan en función del nivel de responsabilidad técnica, la profundidad del conocimiento en mecánica de rocas y la participación directa en procesos de análisis, diseño y toma de decisiones geomecánicas.

Se asigna el puntaje máximo (5) a cargos con alto dominio conceptual y técnico, tales como Profesor, Académico, Ingeniero Geotécnico, Ingeniero Geomecánico, Ingeniero Principal de Mina o Directora de Innovación en Geociencias, dado que sus funciones se encuentran directamente vinculadas al análisis geomecánico avanzado, al diseño de excavaciones subterráneas, a la caracterización del macizo rocoso y a la evaluación y gestión del riesgo asociado a estallidos de roca [25].

Se asigna un puntaje alto (4) a cargos como Profesor Asistente, ya que, si bien cuentan con una formación técnica sólida y desarrollan actividades estrechamente relacionadas con la estabilidad de excavaciones y la geomecánica, su rol suele involucrar una menor participación en decisiones estratégicas o una trayectoria profesional aún en consolidación en comparación con cargos de mayor

jerarquía. En este sentido, presentan una alta pertinencia técnica, pero un nivel ligeramente inferior de trayectoria consolidada [26].

Finalmente, se asignan puntajes intermedios o bajos (2–3) a cargos de carácter operacional y de supervisión, tales como Supervisor u Operador de Jumbo, debido a que su conocimiento del fenómeno se adquiere principalmente a partir de la experiencia práctica en terreno, sin una participación directa en análisis geotécnicos avanzados, modelamiento estructural o evaluación probabilística del riesgo [27]. No obstante, su inclusión resulta relevante para incorporar la perspectiva operacional del proceso minero. La escala de evaluación utilizada se presenta en la **Tabla 3.2**. la justificación detallada de la asignación de puntajes según cargo profesional se presenta en el [Anexo C](#).

**Tabla 3. 2: Puntajes asignados basado en el perfil profesional y grado de especialización de los expertos.**

| <b>Cargo profesional</b>                           | <b>Categoría</b>                          | <b>Puntaje</b> |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|
| Ingeniero geotécnico                               | Especialista técnico en geotecnia         | 5              |
| Ingeniero geomecánico                              | Especialista técnico en geomecánica       | 5              |
| Ingeniero principal de minas                       | Especialista senior en minería            | 5              |
| Directora corporativa de innovación en geociencias | Especialista senior / gestión estratégica | 5              |
| Profesor                                           | Académico consolidado                     | 5              |
| Docente                                            | Académico consolidado                     | 5              |
| Académico                                          | Académico consolidado                     | 5              |
| Profesor asistente                                 | Académico en etapa inicial                | 4              |
| Estudiante de doctorado / profesora                | Académico en formación                    | 3              |
| Supervisor                                         | Profesional operativo                     | 3              |
| Operador de Jumbo                                  | Técnico especializado                     | 2              |

- **Criterio B ( $C_B$ ):** Años de experiencia profesional

Los puntajes asignados reflejan el grado de madurez profesional y acumulación de conocimiento práctico de cada experto. Se otorgan puntajes más altos a trayectorias extensas, particularmente aquellas superiores a 15 o 20 años de experiencia, mientras que carreras profesionales más breves reciben puntajes menores.

Este criterio se fundamenta en la literatura especializada, la cual señala que la calidad y confiabilidad del juicio experto mejoran significativamente con una mayor exposición a casos reales [28], eventos críticos y procesos complejos de toma de decisiones en contextos operacionales. En el ámbito de la geomecánica y la minería subterránea, la experiencia acumulada permite una mejor

comprensión de la variabilidad del macizo rocoso, de los mecanismos de inestabilidad y de la efectividad real de las medidas de control implementadas. La escala de evaluación utilizada para este criterio y los rangos de experiencia considerados se presentan en la **Tabla 3.3**.

**Tabla 3. 3: Puntajes asignados basado en la trayectoria del experto.**

| <b>Años de experiencia</b> | Más de 20 | Entre 10 y 20 | Entre 10 y 15 | Entre 5 y 10 | Menos de 5 |
|----------------------------|-----------|---------------|---------------|--------------|------------|
| <b>Puntaje</b>             | 5         | 4             | 3             | 2            | 1          |

- **Criterio C ( $C_c$ ):** Área de desempeño profesional

La asignación de puntajes (**Tabla 3.4**) se realiza en función de la cercanía disciplinaria entre el área de desempeño del experto y los procesos geomecánicos críticos, tales como la mecánica de rocas, el estado de esfuerzos, el fracturamiento del macizo y la respuesta dinámica ante solicitaciones sísmicas.

Las áreas de Geotecnia, Geomecánica y Fortificación reciben el puntaje máximo (5), debido a que sus funciones se vinculan directamente con el análisis del comportamiento del macizo rocoso bajo carga, el diseño de excavaciones subterráneas y la evaluación del riesgo de estallidos de roca [29].

Por su parte, áreas como Planificación Minera u Operaciones obtienen puntajes intermedios (2–3); si bien estos sectores influyen en la redistribución de esfuerzos y en las condiciones operacionales, su relación con los mecanismos causales del fenómeno es mayoritariamente indirecta [30].

Finalmente, las actividades centradas en docencia general o investigación no aplicada reciben puntajes menores (1–2), dada su limitada participación en el diseño geotécnico, la implementación de sistemas de fortificación o la evaluación directa del riesgo geomecánico en contextos operacionales [31].

**Tabla 3. 4: Puntajes asignados basado en el área de trabajo del experto.**

| <b>Área de Desempeño</b>                | <b>Puntaje</b> |
|-----------------------------------------|----------------|
| Geotecnia y Estabilidad de Excavaciones | 5              |
| Fortificación y Soporte                 | 5              |
| Investigación y Docencia                | 2              |
| Servicio a la Minería                   | 3              |

### 3.4.3 Escalas lingüísticas empleadas y Números difusos asociados

Las respuestas de los expertos se expresan mediante una escala lingüística discreta de cinco niveles: Muy Poco Frecuente (*MPF*), Poco Frecuente (*PF*), Medianamente Frecuente (*M*), Frecuente (*F*), Muy Frecuente (*MF*), las cuales se transforman en números difusos trapezoidales para permitir su tratamiento matemático. La correspondencia entre términos lingüísticos y números difusos se presenta en la **Tabla 3.5**. Esta representación permite capturar la incertidumbre y vaguedad inherentes al juicio experto, evitando una asignación rígida de probabilidades puntuales.

**Tabla 3. 5: Escala lingüística y valores difusos asociados.**

| Escala | Valor difuso |      |      |      |
|--------|--------------|------|------|------|
|        | a            | b    | c    | d    |
| (MF)   | 0.8          | 0.85 | 0.95 | 1    |
| (F)    | 0.6          | 0.65 | 0.7  | 0.8  |
| (M)    | 0.35         | 0.45 | 0.55 | 0.6  |
| (PF)   | 0.2          | 0.25 | 0.3  | 0.35 |
| (MPF)  | 0            | 0.1  | 0.15 | 0.2  |

### 3.4.4 Construcción de la matriz de decisión

Los *A* del *FTA* se tratan como criterios dentro del método de entropía, con el objetivo de determinar su peso relativo en la generación del estallido de roca. Para ello, se construye una matriz de decisión *U* a partir de las valoraciones difusas agregadas de los expertos:

$$\begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1j} & \dots & u_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & \dots & u_{ij} & \dots & u_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & \dots & u_{mj} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde, ( $u_{ij}$ ) es el puntaje del experto ( $i$ ) en el criterio ( $j$ ), ( $m$ ) es el número de expertos (11) y ( $n$ ) son los criterios evaluados (3). La matriz completa se presenta en la **Tabla 3.6**. El detalle de los puntajes originales se presenta en el [Anexo C](#).

**Tabla 3. 6: Matriz de decisión según puntajes asignados por criterio.**

| Criterio | Experto |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
|          | $E_1$   | $E_2$ | $E_3$ | $E_4$ | $E_5$ | $E_6$ | $E_7$ | $E_8$ | $E_9$ | $E_{10}$ | $E_{11}$ |
| $C_A$    | 5       | 4     | 3     | 3     | 5     | 5     | 2     | 5     | 5     | 5        | 5        |
| $C_B$    | 4       | 2     | 1     | 5     | 4     | 5     | 4     | 5     | 4     | 2        | 5        |
| $C_C$    | 2       | 2     | 2     | 3     | 2     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5        | 5        |

### 3.4.5 Cálculo de la entropía de los criterios

El método de los pesos de entropía se emplea para determinar la relevancia de cada criterio a partir de la información contenida en la matriz de decisión. En este estudio, para cada criterio  $j$ , las valoraciones de los expertos se agrupan en el vector  $U_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{mj})$  correspondiente a la columna  $j$  de la matriz de decisión. A partir de este vector, se define una distribución de probabilidad discreta mediante la ecuación:

$$P_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \forall i, j \quad (3.1)$$

Donde  $(P_{ij})$  representa la probabilidad relativa asociada a la valoración del experto  $i$  en el criterio  $j$ . Esta distribución se utiliza luego para calcular la entropía de cada criterio y, en función de ella, determinar sus pesos dentro del análisis multicriterio.

La entropía asociada al criterio  $j$ , denotada como  $(E_j)$ , se determina mediante las ecuaciones (3) y (4). En este cálculo,  $k$  representa el factor de normalización que asegura que  $E_j$  tome valores dentro del intervalo  $[0,1]$  independientemente de la cantidad de expertos.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3.2) \quad ; \quad k = \frac{1}{\ln(10)} \quad (3.3)$$

Una vez calculada la entropía de cada criterio, el peso de entropía asociado al criterio  $j$  ( $w_j$ ) se obtiene mediante:

$$w_j = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (3.4)$$

Esta expresión normaliza el término  $(1 - E_j)$  para que la suma total de los  $w_j$  sea igual a 1. En términos prácticos, entre menor sea la  $E_j$ , mayor será su peso dentro del análisis *TOPSIS*, ya que representa un criterio más informativo y diferenciador.

### 3.4.6 Determinación de los pesos de los criterios

Los pesos finales de los  $A$  se obtienen a partir de los valores de  $E_j$  calculados. Estos pesos reflejan la importancia relativa de cada mecanismo causal dentro del *FTA* y son utilizados posteriormente en la agregación difusa de probabilidades. Los pesos finales para cada criterio se presentan en la **Tabla 3.7**. Los valores de entropía y cálculos intermedios se presentan en el [Anexo D](#).

**Tabla 3. 7: Valor de Entropía y Peso de cada criterio.**

| Criterio (C) | Peso (w) |
|--------------|----------|
| $C_A$        | 0.179    |
| $C_B$        | 0.412    |
| $C_C$        | 0.409    |

### 3.4.7 Normalización de la matriz de decisión

Con el objetivo de mitigar la subjetividad y establecer la confiabilidad relativa de los especialistas, se aplica el método *TOPSIS* sobre la matriz de decisión inicial. Para eliminar distorsiones de escala y asegurar un tratamiento matemático equitativo, se ejecuta una normalización vectorial que transforma las valoraciones en valores adimensionales mediante la siguiente expresión:

$$r_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m u_{ij}^2}} \quad (3.5)$$

Donde,  $(r_{ij})$  es el valor normalizado de la calificación del experto  $i$  para el criterio  $j$  y  $u_{ij}$  es la calificación de la decisión en la matriz original de decisión.

Tras obtener los valores normalizados, se procede a la ponderación de la matriz para reflejar la importancia relativa de cada criterio de evaluación. Este paso integra los pesos calculados mediante el método de la entropía, asegurando que los criterios con mayor capacidad de discriminación tengan un impacto proporcional en la calificación final del experto.

La ponderación se realiza multiplicando cada elemento de la matriz normalizada por su respectivo peso de importancia, según la siguiente expresión:

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (3.6)$$

Donde,  $(v_{ij})$  es la calificación ponderada del experto  $i$  para el criterio  $j$  y  $w_j$  es el peso asignado a cada criterio, que se calcula previamente mediante el método de entropía. Los desarrollos completos de normalización y estandarización aparecen en el [Anexo E](#).

### 3.4.8 Soluciones ideal y anti-ideal

Para determinar la proximidad relativa de las alternativas, el modelo identifica dos puntos de referencia críticos: la solución ideal positiva ( $V_j^+$ ) y la solución ideal negativa ( $V_j^-$ ).

La  $V_j^+$  se define seleccionando los mejores valores alcanzados en cada criterio dentro de la matriz de decisión normalizada; es decir, busca maximizar los beneficios y minimizar los costos o riesgos. Por el contrario, la  $V_j^-$  se compone de los peores desempeños registrados para cada indicador, representando el escenario menos favorable para el sistema (**Tabla 3.8**). Este procedimiento permite que el algoritmo calcule la distancia geométrica de cada opción evaluada respecto a estos dos extremos, priorizando aquellas que más se aproximan al desempeño óptimo y se alejan del riesgo máximo.

**Tabla 3. 8: Valores normalizados para la determinación de las soluciones.**

| <b>Soluciones Ideales</b> | <b><math>C_A</math></b> | <b><math>C_B</math></b> | <b><math>C_C</math></b> |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $V_j^+$                   | 0.06                    | 0.16                    | 0.15                    |
| $V_j^-$                   | 0.02                    | 0.03                    | 0.06                    |

### 3.4.9 Cálculo de la cercanía relativa y pesos finales

Una vez obtenida la matriz ponderada, se procede a determinar la cercanía de cada experto respecto a las soluciones ideales. Para ello, se calcula la distancia euclidiana de cada alternativa hacia la solución ideal positiva ( $d_i^+$ ) y hacia la solución ideal negativa ( $d_i^-$ ) mediante las ecuaciones:

$$d^+ = \left[ \sum_{i=1}^m (v_i - V^+)^2 \right]^{\frac{1}{m}}, \forall i \quad (3.7)$$

$$d^- = \left[ \sum_{i=1}^m (v_i - V^-)^2 \right]^{\frac{1}{m}}, \forall i \quad (3.8)$$

A partir de estas distancias, se determina la cercanía relativa o coeficiente de proximidad ( $CL_i$ ) de cada experto. Este valor indica qué tan cerca se encuentra el perfil del experto evaluado respecto a la solución ideal teórica.

$$CL_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \forall i \quad (3.9)$$

Finalmente, para asegurar que la suma de las influencias de los expertos sea igual a la unidad en la agregación de valoraciones difusas, se calculan los pesos normalizados de los expertos ( $w_E$ ) mediante la ecuación:

$$w_E = \frac{CL_i}{\sum_{i=1}^m CL_i}, \forall i \quad (3.10)$$

Los pesos de los 11 expertos se normalizan para asegurar una sumatoria unitaria, garantizando una ponderación proporcional en el modelo difuso. Según se detalla en la **Tabla 3.9**, el experto 6 ( $E_6$ ) presenta la mayor incidencia relativa (0.155), factor derivado de su perfil técnico y trayectoria.

**Tabla 3. 9: Resultados peso de cada experto según criterios evaluados.**

| Experto                     | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_4$ | $E_5$ | $E_6$ | $E_7$ | $E_8$ | $E_9$ | $E_{10}$ | $E_{11}$ | Suma     |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| <b>Peso de cada experto</b> | 0.08  | 0.04  | 0.01  | 0.10  | 0.08  | 0.16  | 0.11  | 0.08  | 0.13  | 0.13     | 0.09     | <b>1</b> |

### 3.4.10 Procedimiento de agregación difusa

Las opiniones individuales de los expertos se consolidan mediante operadores difusos ponderados, integrando los pesos de confiabilidad obtenidos mediante el método *TOPSIS*. Este procedimiento permite obtener una valoración difusa global para cada evento del sistema. Las evaluaciones de los

expertos, expresadas originalmente como números difusos trapezoidales, se combinan mediante la siguiente expresión de agregación ponderada:

$$\tilde{\beta}_a = \sum_{m=1}^M W_m \otimes \tilde{\beta}_m \quad (3.11)$$

Donde  $\tilde{\beta}_m$  es el número difuso asociado a la respuesta del experto  $m$ ,  $\tilde{\beta}_a$  es el número difuso agregado resultante,  $W_m$  es el peso del experto calculado por *TOPSIS* y  $\otimes$  es el símbolo de multiplicación difusa

Los pesos de influencia asignados a cada experto para la agregación de los juicios se presentan en la **Tabla 3.10** cuya metodología de cálculo y datos de respaldo se encuentran disponibles en los Anexos [F](#) y [G](#).

**Tabla 3. 10: Pesos de influencia difusos calculados para la agregación de juicio de expertos.**

| Experto           | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_4$ | $E_5$ | $E_6$ | $E_7$ | $E_8$ | $E_9$ | $E_{10}$ | $E_{11}$ |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| $\tilde{\beta}_a$ | 0.08  | 0.04  | 0.01  | 0.10  | 0.08  | 0.16  | 0.11  | 0.08  | 0.13  | 0.13     | 0.09     |

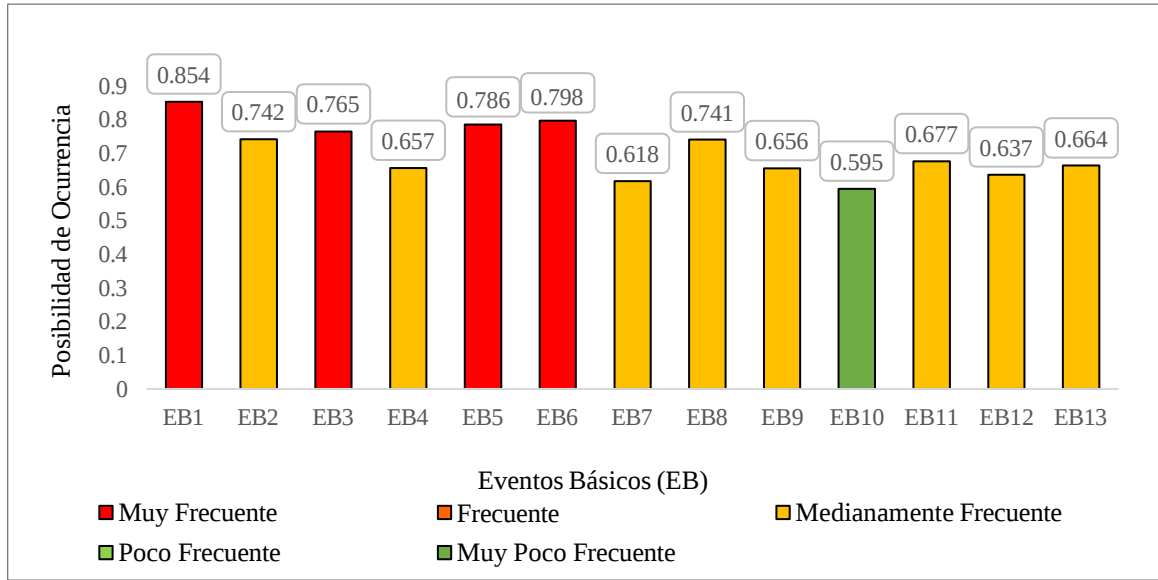
### 3.4.11 Desfuzzificación por el método del Centroide

Las valoraciones difusas se transforman en valores nítidos denominados posibilidad nítida de falla (*CFP*) mediante el método del centroide, obteniendo un escalar en el rango [0-1]. Bajo el enfoque de Onisawa estos valores representan niveles de plausibilidad donde una cifra cercana a 1 indica alta frecuencia de ocurrencia y valores próximos a 0.5 reflejan una percepción moderada.

El valor nítido se obtiene mediante la siguiente expresión matemática:

$$CFP = \frac{\int g(x)xdx}{\int g(x)dx} \quad (3.12)$$

Los resultados de las *CFP* para cada *EB* se presentan en el gráfico de la **Figura 3.3**. Véase [Anexo H](#) para una revisión detallada del desarrollo matemático.



**Figura 3. 3: Distribución de posibilidad asignada a los Eventos Básicos del FTA.**

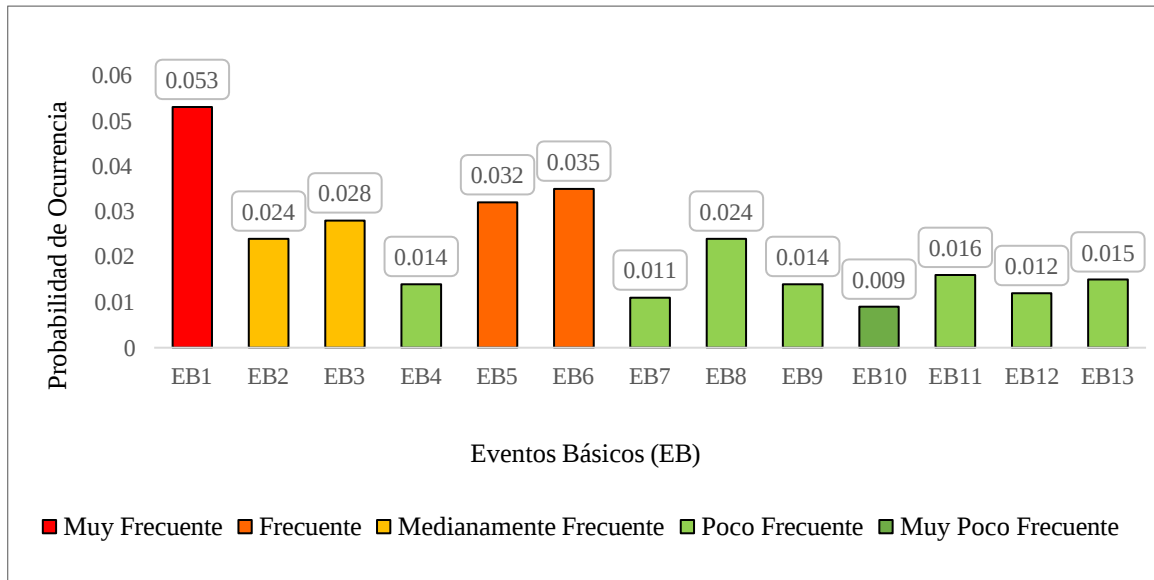
### 3.4.12 Conversión de posibilidad a probabilidad del Análisis de árbol de falla (Onisawa)

Para esta transición, se emplea el modelo de Onisawa, el cual establece una relación no lineal entre la  $CFP$  y la  $P_f$ . Esta conversión asegura que la subjetividad capturada se normalice en un formato probabilístico apto para las operaciones de puertas lógicas y ramificaciones de eventos. La  $P_f$  se calcula mediante la siguiente función de transferencia:

$$PF = \begin{cases} 1 & \text{if } CFP \neq 0 \\ 0 & \text{if } CFP = 0 \end{cases} \quad (3.13) \quad ; \quad m = \left( \frac{1 - CFP}{CFP} \right)^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (3.14)$$

Este modelo de conversión permite que los datos procesados bajo el algoritmo *Fu-ETO* adquieran la estructura necesaria para el cálculo de la frecuencia de escenarios en el *ETA* y la probabilidad del evento superior ( $P_{ES}$ ) en el *FTA*.

Los resultados se visualizan en el gráfico de la **Figura 3.4**, donde se aprecia la distribución probabilística del modelo. Véase [Anexo I](#) para una revisión detallada del desarrollo matemático.



**Figura 3. 4: Probabilidad de ocurrencia estimada para los Eventos Básicos mediante la transformación de Onisawa.**

### 3.5 Descomposición del Riesgo: Conjuntos Mínimos de Corte

El procedimiento contempla el desglose de la  $P_{ES}$  en 80 conjuntos mínimos de corte (*CMC*) a través de una reducción booleana aplicada a la estructura lógica del *FTA*. Esta metodología matemática permite identificar las combinaciones más simples de eventos básicos (*EB*) que, al ocurrir de forma simultánea, desencadenan un estallido de rocas.

La ejecución del análisis facilita la observación de cómo el riesgo se concentra en trayectorias específicas, en lugar de distribuirse uniformemente por el sistema. Esta simplificación se emplea para aislar las rutas críticas de falla y eliminar redundancias, lo cual optimiza el diseño de las estrategias de gestión del riesgo (**Figura 3.5**). El desarrollo matemático exhaustivo de todos los *CMC* se detalla en el [Anexo J](#).

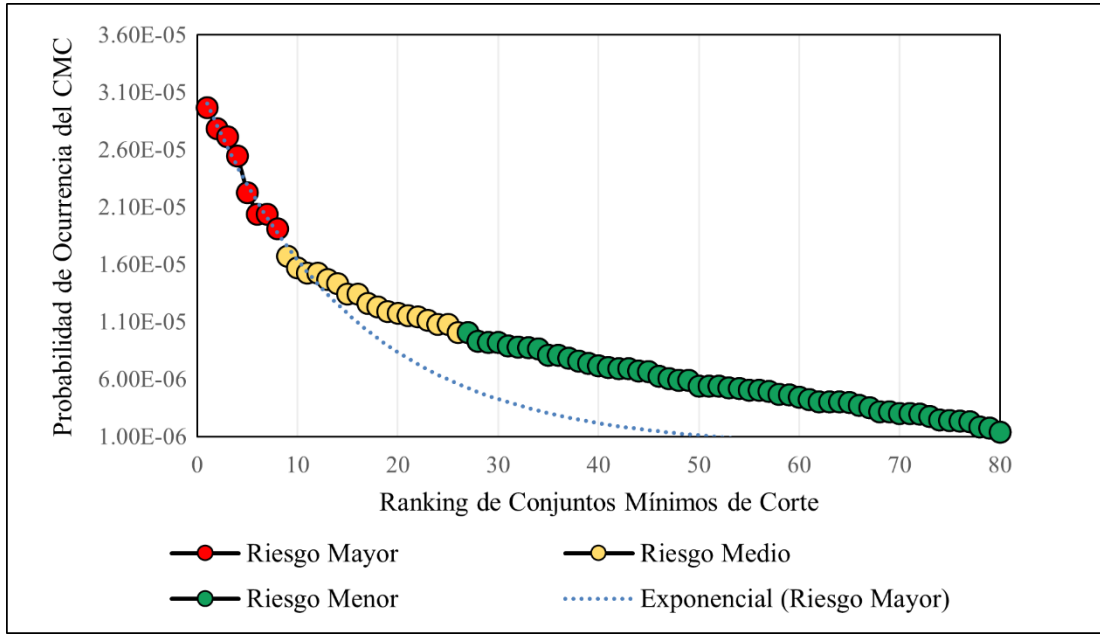


Figura 3. 5: Gráfico de dispersión y jerarquización de los 80 CMC para el evento de Estallido de Rocas.

### 3.6 Metodología del Análisis de Importancia Estructural

Para determinar la relevancia de cada evento dentro de la arquitectura lógica del árbol, se emplea el análisis de importancia estructural. Este indicador cuantifica la influencia de cada fallo basándose exclusivamente en su ubicación respecto a las compuertas **OR** y **AND** que conducen al *ES* independientemente de su valor probabilístico.

El cálculo se fundamenta en la capacidad de un evento básico para habilitar una ruta de falla. Para la cuantificación de este parámetro, se utiliza la siguiente formulación matemática:

$$I^{st}(i) = \sum_{X_i \in B_r} \frac{1}{2^{n_i-1}}. \quad (3.15)$$

Donde,  $I^{st}(i)$  es el índice de importancia estructural del evento  $i$ ,  $n_i$  es el total de eventos básicos del sistema y  $B_r$  es la cantidad de veces que está presente un *EB* en el sistema. La importancia estructural de cada *EB* se presenta en el [Anexo K](#).

### 3.6.1 Ponderación Jerárquica y Cuantificación de Eventos Intermedios

Para la cuantificación de los mecanismos de falla, el modelo aplica el método de entropía difusa sobre los  $A_n$ , con el objetivo de incorporar la incertidumbre asociada a las valoraciones expertas. Este procedimiento permite calcular un peso de importancia  $w_j$  para cada criterio, el cual actúa como un factor de ajuste sobre la probabilidad base de cada rama del *FTA*.

De este modo, la probabilidad final de cada evento intermedio se obtiene a partir del producto entre su probabilidad intrínseca y su peso de importancia, según la ecuación (16):

$$P_{final(EI)} = \sum_{j=1}^n (P_i * w_j) \quad (3.16)$$

Este enfoque permite normalizar la contribución relativa de cada evento intermedio dentro del sistema y establecer una base cuantitativa coherente para la posterior evaluación del EI. El detalle del proceso de ponderación y de las probabilidades obtenidas se presenta los Anexos [L](#) y [M](#).

### 3.6.2 Cuantificación del Evento superior

El Evento Superior: Estallido de Roca se define mediante una compuerta lógica **AND**, lo que implica que la falla total del sistema solo ocurre si coinciden las tres condiciones intermedias ponderadas. Bajo esta configuración, la probabilidad del *ES* se calcula como el producto de las probabilidades de sus ramas de entrada:

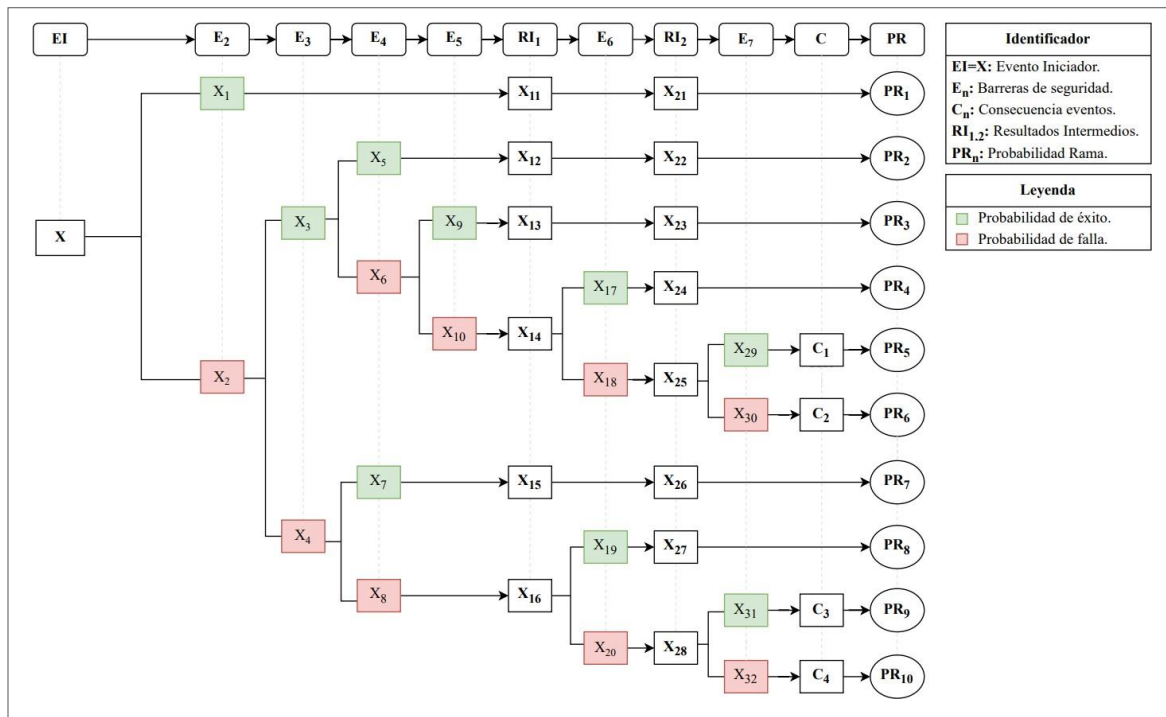
$$\begin{aligned} P_{ES} &= P(A_1) \times P(A_2) \times P(A_3) \\ P_{ES} &= (5.14 \times 10^{-2}) \times (3.33 \times 10^{-2}) \times (1.29 \times 10^{-2}) \\ P_{ES} &= 2.21 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

### 3.6.3 Selección del Evento Iniciador para el Análisis de Consecuencias

Se selecciona el evento  $A_2$  (Sismicidad Inducida) como iniciador del *ETA* por su naturaleza dinámica, actuando como el detonante que rompe el equilibrio del sistema. Su elección se justifica por ser una variable medible mediante monitoreo sísmico, poseer trazabilidad directa desde las probabilidades del *FTA* y representar el vínculo causal con la activación del estallido de roca [32].

### 3.7 Desarrollo del Árbol de Eventos

El *ETA* se estructura mediante una secuencia lógica de barreras de control y nodos de decisión binarios (éxito/falla). Cada nodo representa una etapa físico-operacional que condiciona la transición desde la sismicidad inducida hacia las consecuencias finales. La cuantificación de cada ramificación se realiza mediante el algoritmo *Fu-ETO* usado en el *FTA* ([Anexo N](#)). Debido a la extensión y complejidad de las ramificaciones, se utiliza una representación codificada mediante nodos para optimizar la visualización y el análisis (**Figura 3.6**).



**Figura 3. 6: Estructura codificada del Árbol de Eventos (ETA) para la evaluación de secuencias accidentales.**

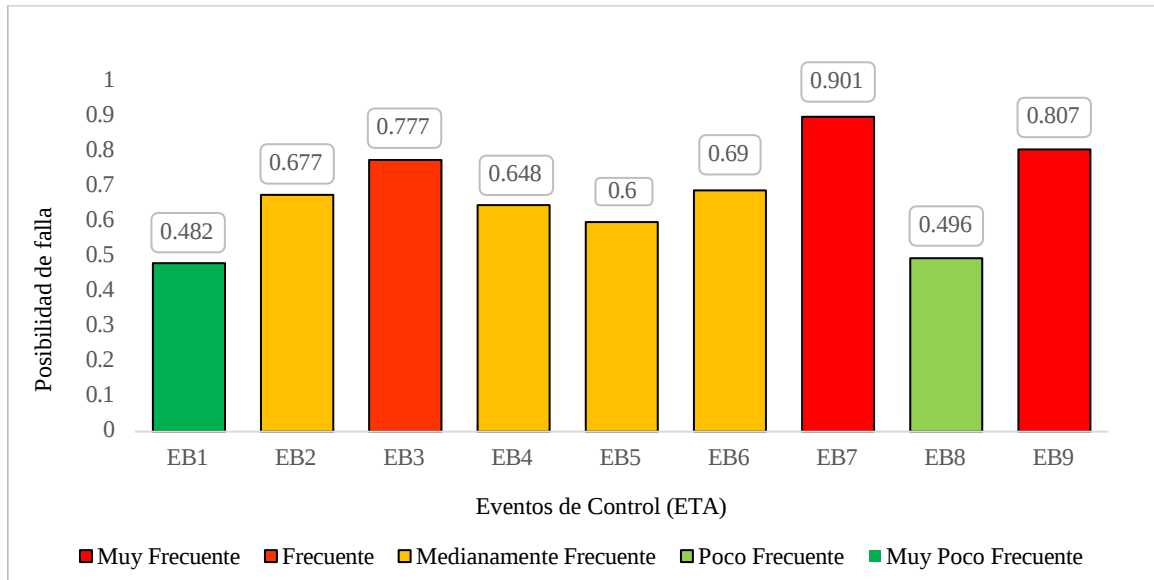
Una vez establecida la representación gráfica del modelo, se requiere definir la lógica operativa que rige cada ramificación. En la **Tabla 3.11** se describen los fundamentos técnicos de cada nodo de decisión, especificando las condiciones que determinan la eficacia de las barreras de protección y los criterios de falla que permiten la progresión del riesgo hacia las consecuencias finales.

**Tabla 3. 11: Descripción Técnica de Nodos, Resultados Intermedios y Codificación del ETA.**

| <b>Código</b>         | <b>Barrera Física / Nodo / Resultado</b> | <b>Evento de Éxito (Verde)</b>                                                          | <b>Evento de Falla (Rojo)</b>                                                |
|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EI (X)</b>         | <b>Evento Iniciador</b>                  | Sismicidad inducida                                                                     | —                                                                            |
| <b>E<sub>2</sub></b>  | Respuesta del macizo                     | <b>X<sub>1</sub></b> : Absorción elástica                                               | <b>X<sub>2</sub></b> : Liberación violenta                                   |
| <b>E<sub>3</sub></b>  | Mecanismo de ruptura                     | <b>X<sub>3</sub></b> : Mecanismo directo                                                | <b>X<sub>4</sub></b> : Mecanismo indirecto                                   |
| <b>E<sub>4</sub></b>  | Estado de esfuerzo                       | <b>X<sub>5</sub></b> : Confinamiento                                                    | <b>X<sub>6</sub></b> : Concentración crítica                                 |
|                       |                                          | <b>X<sub>7</sub></b> : Disipación en zona relajada                                      | <b>X<sub>8</sub></b> : Interacción con esfuerzo crítico                      |
| <b>E<sub>5</sub></b>  | Control de energía                       | <b>X<sub>9</sub></b> : Liberación controlada                                            | <b>X<sub>10</sub></b> : Liberación violenta                                  |
| <b>RI<sub>1</sub></b> | Potencial de Estallido                   | <b>X<sub>11</sub>-X<sub>13</sub>, X<sub>15</sub></b> : Potencial nulo                   | <b>X<sub>14</sub>, X<sub>16</sub></b> : Potencial de ocurrencia              |
| <b>E<sub>6</sub></b>  | Soporte dinámico                         | <b>X<sub>17</sub>, X<sub>19</sub></b> : Sistema absorbe energía cinética                | <b>X<sub>18</sub>, X<sub>20</sub></b> : Soporte superado                     |
| <b>RI<sub>2</sub></b> | Ocurrencia de Estallido                  | <b>X<sub>21</sub>-X<sub>24</sub>, X<sub>26</sub>-X<sub>27</sub></b> : No ocurre         | <b>X<sub>25</sub>, X<sub>28</sub></b> : Ocurre                               |
| <b>E<sub>7</sub></b>  | Exposición de personal                   | <b>X<sub>29</sub>, X<sub>31</sub></b> : Personal no expuesto                            | <b>X<sub>30</sub>, X<sub>32</sub></b> : Personal expuesto                    |
| <b>C<sub>n</sub></b>  | Consecuencias Finales                    | <b>C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub></b> : No ocurrencia/ Daño material/ Perdida operacional | <b>C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub></b> : Ocurrencia/ Fatalidad/ Lesiones graves |

### 3.7.1 Metodología de captura y procesamiento de datos del Análisis de árbol de eventos

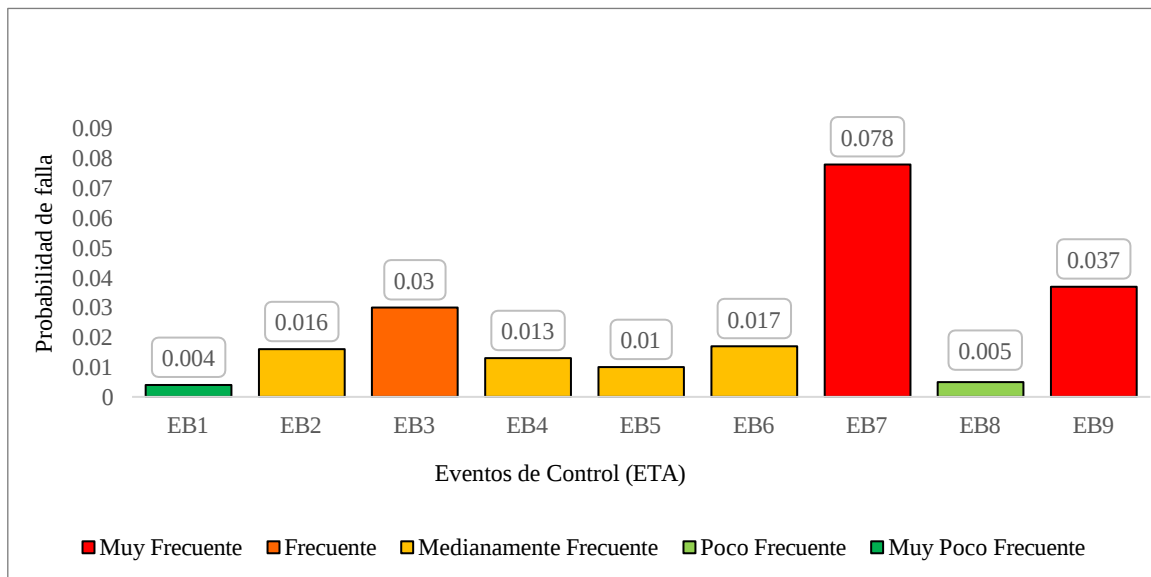
Se mantiene la identidad de criterios, escalas lingüísticas y parámetros de evaluación definidos en la **Sección 3.4.3**, dado que el panel de especialistas coincide con el consultado en la fase del *FTA*. La distinción metodológica radica exclusivamente en el cuestionario de evaluación ([Anexo Ñ](#)) cual integra preguntas diseñadas para cuantificar el desempeño de las barreras de protección ante el evento ya iniciado. Para el procesamiento de la información, se emplea la misma estructura analítica previa, aplicando los pesos de importancia de los expertos obtenidos mediante la combinación de entropía y *TOPSIS* (**Sección 3.6**). Este enfoque asegura la consistencia en el tratamiento de los datos y garantiza la homogeneidad en la ponderación de las respuestas para el cálculo de las probabilidades del *ETA*. Los resultados de este proceso, que constituyen los valores de posibilidad finales para cada barrera y estado del *ETA*, se observan en la **Figura 3.7**.



**Figura 3. 7: Distribución de niveles de posibilidad para los eventos de control del Árbol de Eventos (ETA).**

### 3.7.2 Conversión de posibilidad a probabilidad mediante el método de Onisawa

Para las probabilidades cuantitativas del *ETA*, se mantiene el procedimiento matemático del *FTA*. Los valores de posibilidad del juicio experto se transforman mediante la Ecuación (3.13), asegurando que la incertidumbre de la fase causal sea comparable con la de consecuencias. Esta consistencia permite una visión integrada del riesgo de estallido de roca. Los resultados se consolidan en la **Figura 3.8**.



**Figura 3. 8: Distribución Probabilística de Falla por Evento de Control.**

### 3.7.3 Cálculo de probabilidades de escenarios de consecuencia

Una vez determinadas las probabilidades individuales de éxito y falla para cada barrera del *ETA*, se procede al cálculo de la probabilidad de los distintos escenarios de consecuencia. Cada escenario corresponde a una trayectoria específica dentro del *ETA* y su probabilidad se obtiene mediante la multiplicación de la probabilidad del evento iniciador (*PEI*) (proveniente del *FTA*) por las probabilidades condicionales de éxito o falla de los eventos subsecuentes.

De forma general, la probabilidad de un escenario se expresa como:

$$P(PR_n) = P(EI) \times \prod_{i=1}^n P(E_i) \quad (3.16)$$

Donde  $P(EI)$  corresponde a la probabilidad de sismicidad inducida obtenida del *FTA*, y  $P(E_i)$  representa la probabilidad de éxito o falla del evento  $i$  dentro del *ETA*. Los resultados obtenidos permiten cuantificar la probabilidad asociada a escenarios de no ocurrencia de estallido de roca, daño material y consecuencias graves para la seguridad del personal.

## **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1 Caracterización del panel de expertos**

El panel de expertos presenta una robustez técnica significativa, fundamentada en una distribución estratégica que equilibra la formación académica con la experiencia operativa en el sector minero.

#### **4.1.1 Jerarquización por competencia técnica**

Se identifica un grupo de especialistas de alto rango, compuesto por los expertos  $E_6$ ,  $E_8$  y  $E_{11}$ , quienes poseen el puntaje máximo de competencia (15 puntos). Este grupo destaca por contar con más de 20 años de experiencia específica en las áreas de Geotecnia y Estabilidad de taludes y labores subterráneas. Debido a su trayectoria, sus valoraciones adquieren un peso determinante en el procesamiento de datos mediante el algoritmo *Fu-ETO*, asegurando una mayor fiabilidad técnica del modelo.

#### **4.1.2 Diversidad de enfoques y captura de la realidad**

El modelo incorpora una diversidad de enfoques mediante la inclusión de perfiles operativos, representados por el experto  $E_7$  (Operador de Jumbo), y perfiles de gestión estratégica, como el experto  $E_9$  (Directora Corporativa de Innovación). Esta composición garantiza que el sistema capture de manera integral tanto la realidad física y geomecánica del terreno como la visión estratégica y preventiva del riesgo. La convergencia de estas perspectivas permite que el Árbol de Fallas refleje con precisión las condiciones críticas de la unidad de estudio.

#### **4.1.3 Identificación de factores críticos para el Análisis de Árbol de Fallas**

Se observa una marcada convergencia en los eventos que definen el potencial tensional del sistema. El evento  $EB_1$  (Presencia de alta rigidez en el macizo rocoso) y el  $EB_5$  (Tasa de avance elevada o crítica) presentan el nivel de consenso más alto, con una mayoría absoluta de calificaciones en el rango de Muy Frecuente. Esta tendencia indica que, para el panel de expertos, la capacidad de almacenamiento elástico del macizo y la velocidad de extracción constituyen los pilares fundamentales del riesgo en la unidad minera.

Asimismo, el evento *EB<sub>2</sub>* (Existencia de altos esfuerzos tectónicos remanentes) exhibe una frecuencia de ocurrencia situada entre Frecuente y Muy Frecuente. Este resultado valida la importancia de las condiciones geológicas de base, sugiriendo que la magnitud de las tensiones naturales acumuladas es un factor determinante que predispone al macizo para eventos de liberación dinámica de energía. La consistencia en estas respuestas otorga una base sólida para la determinación de los escenarios críticos, situando la interacción entre los esfuerzos naturales y la planificación operativa como el motor principal de la inestabilidad.

#### **4.1.4 Análisis de la incertidumbre y variabilidad de los factores**

A diferencia de los factores tensionales, los eventos de naturaleza geológica local muestran una dispersión significativa en los juicios. Los eventos *EB<sub>7</sub>* y *EB<sub>10</sub>* presentan valoraciones que oscilan entre los niveles MF y PF. Esta variabilidad refleja la incertidumbre epistémica propia de las condiciones estructurales de la mina, indicando que la calidad del macizo y su fragilidad no son parámetros homogéneos, sino que dependen de la ubicación específica del sector evaluado.

Esta disparidad de criterios justifica la aplicación de la Entropía dentro del modelo *Fu-ETO*. El método permite ponderar con mayor peso las opiniones de los especialistas con trayectorias superiores a los 20 años, filtrando así la incertidumbre generada por las percepciones divergentes y asegurando que la probabilidad final del evento superior sea representativa de la realidad técnica más robusta.

#### **4.1.5 Interconexión entre esfuerzos y geología estructural**

El análisis de los resultados revela que la presencia de zonas de falla (*EB<sub>8</sub>*) y los contrastes litológicos (*EB<sub>4</sub>*) mantienen una percepción de frecuencia elevada. La opinión técnica confirma que la actividad minera actúa como un catalizador sobre estructuras geológicas preexistentes, donde la interacción de los esfuerzos tectónicos (*EB<sub>2</sub>*) con las discontinuidades facilita la liberación súbita de energía. Esta interconexión entre las causas raíz analizadas en el *FTA* y la respuesta del entorno constituye el nexo lógico para la evaluación de las trayectorias de daño que se desarrollan posteriormente en el análisis de consecuencias.

## 4.2 Determinación de pesos mediante el método de Entropía

La metodología *Fu-ETO* exige la asignación de pesos diferenciados para cada experto, evitando que todas las opiniones influyan de manera lineal en el modelo de riesgo. Este proceso se sustenta en la matriz de perfil profesional, donde se evalúan tres criterios críticos: cargo actual, años de experiencia y área de desempeño.

### 4.2.1 Análisis de la matriz de caracterización

Se observa una heterogeneidad estratégica en el panel, con puntajes totales que oscilan entre los 6 y 15 puntos. Los especialistas con mayor influencia en el modelo son aquellos con una trayectoria superior a los 20 años y un desempeño directo en Geotecnia y Estabilidad, como se evidencia en el caso del experto  $E_6$ , quien alcanza la máxima puntuación. Esta distinción es fundamental para el algoritmo, ya que otorga una mayor relevancia a los juicios emitidos por perfiles con alta exposición a la fenomenología de estallidos de roca.

### 4.2.2 Aplicación del algoritmo de Entropía

La aplicación de la entropía genera una redistribución no uniforme de los pesos asignados a los expertos, evidenciando diferencias relevantes en la contribución de cada perfil al modelo final. Los especialistas con mayor experiencia y desempeño directo en áreas geotécnicas concentran los pesos más elevados, mientras que los perfiles con menor trayectoria o rol indirecto presentan una influencia reducida en la agregación de juicios.

Este resultado permite disminuir el efecto de la dispersión observada en determinadas variables, particularmente en eventos asociados a condiciones geológicas locales, donde las valoraciones iniciales mostraban mayores diferencias entre especialistas. Como consecuencia, la probabilidad final obtenida para los  $A_n$  del *FTA* se encuentra dominada por las evaluaciones más consistentes desde el punto de vista técnico, sin eliminar la variabilidad inherente al sistema.

La redistribución de pesos obtenida mediante la entropía refuerza la coherencia interna del modelo y contribuye a que la cuantificación del riesgo represente de mejor forma el comportamiento geomecánico esperado en la unidad minera analizada.

### 4.3 Cuantificación y ponderación del Árbol de Fallas

La determinación de la  $P_{ES}$  se realiza mediante una estructura lógica de dependencia, donde la ponderación por entropía de los eventos intermedios refina la influencia de cada rama antes de su integración final en la compuerta lógica superior.

#### 4.3.1 Determinación de pesos y probabilidades para los eventos intermedios

Se aplica el cálculo de entropía sobre los eventos intermedios, tratándolos como criterios determinantes. Según los resultados del [Anexo L](#), se obtienen los pesos de importancia que reflejan la contribución de cada pilar al riesgo sistémico y se calculan las probabilidades finales para cada evento intermedio. Este procedimiento normaliza la probabilidad nominal según la relevancia técnica de cada rama causal:

- $A_1$ :  $5.14 \cdot 10^{-2}$
- $A_2$ :  $3.33 \cdot 10^{-2}$
- $A_3$ :  $1.29 \cdot 10^{-2}$

#### 4.3.2 Probabilidad Final del Evento Superior

El valor obtenido ( $2.21 \times 10^{-5}$ ) representa la probabilidad de ocurrencia del estallido de roca bajo el rigor del modelo de concurrencia de factores. Este resultado es consistente con la naturaleza de los eventos de baja frecuencia, pero alto impacto, donde la coincidencia de condiciones extremas de energía, sismicidad y debilidad estructural local es necesaria para desencadenar el colapso.

### 4.4 Análisis y jerarquización de los resultados del Análisis de Árbol de Fallas

Para la evaluación de la fase causal, se presenta en la **Figura 4.1** el esquema cuantificado del FTA. En este gráfico se sintetiza la progresión del riesgo, desde la activación de los eventos básicos hasta la consolidación de la probabilidad del evento superior. Esta representación visual es fundamental para trazar las trayectorias de fallo que comprometen la estabilidad del sistema.

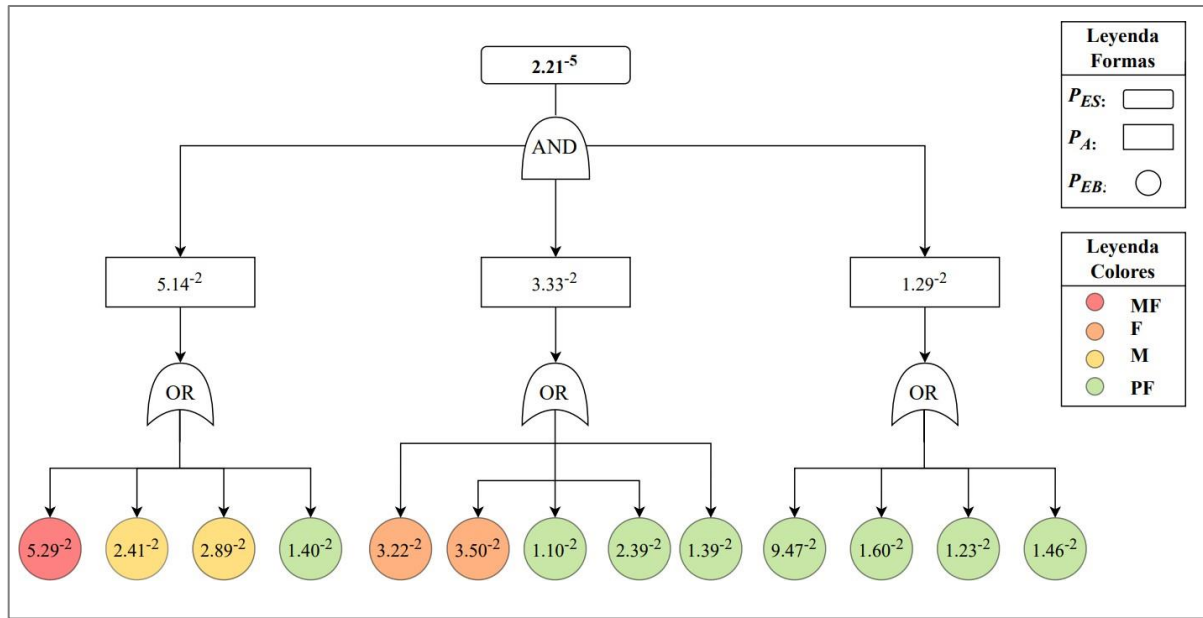


Figura 4. 1: Esquema cuantificado del Árbol de Fallas para el evento superior de Estallido de Rocas.

#### 4.4.1 Categorización de Eventos Básicos

La cuantificación difusa permite clasificar los eventos según su peso probabilístico en tres niveles de criticidad:

**Nivel Crítico (Muy Frecuente):** El  $EB_1$  ( $5.29^{-2}$ ) se posiciona como el disparador primario. Su ubicación bajo una compuerta **OR** en el nodo  $A_1$  le permite transferir su alta probabilidad de forma directa, siendo la causa raíz de mayor persistencia operativa.

**Nivel Significativo (Frecuentes):** Los eventos  $EB_5$  ( $3.22^{-2}$ ) y  $EB_6$  ( $3.50^{-2}$ ) actúan como catalizadores. Generan una vulnerabilidad constante en el nodo  $A_2$ , alimentando la rama central del riesgo.

**Nivel Base (Poco Frecuentes):** Los 10 eventos restantes actúan como factores de entorno con una contribución individual menor ( $< 3.0^{-2}$ ), asegurando que ninguna ruta potencial quede excluida.

#### 4.4.2 Determinación de la ruta crítica

La ruta crítica define el camino de menor resistencia hacia el estallido de rocas, condicionada por la arquitectura lógica del sistema:

**Segmento Geomecánico ( $A_1$ ):** La ruta inicia en el  $EB_1$ . Debido a la nula resistencia lógica de la compuerta **OR**, la probabilidad del  $EB$  se transfiere casi íntegramente, convirtiendo a este segmento en el punto de mayor exposición.

**Segmento Operacional ( $A_2$ ):** El flujo continúa por la rama central donde la interacción de los  $EB_5$  y  $EB_6$  mantiene una presión constante. La estructura de este nodo presenta una baja capacidad de filtrado, permitiendo el avance del riesgo.

**Convergencia Estructural ( $A_3$ ):** La ruta culmina en el nodo  $A_3$ , donde la compuerta **AND** actúa como la única barrera de mitigación efectiva. Esta compuerta logra una reducción drástica del riesgo final ( $2.21 \times 10^{-5}$ ) al exigir la concurrencia simultánea de las tres ramas.

#### 4.4.3 Interpretación de la Probabilidad del Evento Superior y salto de magnitud

El análisis de la ruta evidencia que la robustez del sistema reside en su arquitectura lógica. Mientras que las causas individuales ( $EB$ ) y los nodos intermedios ( $A_1, A_2, A_3$ ) operan en el orden de centésimas ( $10^{-2}$ ), el  $ES$  se sitúa en el orden de cienmilésimas ( $10^{-5}$ ). Este salto de magnitud demuestra que el diseño de seguridad de la mina es eficaz para segregar fallas operacionales comunes, evitando que estas se traduzcan directamente en un estallido de roca, a menos que ocurra una coincidencia de fallos en las tres rutas principales.

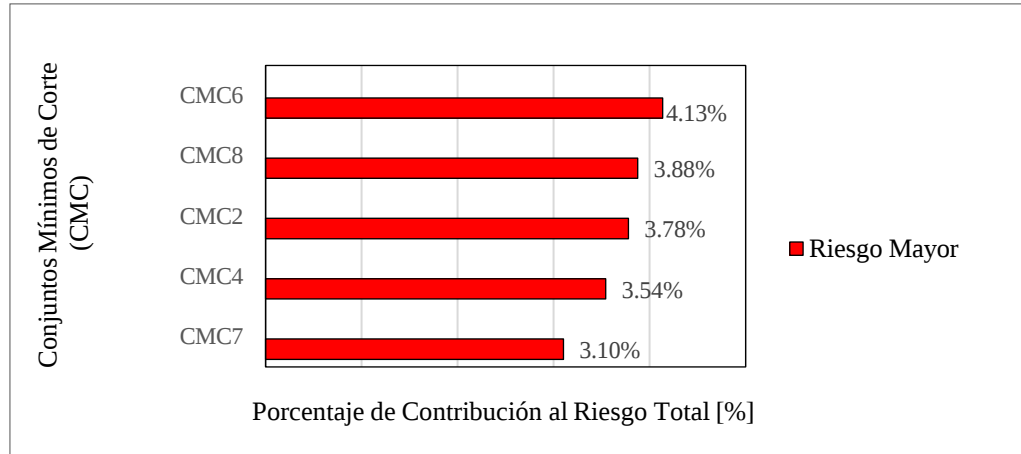
#### 4.4.4 Análisis de los Conjuntos Mínimos de Corte

Tras la integración de probabilidades, se identifican y jerarquizan los escenarios de falla. La **Tabla 4.1** detalla la composición lógica y los valores de los escenarios de mayor impacto, exponiendo la interacción específica entre los eventos básicos que activan la cúspide del árbol.

**Tabla 4. 1: Composición y probabilidad de los principales Conjuntos Mínimos de Corte.**

| CMC ID      | Evento 1 | Evento 2 | Evento 3  | Probabilidad | Jerarquía |
|-------------|----------|----------|-----------|--------------|-----------|
| <b>CMC6</b> | $EB_1$   | $EB_6$   | $EB_{11}$ | 2.968E-05    | 1         |
| <b>CMC8</b> | $EB_1$   | $EB_6$   | $EB_{13}$ | 2.783E-05    | 2         |
| <b>CMC2</b> | $EB_1$   | $EB_5$   | $EB_{11}$ | 2.714E-05    | 3         |
| <b>CMC4</b> | $EB_1$   | $EB_5$   | $EB_{13}$ | 2.544E-05    | 4         |
| <b>CMC7</b> | $EB_1$   | $EB_6$   | $EB_{12}$ | 2.226E-05    | 5         |

La concentración del riesgo se evidencia gráficamente en la **Figura 4.2**. Se observa que la probabilidad total no presenta una distribución uniforme, sino que recae en un número reducido de combinaciones críticas.



**Figura 4. 2: Contribución porcentual de los Conjuntos Mínimos de Corte (CMC) más críticos al riesgo total.**

La cuantificación refleja que el  $CMC_6$  posee la mayor influencia (4.13%), seguido por el  $CMC_8$  (3.88%) y el  $CMC_2$  (3.78%). Esta asimetría en los resultados permite identificar que la mayor carga del riesgo se concentra en rutas que comparten el  $EB_1$  (Rigidez del macizo) y el  $EB_6$  (Secuencia de minado). El listado completo de los 80 CMC se encuentra disponible en el [Anexo J](#).

#### 4.4.5 Análisis de los resultados de Importancia Estructural

A partir de los índices calculados en la fase experimental, se identifican dos rangos predominantes (**Tabla 4.2**) que agrupan la totalidad de los eventos críticos. Aunque la diferencia numérica entre los índices es mínima, la disparidad en la participación de escenarios de falla revela una jerarquía clara en la vulnerabilidad del sistema.

**Tabla 4. 2: Comparativa de criticidad según importancia estructural.**

| Rango de Prioridad | Índice de Importancia | Participación en CMC | Nivel de Conectividad |
|--------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Rango 1            | 1                     | 20 rutas             | Máxima                |
| Rango 2            | 2                     | 16 rutas             | Alta                  |

## 4.5 Análisis de consecuencias mediante el Árbol de Eventos

El modelo de Árbol de Eventos evalúa la progresión del riesgo tras la sismicidad inducida (*EI*). Esta fase cuantifica la eficacia de las barreras físicas y operacionales a partir del juicio experto y la lógica difusa.

### 4.5.1 Procesamiento de juicios expertos y algoritmo Fu-ETO

La cuantificación de las barreras se fundamenta en las respuestas de los once expertos al cuestionario aplicado. El algoritmo *Fu-ETO* procesa las calificaciones lingüísticas (desde *MPF* hasta *MF*), integrando la ponderación por entropía de cada especialista.

Se observa una tendencia crítica en las valoraciones:

**Consenso en Fallas Estructurales:** Existe una convergencia elevada en la percepción de que, ante mecanismos de ruptura indirectos o estructurales, la superación de la capacidad del soporte es "Muy Frecuente". Esto se refleja en la probabilidad de fallo asignada a la barrera  $E_6$  bajo dicho escenario.

**Eficacia de Barreras Preventivas:** El panel identifica que la absorción elástica del macizo y el control de energía mediante tronadura previa poseen las mayores tasas de éxito, lo que actúa como el primer filtro de seguridad del sistema.

**Percepción de Exposición:** Las respuestas a las preguntas 8 y 9 ([Anexo Ñ](#)) revelan que los expertos asocian una mayor probabilidad de presencia de personal en eventos de origen estructural debido a la amplitud del área afectada, en comparación con los eventos de ruptura directa.

### 4.5.2 Cuantificación integral y diagrama del Árbol de Eventos

La integración de estos juicios expertos permite construir el esquema cuantificado que se presenta en la **Figura 4.3**. Cada nodo refleja la probabilidad de éxito (rama superior) o falla (rama inferior) derivada del consenso difuso del panel.

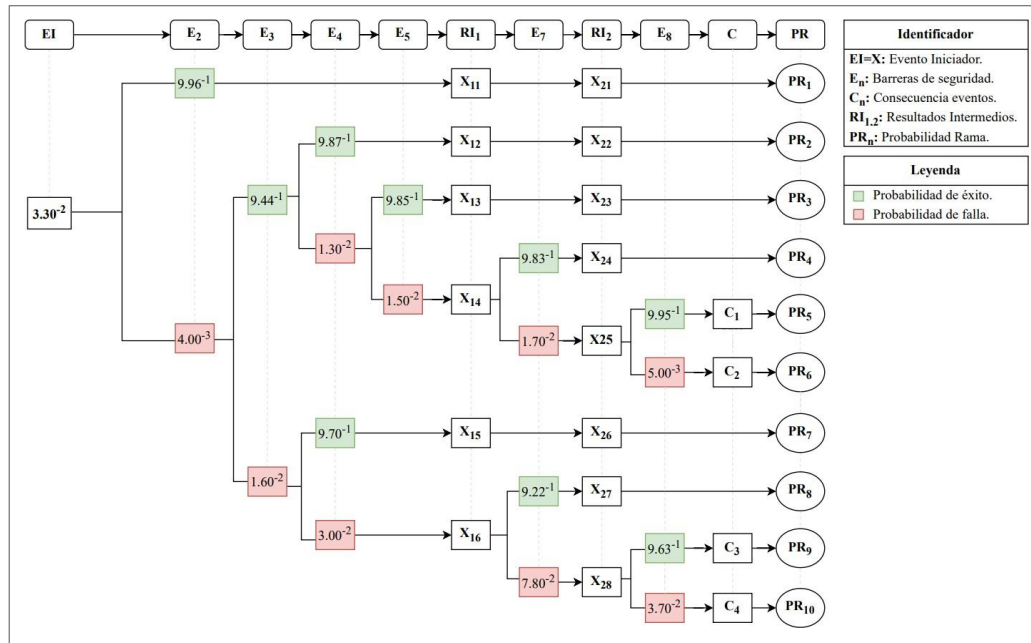


Figura 4. 3: Diagrama de Cuantificación Integral del Árbol de Eventos (ETA) para Sismicidad Inducida.

#### 4.5.3 Análisis de los hitos de Resultados Intermedios

El flujo del riesgo se monitorea a través de dos hitos fundamentales:

**Potencial de Estallido ( $RI_1$ ):** El escenario dominante es el  $X_{11}$  (Tabla 4.3). Los expertos validan que la mayoría de los eventos sísmicos mantienen un riesgo activo si las barreras iniciales de confinamiento y control de energía no operan simultáneamente.

Tabla 4. 3: Cuantificación del Potencial de Estallido en el Hito de Resultado Intermedio ( $RI_1$ )

| Barrera $RI_1$ (Éxito/Falla) | Probabilidad $RI_1$ |
|------------------------------|---------------------|
| $X_{11}$                     | $3.29^{-2}$         |
| $X_{12}$                     | $1.28^{-4}$         |
| $X_{13}$                     | $2.53^{-8}$         |
| $X_{14}$                     | $2.53^{-8}$         |
| $X_{15}$                     | $2.05^{-6}$         |
| $X_{16}$                     | $6.34^{-8}$         |

**Ocurrencia del Estallido Físico ( $RI_2$ ):** Este hito define la manifestación violenta del fenómeno. La alta probabilidad en la ruta de "No Ocurrencia"  $X_{27}$  (Tabla 4.4) ratifica que el sistema estabiliza la energía en la mayoría de los ciclos, gracias a la eficacia percibida en las barreras preventivas.

**Tabla 4. 4: Probabilidades de escenarios para la determinación de la ocurrencia del estallido físico ( $RI_2$ )**

| Barrera $RI_2$ (Éxito/Falla) | Probabilidad $RI_2$ |
|------------------------------|---------------------|
| $X_{21}$                     | $3.29^{-2}$         |
| $X_{22}$                     | $1.28^{-4}$         |
| $X_{23}$                     | $2.53^{-8}$         |
| $X_{24}$                     | $2.49^{-8}$         |
| $X_{25}$                     | $4.31^{-10}$        |
| $X_{26}$                     | $2.05^{-6}$         |
| $X_{27}$                     | $9.22^{-1}$         |
| $X_{28}$                     | $7.80^{-2}$         |

#### 4.5.4 Análisis de las categorías de consecuencia operativa

El cálculo final de las consecuencias se deriva de la bifurcación crítica del mecanismo de ruptura. Las ramas se agrupan según si el evento se origina por un mecanismo **Directo** o **Indirecto**. En la **Tabla 4.6** se detallan los resultados finales, donde  $C_1$  y  $C_3$  representan el éxito del sistema, mientras que  $C_2$  y  $C_4$  representan la falla.

**Tabla 4.6: Probabilidades finales por categoría de consecuencia operativa.**

| Consecuencia | Clasificación | Mecanismo | Descripción Técnica del Escenario                     | Probabilidad de Consecuencia |
|--------------|---------------|-----------|-------------------------------------------------------|------------------------------|
| $C_1$        | Éxito         | Directo   | Daño Material Severo / Pérdida de Infraestructura     | $4.09^{-11}$                 |
| $C_2$        | Falla         | Directo   | Fatalidad o Lesión grave incapacitante                | $2.15^{-12}$                 |
| $C_3$        | Éxito         | Indirecto | Mitigación Exitosa / Control de Energía sin Estallido | $4.76^{-9}$                  |
| $C_4$        | Falla         | Indirecto | Fatalidad o Lesión grave incapacitante                | $1.83^{-10}$                 |

#### 4.5.5 Interpretación de la jerarquía de impacto

**Eficacia de la Prevención ( $C_3$ ):** Se observa que la probabilidad de mitigación exitosa sin manifestación de estallido es de  $4.76^{-9}$ . Aunque es el escenario de control más probable dentro de las rutas de riesgo activado, su orden de magnitud ratifica que el sistema de gestión geomecánica logra confinar la sismicidad en la gran mayoría de los eventos operativos antes de que escalen a un fenómeno físico violento.

**Desempeño de la Fortificación ( $C_1$ ):** El valor de  $4.09^{-11}$  demuestra que el sostenimiento dinámico actúa como una barrera de seguridad secundaria crucial ante mecanismos directos. En los casos donde el fenómeno físico llega a ocurrir, el soporte logra absorber la energía y mitigar el impacto, evitando consecuencias fatales en una proporción significativamente mayor a la probabilidad de un fallo catastrófico total.

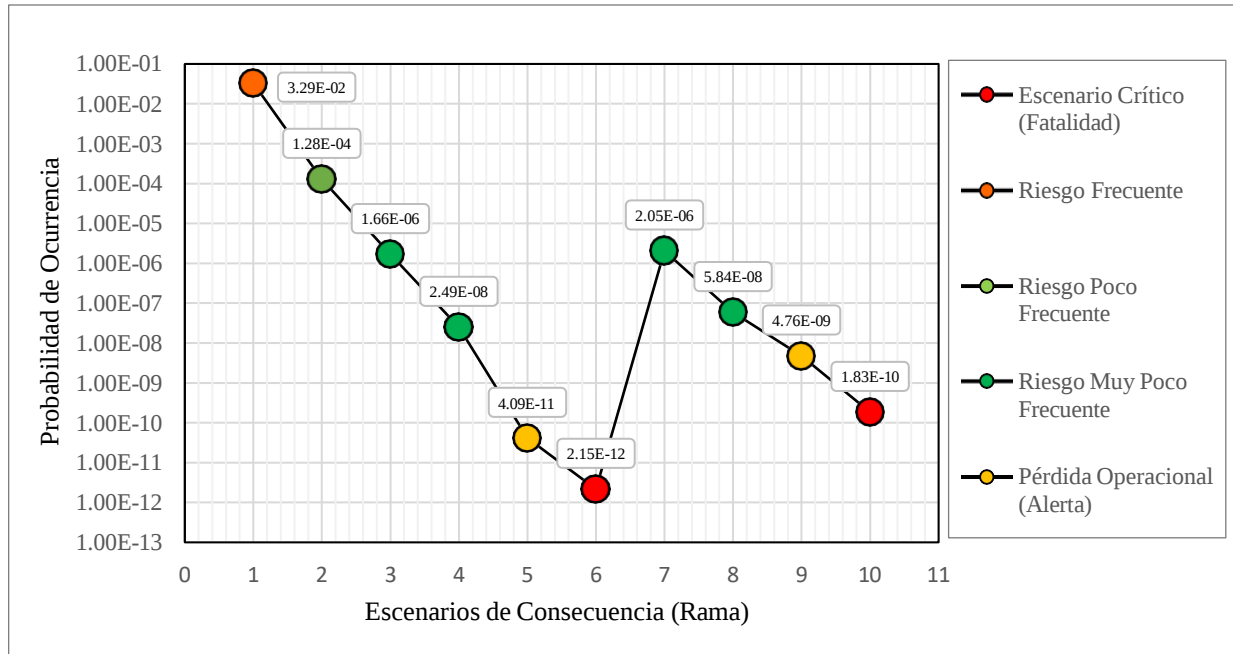
**Minimización del Riesgo Fatal ( $C_2$  y  $C_4$ ):** Las probabilidades para las consecuencias más severas se sitúan en órdenes de magnitud extremadamente bajos  $10^{-10}$  y  $10^{-12}$ . Estos resultados confirman que, bajo las condiciones de control evaluadas mediante el modelo *Fu-ETO*, la probabilidad de que un estallido resulte en una fatalidad por pérdida de soporte o daño estructural es mínima. Se requiere la coincidencia de fallos críticos simultáneos en todas las líneas de defensa para alcanzar estos desenlaces.

#### **4.5.6 Interpretación de la severidad frente a la probabilidad**

Es fundamental precisar que las probabilidades obtenidas, aun cuando se expresen en órdenes de magnitud bajos, no implican que el riesgo sea inexistente ni que la ocurrencia del evento sea imposible. Estas cifras reflejan la presencia de un sistema de control robusto, sustentado en múltiples barreras de defensa, lo que es coherente con la naturaleza del estallido de roca como un fenómeno de baja frecuencia, pero de consecuencias extremadamente severas. En este contexto, la sismicidad inducida y su eventual manifestación en estallidos físicos se presentan como hechos aislados gracias a la aplicación de protocolos de control de energía y fortificación dinámica, siendo la baja probabilidad una medida de la eficacia del sistema analizado y no de la eliminación del peligro latente. A pesar de ello, se reconoce que la severidad asociada a estos escenarios de falla es máxima, dado que un estallido de roca que supera el sostenimiento puede generar daños estructurales de carácter catastrófico y, de manera crítica, poner en riesgo la vida de las personas. Esta marcada asimetría entre probabilidad y severidad permite sustentar, desde un punto de vista técnico, la necesidad de implementar soluciones avanzadas de fortificación dinámica y herramientas predictivas como el algoritmo *Fu-ETO*, orientadas a reducir la exposición al riesgo residual. Bajo esta perspectiva, los resultados obtenidos deben interpretarse como una evaluación de la robustez del sistema de control considerado en este estudio, sin que ello implique una reducción de la exigencia operacional, dado que el impacto potencial asociado a una falla supera ampliamente su probabilidad de ocurrencia.

#### 4.5.7 Interpretación de las ramificaciones y salto de magnitud

El análisis de las diez ramas finales evidencia un comportamiento decreciente del riesgo. Dada la diferencia de órdenes de magnitud entre los escenarios de éxito y los de fatalidad, se emplea una escala logarítmica en la **Figura 4.4**.



**Figura 4. 4: Distribución de Probabilidades de Escenarios (ETA).**

**Dominio de la Seguridad:** La rama 1( $PR_1$ ) confirma que la absorción elástica es el desenlace más probable según la cuantificación de los expertos.

**Escenarios Críticos:** Las trayectorias de fatalidad ( $PR_6$  y  $PR_{10}$ ) se sitúan en niveles extremadamente bajos, demostrando que el sistema segrega las consecuencias graves mediante múltiples filtros de seguridad independientes.

Este análisis de consecuencias cierra el ciclo de evaluación del riesgo, proporcionando una base cuantitativa para la toma de decisiones y la priorización de inversiones en soporte dinámico y monitoreo sísmico.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En primer lugar, el análisis mediante Árbol de Fallas permite establecer que el estallido de roca corresponde a un fenómeno multicausal y concurrente, cuya ocurrencia no puede atribuirse a un único factor aislado. La presencia simultánea de acumulación crítica de energía en el macizo rocoso, la acción de un disparador asociado a sismicidad inducida y la existencia de condiciones locales que favorecen la expulsión del material resultan necesarias para la materialización del evento. Esta estructura causal confirma que el estallido de roca no es un fenómeno aleatorio, sino el resultado de la interacción sistémica entre condiciones geomecánicas, decisiones operacionales y características estructurales locales.

El análisis de los Conjuntos Mínimos de Corte evidencia que el riesgo no se distribuye de manera uniforme entre todas las combinaciones posibles de eventos básicos, sino que se concentra en un número reducido de trayectorias dominantes. En particular, se identifica la presencia de un evento básico habilitador que aparece de forma recurrente en los conjuntos más críticos, actuando como condición basal para la activación del riesgo. A partir de esta condición, la combinación con factores operacionales y condiciones locales desfavorables define las rutas de mayor contribución a la probabilidad total del estallido. Este resultado permite priorizar acciones de control de manera jerárquica y focalizada, evitando estrategias de mitigación generales o poco eficientes.

La aplicación del Árbol de Eventos complementa el análisis causal del *FTA* al incorporar explícitamente la secuencia temporal del fenómeno y el efecto de las barreras de control. Los resultados del *ETA* confirman que, aun bajo la presencia de sismicidad inducida, la mayoría de las trayectorias posibles conduce a escenarios de no ocurrencia del estallido, debido a la capacidad del macizo para absorber o disipar la energía, así como a la efectividad de las medidas de control de esfuerzos y confinamiento. De este modo, el estallido de roca se caracteriza como un evento de baja probabilidad global, pero de consecuencias potencialmente severas.

Un aporte central del trabajo corresponde a la definición de dos hitos de resultados intermedios: el potencial de estallido ( $RI_1$ ) y la ocurrencia del estallido físico tras la interacción con la barrera de fortificación y soporte ( $RI_2$ ). El análisis del  $RI_1$  muestra que la susceptibilidad del sistema puede

alcanzar valores relativamente elevados en escenarios específicos, particularmente cuando las barreras iniciales de confinamiento y control de energía no operan de forma simultánea. Sin embargo, al incorporar la barrera de fortificación en el  $RI_2$ , se observa una reducción de varios órdenes de magnitud en la probabilidad de ocurrencia del estallido físico, desplazando los escenarios críticos hacia probabilidades del orden de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$ . Este resultado confirma que la fortificación no elimina el potencial geomecánico del fenómeno, pero constituye una barrera altamente efectiva para impedir su materialización.

El análisis de las ramas finales del Árbol de Eventos permite evidenciar una separación de órdenes de magnitud entre los escenarios frecuentes y aquellos asociados a consecuencias críticas, tales como fatalidades o lesiones graves incapacitantes. Esta diferencia justifica el uso de escalas logarítmicas para la representación de los resultados y refuerza el carácter de baja frecuencia y alta consecuencia propio de los estallidos de roca. En este contexto, se identifica que la severidad final del evento no depende únicamente de la ocurrencia del estallido, sino que se encuentra fuertemente condicionada por la exposición del personal, destacando la relevancia de medidas operacionales y administrativas como la exclusión de áreas, el control de accesos y la definición de protocolos de reingreso.

Asimismo, la aplicación del algoritmo *Fu-ETO* permite abordar de manera sistemática la limitada disponibilidad de datos cuantitativos asociada a eventos de estallidos de roca. A través de este enfoque, la información cualitativa proveniente de la experiencia operacional y del conocimiento experto se transforma en valores probabilísticos coherentes, posibilitando su incorporación directa en los Árboles de Fallas y Árboles de Eventos. Este procedimiento reduce la subjetividad inherente a las evaluaciones cualitativas tradicionales y proporciona una base cuantitativa trazable para el análisis del riesgo, fortaleciendo la consistencia interna del modelo y su aplicabilidad.

En conjunto, los resultados demuestran que la gestión del riesgo de estallidos de roca debe abordarse mediante un enfoque jerárquico e integrado, que priorice el control de la acumulación y liberación de energía, la planificación y secuencia de minado, la implementación de medidas activas de alivio de esfuerzos y, finalmente, el diseño adecuado de fortificación dinámica orientada principalmente a la mitigación de consecuencias. El enfoque probabilístico desarrollado en esta investigación se presenta como una herramienta complementaria al diseño geomecánico tradicional, aportando una visión estructurada y cuantificable del riesgo, especialmente útil en contextos de alta incertidumbre y disponibilidad limitada de información.

Finalmente, se concluye que la metodología propuesta es adaptable y escalable, pudiendo ser aplicada a distintos contextos geológicos y operacionales, así como complementada con información proveniente de sistemas de monitoreo sísmico. De esta forma, el trabajo contribuye tanto al entendimiento del fenómeno de estallidos de roca como al desarrollo de una base metodológica sólida para apoyar la toma de decisiones en materia de seguridad, planificación y diseño geomecánico en minería subterránea profunda.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda que la metodología probabilística desarrollada sea utilizada como complemento al diseño geomecánico tradicional, integrando enfoques deterministas y probabilísticos para una gestión más robusta del riesgo asociado a eventos dinámicos de baja frecuencia y alta consecuencia.

Se sugiere aplicar el modelo *FTA-ETA* de manera iterativa a lo largo del ciclo de vida de la mina, actualizando las probabilidades en función de cambios en la secuencia de minado, geometría de excavaciones y condiciones geomecánicas observadas, de modo de utilizar el modelo como una herramienta dinámica de gestión del riesgo.

Los resultados de los Conjuntos Mínimos de Corte deben emplearse como base para la priorización de medidas de control, enfocando los esfuerzos en los eventos habilitadores y operacionales que dominan el riesgo global. Asimismo, se recomienda fortalecer las barreras de control identificadas como más efectivas, particularmente aquellas asociadas al control de energía, planificación operativa y diseño de fortificación dinámica acorde al nivel energético esperado.

Dado que la severidad final del evento se encuentra fuertemente condicionada por la exposición del personal, se recomienda reforzar las medidas administrativas y operacionales orientadas a la gestión de accesos, zonificación de áreas de alto riesgo y definición de protocolos de exclusión y reingreso.

Desde el punto de vista metodológico, se sugiere profundizar el uso del algoritmo de lógica difusa mediante la incorporación de un mayor número de expertos y la calibración progresiva de sus parámetros con datos instrumentales, así como explorar su integración futura con sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real para la actualización dinámica del riesgo.

## 6 GLOSARIO

|                                            |                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Sismicidad Remanente</i>                | Actividad sísmica que persiste después de las tronaduras o de la actividad operativa principal.                                                                                                                       |
| <i>Incertidumbre Epistémica</i>            | Tipo de incertidumbre derivada de la falta de conocimiento o de datos (a diferencia de la aleatoria).                                                                                                                 |
| <i>Desfuzzificación</i>                    | Es el proceso matemático de convertir los resultados "difusos" (rangos de valores con grados de pertenencia) en un único valor preciso o "nítido" (crisp value).                                                      |
| <i>Función de Membresía</i>                | Curva que define cómo cada punto del espacio de entrada se mapea en un valor de pertenencia entre 0 y 1.                                                                                                              |
| <i>Matriz de Decisión Normalizada</i>      | Matriz transformada donde los valores de distintos indicadores se ajustan a una escala común (generalmente entre 0 y 1) para permitir la comparación técnica de diferentes escenarios de riesgo sin sesgos de unidad. |
| <i>Distancia Euclidiana</i>                | Medida utilizada dentro del método <i>TOPSIS</i> para calcular qué tan lejos se encuentra una solución de la "solución ideal positiva" y de la "solución ideal negativa".                                             |
| <i>Antropogénicas</i><br>(Causas/Acciones) | Se refiere a todos los factores o eventos originados por la actividad humana.                                                                                                                                         |
| <i>Caving (Hundimiento)</i>                | Método de explotación minera subterránea de gran escala (como el <i>Block Caving</i> o <i>Panel Caving</i> ) que utiliza la gravedad para el fracturamiento y extracción del mineral.                                 |

## 7 REFERENCIAS

- [1] M. Cai y P. K. Kaiser, Rockburst Support Reference Book: Volume 1 – Rockburst Phenomenon and Support Characteristics, Sudbury, ON: MIRARCO – Mining Innovation, Laurentian University, 2018.
- [2] Sector Minero, «Prevención y mitigación de estallidos de rocas en excavaciones subterráneas,» Sector Minero, [En línea].  
Recuperado de: <https://sectorminero.com.pe/prevencion-y-mitigacion-de-estallidos-de-rocas-en-excavaciones-subterraneas-2/articulos-tecnicos/>.
- [3] B. Batkhuu, «Operational benchmarking and ground response analysis for undercutting in high-stress cave mines,» The University of Queensland, Brisbane, 2025.
- [4] M. Cai, «Rockburst risk control and mitigation in deep mining,» *Deep Resources Engineering*, vol. 1, p. 100019, 2024.
- [5] Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), «Accidentes fatales en minería,» [En línea].  
Recuperado de: <https://www.sonami.cl/v2/seguridad-en-mineria/accidentes-fatales/>.  
[Último acceso: 1 enero 2026].
- [6] CODELCO, «El Teniente recupera producción de sectores afectados por mayor evento,» Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO), 14 Octubre 2024. [En línea].  
Recuperado de: <https://www.codelco.com/el-teniente-recupera-produccion-de-sectores-afectados-por-mayor-evento>. [Último acceso: 4 Septiembre 2025].
- [7] Centro Sismológico Nacional, «Informe de sismicidad, evento 204712,» Centro Sismológico Nacional, 24 julio 2023. [En línea]. Recuperado de: <https://www.sismologia.cl/sismicidad/informes/2023/07/204712.html>. [Último acceso: 5 septiembre 2025].
- [8] Centro Sismológico Nacional, «Informe de sismicidad, evento 310684,» Centro Sismológico Nacional, 31 julio 2025. [En línea]. Recuperado de:

<https://www.sismologia.cl/sismicidad/informes/2025/07/310684.html>. [Último acceso: 5 septiembre 2025].

- [9] A. Gudmundsson, «Elastic energy release in great earthquakes and eruptions,» *Frontiers in Earth Science*, vol. 2, p. 10, 2014.
- [10] B. H. G. Brady y E. T. Brown, *Rock mechanics for underground mining*, 3 ed., Dordrecht: Springer, 2004.
- [11] V. J. Ortega Contreras, «Modelos de peligro sísmico para tronaduras de incorporación de área en el sector Reservas Norte, El Teniente, Codelco, Chile,» Universidad de Chile, Santiago. Chile, 2015.
- [12] J. N. Brune, «Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, n° 26, pp. 4997-5009, 1970.
- [13] Servicio Sismológico Nacional, «Magnitud de un sismo,» *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- [14] M. Askaripour, A. Saeidi, A. Rouleau y P. Mercier-Langevin, «Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods,» *Underground Space*, vol. 7, pp. 577-607, 2022.
- [15] H. Kanamori y D. L. Anderson, «Theoretical basis of some empirical relations in seismology,» *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, n° 5, pp. 1073-1095, 1975.
- [16] P. K. Kaiser y A. Moss, «Deformation-based support design for highly stressed ground with a focus on rockburst damage mitigation,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, n° 1, pp. 50-66, 2022.
- [17] D. Romero, «Análisis de sismicidad inducida en mina subterránea Río Blanco sector norte III panel áreas 15, 16 y 17 nivel 16 hundimiento Codelco División Andina,» Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2013.

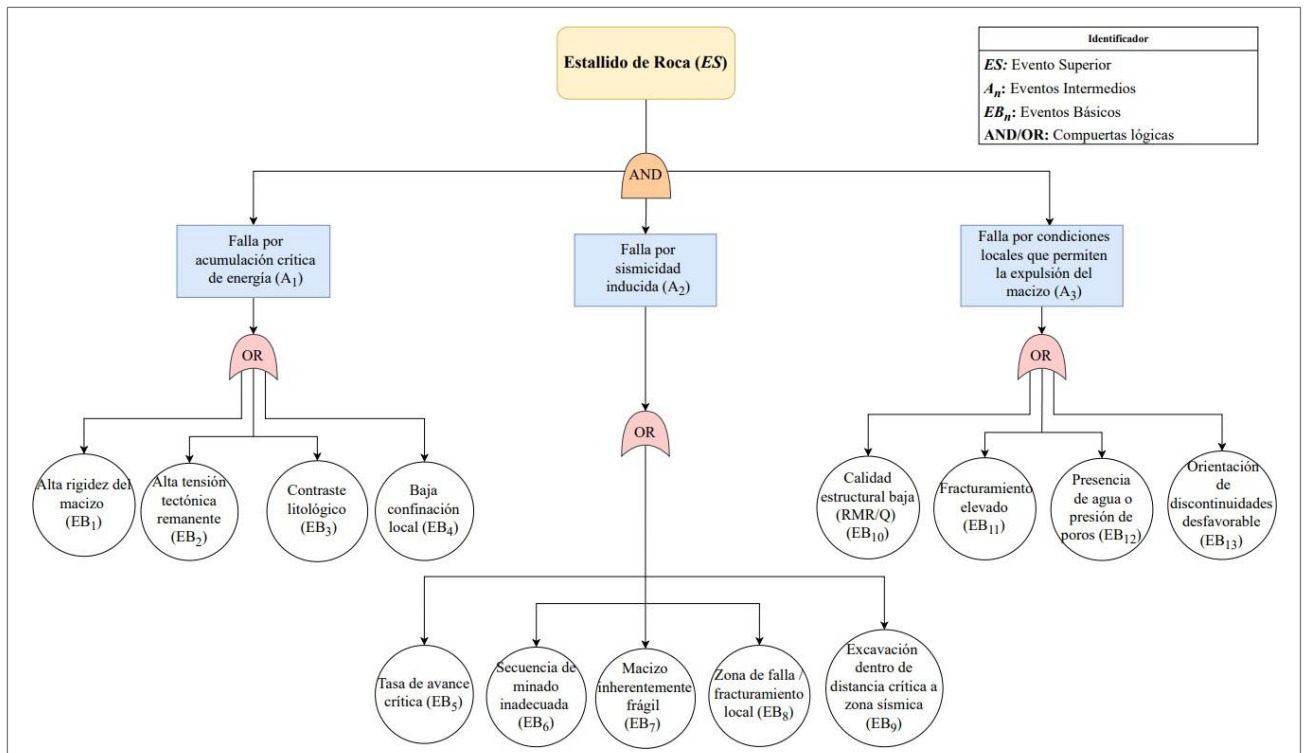
- [18] R. Pérez Pueyo, «Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos,» Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- [19] M.-S. Yang y Z. Hussain, «Fuzzy entropy for Pythagorean fuzzy sets with application to multicriterion decision making,» *Complexity*, vol. 2018, p. 14, 2018.
- [20] . E. Aydoğdu, E. Güner, . B. Aldemir y H. Aygün, «Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy,» *Expert Systems with Applications*, vol. 215, p. 119331, 2023.
- [21] T. Onisawa, «A representation of human reliability using fuzzy concepts,» *Information Sciences*, vol. 45, pp. 153-173, 1998.
- [22] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «NTP 333: Análisis probabilístico de riesgos: metodología del árbol de fallos y errores,» 1993.
- [23] D. Huang, T. Chen y M.-J. J. Wang, «An approach of fuzzy sets for event tree analysis,» *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 118, pp. 153-165, 2001.
- [24] Z. Xiao, S. Xia, K. Gong y D. Li , «The trapezoidal fuzzy soft set and its application in MCDM,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, pp. 5844-5855, 2012.
- [25] R. Skjong y B. H. Wentworth, «Expert judgement and risk perception,» Det Norske Veritas, Oslo, Norway, 2001.
- [26] S. Toker, «The mental model comparison of expert and novice performance improvement practitioners,» Wayne State University, Detroit, 2012.
- [27] J. Shanteau, «Competence in experts: The role of task characteristics,» *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 53, pp. 252-266, 1992.
- [28] K. A. Ericsson, N. Charness, P. J. Feltovich y R. R. Hoffman, *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

- [29] E. Hoek y E. T. Brown, Underground Excavations in Rock, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [30] Y. Potvin, Strategies and tactics to control seismic risks in mines, Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2009.
- [31] B. M. Ayyub, Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks, Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [32] K. Larsson, «Seismicity in mines: A review,» Luleå University of Technology, Luleå, 2004.

## 8 ANEXOS

### Anexo A: Estructura lógica y representación gráfica del Árbol de Fallas (FTA).

**Tabla A. 1: Representación Sistemática de las Trayectorias Causales del Estallido de Roca mediante Diagrama de Árbol de Fallas.**



### Anexo B: Instrumento de recolección de juicios expertos FTA.

**Tabla B. 1: Información del Perfil Profesional (Datos para Entropía)**

| Ítem | Atributo de Evaluación          | Opciones de Respuesta / Escala                               |
|------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1    | Nombre del Experto              | Respuesta abierta                                            |
| 2    | Cargo actual                    | Respuesta abierta                                            |
| 3    | Años de experiencia profesional | < 5 años; 5-10 años; 10-20 años; > 20 años                   |
| 4    | Área principal de desempeño     | Geotecnia; Fortificación; Planificación; Seguridad; Docencia |

**Tabla B. 2: I. Evaluación de Probabilidad de Ocurrencia (Escala Lingüística).**

| Sección                          | ID | Variable o Evento Básico Evaluado                    | Escala de Respuesta     |
|----------------------------------|----|------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>A. Acumulación de Energía</b> | 5  | Presencia de alta rigidez en el macizo rocoso        | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 6  | Existencia de altos esfuerzos tectónicos remanentes  | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 7  | Contrastes litológicos significativos entre unidades | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 8  | Baja confinación local en excavaciones críticas      | MF — F — MEF — PF — MPF |
| <b>B. Sismicidad y Macizo</b>    | 9  | Tasa de avance elevada o crítica de la excavación    | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 10 | Secuencia de minado inadecuada u omitida             | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 11 | Comportamiento frágil del macizo rocoso              | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 12 | Presencia de zonas de falla o fracturamiento intenso | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 13 | Ubicación en sectores con alta micro-sismicidad      | MF — F — MEF — PF — MPF |
| <b>C. Condiciones Locales</b>    | 14 | Baja calidad estructural del macizo (RMR o Q)        | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 15 | Fracturamiento elevado en el sector evaluado         | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 16 | Presencia de agua o presión de poros elevada         | MF — F — MEF — PF — MPF |
|                                  | 17 | Orientación desfavorable de discontinuidades         | MF — F — MEF — PF — MPF |

**Tabla B. 3: Factores de Soporte y Mitigación.**

| ID | Pregunta Técnica sobre Sostenimiento                 | Escala de Respuesta     |
|----|------------------------------------------------------|-------------------------|
| 19 | Diseño inadecuado del sostenimiento ante esfuerzos   | MF — F — MEF — PF — MPF |
| 20 | Secuencia de instalación incorrecta o inoportuna     | MF — F — MEF — PF — MPF |
| 21 | Errores en la ejecución o instalación incompleta     | MF — F — MEF — PF — MPF |
| 22 | Inadecuación del soporte para las condiciones reales | MF — F — MEF — PF — MPF |

**Tabla B. 4: Selección de Factores Determinantes.**

| ID | Pregunta Técnica sobre Sostenimiento                                                                                                                                                                                             | Escala de Respuesta            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 18 | Se solicita al experto identificar un máximo de tres (3) factores que, bajo su criterio, poseen la mayor influencia en el desencadenamiento de un estallido de roca dentro de la lista de eventos básicos previamente evaluados. | <b>Selección de Criticidad</b> |

## Anexo C: Justificación de la asignación de puntajes según cargo profesional

Los puntajes asignados en la Tabla C.1 se establecen considerando el nivel de especialización profesional, la jerarquía académica y el grado de formación de los expertos.

**Tabla C. 1: Composición del panel de expertos y la asignación de puntajes por criterio.**

| Experto | Cargo Actual                 | P1 | Años de Experiencia | P2 | Área de Desempeño        | P3 | Puntaje Total |
|---------|------------------------------|----|---------------------|----|--------------------------|----|---------------|
| E1      | Docente                      | 5  | Entre 10 y 20 años  | 4  | Investigación o docencia | 2  | 11            |
| E2      | Profesora Asistente          | 4  | Entre 5 y 10 años   | 2  | Investigación o docencia | 2  | 8             |
| E3      | Estudiante Doctorado / Prof. | 3  | Menos de 5 años     | 1  | Investigación o docencia | 2  | 6             |
| E4      | Supervisor                   | 3  | Más de 20 años      | 5  | Servicio a la minería    | 3  | 11            |
| E5      | Académico                    | 5  | Entre 10 y 20 años  | 4  | Investigación o docencia | 2  | 11            |
| E6      | Profesor                     | 5  | Más de 20 años      | 5  | Geotecnia y Estabilidad  | 5  | 15            |
| E7      | Operador de Jumbo            | 2  | Entre 10 y 20 años  | 4  | Fortificación y Soporte  | 5  | 11            |
| E8      | Ingeniero Geotécnico         | 5  | Más de 20 años      | 5  | Geotecnia y Estabilidad  | 5  | 15            |
| E9      | Dir. Corp. Innovación Geoc.  | 5  | Entre 10 y 20 años  | 4  | Geotecnia y Estabilidad  | 5  | 14            |
| E10     | Ingeniero Geomecánico        | 5  | Entre 5 y 10 años   | 2  | Geotecnia y Estabilidad  | 5  | 12            |
| E11     | Ingeniero Principal de Minas | 5  | Más de 20 años      | 5  | Geotecnia y Estabilidad  | 5  | 15            |

En el caso de los cargos académicos, se realiza una diferenciación según la jerarquía dentro de la carrera académica universitaria, dado que denominaciones como docente, profesor, profesor asistente y académico representan distintos niveles de responsabilidad, experiencia y trayectoria dentro de las instituciones de educación superior.

Los cargos de profesor, docente y académico se consideran niveles consolidados dentro de la actividad académica, por lo que se les asigna el puntaje máximo dentro de esta categoría. Por su parte, el cargo de profesor asistente corresponde a una etapa inicial dentro de la carrera académica, motivo por el cual se le asigna un puntaje ligeramente inferior.

En el caso del experto identificado como “Estudiante de doctorado / profesora”, el puntaje asignado considera que, si bien ejerce funciones docentes, se encuentra actualmente en proceso de

formación doctoral, por lo que aún no posee el grado académico de doctor ni la consolidación profesional asociada a cargos académicos de mayor jerarquía.

Finalmente, los cargos vinculados directamente con la industria minera y especialidades técnicas, tales como ingenieros geotécnicos, ingenieros geomecánicos o ingenieros principales de minas, reciben el puntaje máximo debido a su alto nivel de especialización y a su relación directa con la temática del estudio (ver Tabla C.2).

**Tabla C. 2: Criterios de asignación de puntaje según cargo profesional del panel de expertos.**

| <b>Cargo Profesional</b>                           | <b>Puntaje</b> | <b>Nivel profesional</b> | <b>Justificación del puntaje</b>                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Docente                                            | 5              | Académico consolidado    | Profesional con experiencia en docencia e investigación, con capacidad de análisis técnico y generación de conocimiento en el área.                             |
| Profesor                                           | 5              | Académico consolidado    | Cargo académico con trayectoria en enseñanza superior y participación en investigación o desarrollo profesional.                                                |
| Académico                                          | 5              | Académico consolidado    | Profesional dedicado a actividades de investigación, docencia y desarrollo científico en instituciones de educación superior.                                   |
| Profesor asistente                                 | 4              | Académico inicial        | Cargo correspondiente a una etapa inicial dentro de la carrera académica, con menor trayectoria respecto a profesores consolidados.                             |
| Estudiante de doctorado / profesora                | 3              | Académico en formación   | Profesional que se desempeña en docencia, pero que se encuentra actualmente en proceso de formación doctoral, por lo que aún no posee el grado académico final. |
| Supervisor                                         | 3              | Profesional operativo    | Profesional con experiencia en supervisión de operaciones mineras, con conocimiento práctico del proceso productivo.                                            |
| Operador de Jumbo                                  | 2              | Técnico especializado    | Personal operativo con conocimiento práctico del proceso de perforación y fortificación en minería subterránea.                                                 |
| Ingeniero Geotécnico                               | 5              | Especialista técnico     | Profesional altamente especializado en geotecnia aplicada a minería, con conocimientos directamente relacionados con la estabilidad del macizo rocoso.          |
| Ingeniero Geomecánico                              | 5              | Especialista técnico     | Especialista en comportamiento mecánico del macizo rocoso, con alta pertinencia respecto al tema de estudio.                                                    |
| Ingeniero principal de minas                       | 5              | Especialista senior      | Profesional con amplia experiencia en planificación y operación minera, con alta responsabilidad técnica.                                                       |
| Directora corporativa de innovación en geociencias | 5              | Especialista senior      | Cargo directivo con alto nivel de experiencia en innovación, investigación y desarrollo en geociencias aplicadas a minería.                                     |

## Anexo D: Niveles de incertidumbre mediante el cálculo de Entropía Difusa.

Tabla D. 1: Probabilidad relativa asociada a criterios C1, C2, C3.

| $P_{ij}$ | Criterio | Experto |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |
|----------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
|          |          | $E_1$   | $E_2$ | $E_3$ | $E_4$ | $E_5$ | $E_6$ | $E_7$ | $E_8$ | $E_9$ | $E_{10}$ | $E_{11}$ |
|          | $C_A$    | 0.11    | 0.09  | 0.06  | 0.06  | 0.11  | 0.11  | 0.11  | 0.04  | 0.11  | 0.11     | 0.11     |
|          | $C_B$    | 0.10    | 0.05  | 0.02  | 0.12  | 0.10  | 0.12  | 0.11  | 0.12  | 0.10  | 0.05     | 0.12     |
|          | $C_C$    | 0.05    | 0.05  | 0.05  | 0.07  | 0.05  | 0.12  | 0.11  | 0.12  | 0.12  | 0.12     | 0.12     |

Tabla D. 2: Logaritmos naturales ponderados de las probabilidades relativas.

| $P_{ij} \ln(P_{ij})$ |      |       |
|----------------------|------|-------|
| -0.2                 | -0.2 | -0.15 |
| -0.2                 | -0.1 | -0.15 |
| -0.2                 | -0.1 | -0.15 |
| -0.2                 | -0.3 | -0.19 |
| -0.2                 | -0.2 | -0.15 |
| -0.2                 | -0.3 | -0.26 |
| -0.1                 | -0.2 | -0.26 |
| -0.2                 | -0.3 | -0.26 |
| -0.2                 | -0.2 | -0.26 |
| -0.2                 | -0.1 | -0.26 |
| -0.2                 | -0.3 | -0.26 |
| -2.4                 | -2.3 | -2.3  |

Tabla D. 3: Entropía y Peso por cada criterio.

| Criterio de Evaluación | Entropía                                             | $(1 - E_j)$  | Peso         |
|------------------------|------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Criterio 1             | $E_j = -0.417 \sum_{i=1}^{10} -2.4 = \mathbf{0.986}$ | 0.014        | <b>0.179</b> |
| Criterio 2             | $E_j = -0.417 \sum_{i=1}^{10} -2.2 = \mathbf{0.967}$ | 0.033        | <b>0.412</b> |
| Criterio 3             | $E_j = -0.417 \sum_{i=1}^{10} -2.3 = \mathbf{0.968}$ | <b>0.033</b> | <b>0.409</b> |
| Total                  | -                                                    | <b>0.079</b> | <b>1</b>     |

## Anexo E: Normalización y estandarización de las matrices de decisión.

Tabla E. 1: Matriz normalizada (cálculo matemático aplicado a los puntajes de los expertos).

| Experto | $u_{ij}$ |    |    | $r_{ij}$ |      |      |
|---------|----------|----|----|----------|------|------|
| 1       | 25       | 16 | 4  | 0.34     | 0.30 | 0.15 |
| 2       | 16       | 4  | 4  | 0.27     | 0.15 | 0.15 |
| 3       | 9        | 1  | 4  | 0.21     | 0.08 | 0.15 |
| 4       | 9        | 25 | 9  | 0.21     | 0.38 | 0.23 |
| 5       | 25       | 16 | 4  | 0.34     | 0.30 | 0.15 |
| 6       | 25       | 25 | 25 | 0.34     | 0.38 | 0.38 |
| 7       | 4        | 16 | 25 | 0.14     | 0.30 | 0.38 |
| 8       | 25       | 25 | 25 | 0.34     | 0.38 | 0.38 |
| 9       | 25       | 16 | 25 | 0.34     | 0.30 | 0.38 |
| 10      | 25       | 4  | 25 | 0.34     | 0.15 | 0.38 |
| 11      | 25       | 25 | 25 | 0.34     | 0.38 | 0.38 |

Tabla E. 2: Matriz ponderada de pesos de criterios para cada experto.

| Experto | $v_{ij}$ |      |      |
|---------|----------|------|------|
| E1      | 0.06     | 0.13 | 0.06 |
| E2      | 0.05     | 0.06 | 0.06 |
| E3      | 0.04     | 0.03 | 0.06 |
| E4      | 0.04     | 0.16 | 0.09 |
| E5      | 0.06     | 0.13 | 0.06 |
| E6      | 0.06     | 0.16 | 0.15 |
| E7      | 0.02     | 0.13 | 0.15 |
| E8      | 0.06     | 0.16 | 0.15 |
| E9      | 0.06     | 0.13 | 0.15 |
| E10     | 0.06     | 0.06 | 0.15 |
| E11     | 0.06     | 0.16 | 0.15 |

## Anexo F: Determinación de soluciones ideales y distancias euclidianas.

Tabla F. 1: Valores máximos y mínimos de la matriz estandarizada para cada criterio.

| Tipo de Solución Ideal  | C1 (Cargo) | C2 (Experiencia) | C3 (Área) |
|-------------------------|------------|------------------|-----------|
| Solución Ideal Positiva | 0.06       | 0.16             | 0.15      |
| Solución Ideal Negativa | 0.02       | 0.03             | 0.06      |

**Tabla F. 2: Matriz de distancias euclidianas (distancia de cada experto hacia los vectores ideales).**

| <b>Experto</b> | <b>di+ (Distancia al Ideal +)</b> | <b>di- (Distancia al Ideal -)</b> |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>E1</b>      | 0.098                             | 0.101                             |
| <b>E2</b>      | 0.133                             | 0.040                             |
| <b>E3</b>      | 0.158                             | 0.012                             |
| <b>E4</b>      | 0.067                             | 0.129                             |
| <b>E5</b>      | 0.098                             | 0.101                             |
| <b>E6</b>      | 0.000                             | 0.160                             |
| <b>E7</b>      | 0.048                             | 0.132                             |
| <b>E8</b>      | 0.155                             | 0.160                             |
| <b>E9</b>      | 0.031                             | 0.137                             |
| <b>E10</b>     | 0.094                             | 0.105                             |
| <b>E11</b>     | 0.160                             | 0.228                             |

## **Anexo G: Cercanía relativa y asignación de pesos de influencia.**

**Tabla G. 1: Cercanía relativa (etapa final de ponderación del panel).**

| <b>Experto</b> | <b>Cercanía Relativa</b> | <b>Peso de Influencia</b> |
|----------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>E1</b>      | 0.5073                   | 0.079                     |
| <b>E2</b>      | 0.2308                   | 0.036                     |
| <b>E3</b>      | 0.0722                   | 0.011                     |
| <b>E4</b>      | 0.6605                   | 0.103                     |
| <b>E5</b>      | 0.5073                   | 0.079                     |
| <b>E6</b>      | 1.0000                   | 0.155                     |
| <b>E7</b>      | 0.7319                   | 0.114                     |
| <b>E8</b>      | 0.5086                   | 0.079                     |
| <b>E9</b>      | 0.8141                   | 0.127                     |
| <b>E10</b>     | 0.8141                   | 0.127                     |
| <b>E11</b>     | 0.5879                   | 0.091                     |
| <b>SUMA</b>    | <b>6.43</b>              | <b>1.00</b>               |

## Anexo H: Procesamiento de juicios expertos y defuzzificación.

Tabla H. 1: Escala Lingüística y Valores Difusos.

| Escala                     | Valor difuso |      |      |      |
|----------------------------|--------------|------|------|------|
|                            | a            | b    | c    | d    |
| Muy Frecuente (MF)         | 0.8          | 0.85 | 0.95 | 1    |
| Frecuente (F)              | 0.6          | 0.65 | 0.7  | 0.8  |
| Medianamente Frecuente (M) | 0.35         | 0.45 | 0.55 | 0.6  |
| Poco Frecuente (PF)        | 0.2          | 0.25 | 0.3  | 0.35 |
| Muy Poco Frecuente (MPF)   | 0            | 0.1  | 0.15 | 0.2  |

Tabla H. 2: Matriz de respuesta del panel de expertos para el FTA.

| Eventos Básicos | Número de Experto |     |    |     |     |    |     |    |    |     |     |
|-----------------|-------------------|-----|----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|
|                 | E1                | E2  | E3 | E4  | E5  | E6 | E7  | E8 | E9 | E10 | E11 |
| EB1             | MF                | MF  | MF | MF  | MF  | MF | MF  | MF | MF | F   | F   |
| EB2             | MF                | M   | F  | MPF | F   | MF | F   | MF | MF | MF  | F   |
| EB3             | M                 | MF  | PF | MF  | PF  | MF | MF  | MF | MF | F   | F   |
| EB4             | PF                | PF  | F  | MF  | M   | MF | MF  | MF | MF | PF  | PF  |
| EB5             | F                 | MF  | MF | MF  | MF  | MF | MF  | MF | MF | F   | MF  |
| EB6             | M                 | MF  | MF | MF  | F   | MF | F   | MF | MF | F   | MF  |
| EB7             | M                 | M   | MF | MF  | M   | PF | MF  | M  | M  | MF  | F   |
| EB8             | M                 | F   | MF | MF  | MF  | F  | F   | MF | MF | MF  | MF  |
| EB9             | PF                | F   | F  | MF  | F   | F  | PF  | MF | MF | F   | M   |
| EB10            | M                 | PF  | MF | MF  | MPF | F  | PF  | MF | MF | F   | PF  |
| EB11            | F                 | MPF | F  | MF  | M   | MF | PF  | MF | MF | M   | F   |
| EB12            | F                 | M   | MF | MF  | M   | MF | MPF | MF | MF | M   | PF  |
| EB13            | M                 | MF  | MF | MF  | MF  | MF | MPF | PF | MF | F   | M   |

**Tabla H. 3: Agregación y Cálculo del Centroide para el FTA.**

| <b>Agregación por pesos de expertos</b> |          |          |          |          | <b>Centroide (CFP)</b> |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| <b>Evento</b>                           | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b> | <b>d</b> |                        |
| <b>EB1</b>                              | 0.756    | 0.806    | 0.896    | 0.956    | 0.854                  |
| <b>EB2</b>                              | 0.643    | 0.700    | 0.780    | 0.845    | 0.742                  |
| <b>EB3</b>                              | 0.667    | 0.721    | 0.805    | 0.866    | 0.765                  |
| <b>EB4</b>                              | 0.563    | 0.617    | 0.699    | 0.750    | 0.657                  |
| <b>EB5</b>                              | 0.691    | 0.741    | 0.825    | 0.885    | 0.786                  |
| <b>EB6</b>                              | 0.698    | 0.752    | 0.836    | 0.902    | 0.798                  |
| <b>EB7</b>                              | 0.509    | 0.579    | 0.667    | 0.721    | 0.618                  |
| <b>EB8</b>                              | 0.640    | 0.698    | 0.779    | 0.844    | 0.741                  |
| <b>EB9</b>                              | 0.562    | 0.616    | 0.686    | 0.757    | 0.656                  |
| <b>EB10</b>                             | 0.500    | 0.558    | 0.628    | 0.692    | 0.595                  |
| <b>EB11</b>                             | 0.574    | 0.636    | 0.720    | 0.779    | 0.677                  |
| <b>EB12</b>                             | 0.530    | 0.598    | 0.683    | 0.737    | 0.637                  |
| <b>EB13</b>                             | 0.560    | 0.624    | 0.708    | 0.764    | 0.664                  |

## **Anexo I: Conversión a Probabilidades de Falla.**

**Tabla I. 1: Transformación de valores de posibilidad a probabilidad mediante el modelo de conversión de Onisawa.**

| <b>Evento</b> | <b>Centroide (CFP)</b> | <b>Función m (1/10m)</b> | <b>Probabilidad Final</b> |
|---------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>EB1</b>    | 0.854                  | 1.277                    | <b>0.053</b>              |
| <b>EB2</b>    | 0.742                  | 1.618                    | <b>0.024</b>              |
| <b>EB3</b>    | 0.765                  | 1.552                    | <b>0.028</b>              |
| <b>EB4</b>    | 0.657                  | 1.852                    | <b>0.014</b>              |
| <b>EB5</b>    | 0.786                  | 1.493                    | <b>0.032</b>              |
| <b>EB6</b>    | 0.798                  | 1.456                    | <b>0.035</b>              |
| <b>EB7</b>    | 0.618                  | 1.959                    | <b>0.011</b>              |
| <b>EB8</b>    | 0.741                  | 1.622                    | <b>0.024</b>              |
| <b>EB9</b>    | 0.656                  | 1.856                    | <b>0.014</b>              |
| <b>EB10</b>   | 0.595                  | 2.024                    | <b>0.009</b>              |
| <b>EB11</b>   | 0.677                  | 1.797                    | <b>0.016</b>              |
| <b>EB12</b>   | 0.637                  | 1.909                    | <b>0.012</b>              |
| <b>EB13</b>   | 0.664                  | 1.835                    | <b>0.015</b>              |

## Anexo J: Identificación y listado de los CMC para el sistema analizado.

Tabla J. 1: Composición y Probabilidades de los CMC (1-40).

| MCS ID | Evento 1 | Evento 2 | Evento 3 | Probabilidad Final  |
|--------|----------|----------|----------|---------------------|
| MCS1   | EB1      | EB5      | EB10     | 0.0000152640        |
| MCS2   | EB1      | EB5      | EB11     | 0.0000271360        |
| MCS3   | EB1      | EB5      | EB12     | 0.0000203520        |
| MCS4   | EB1      | EB5      | EB13     | 0.0000254400        |
| MCS5   | EB1      | EB6      | EB10     | 0.0000166950        |
| MCS6   | EB1      | EB6      | EB11     | <b>0.0000296800</b> |
| MCS7   | EB1      | EB6      | EB12     | 0.0000222600        |
| MCS8   | EB1      | EB6      | EB13     | 0.0000278250        |
| MCS9   | EB1      | EB7      | EB10     | 0.0000052470        |
| MCS10  | EB1      | EB7      | EB11     | 0.0000093280        |
| MCS11  | EB1      | EB7      | EB12     | 0.0000069960        |
| MCS12  | EB1      | EB7      | EB13     | 0.0000087450        |
| MCS13  | EB1      | EB8      | EB10     | 0.0000114480        |
| MCS14  | EB1      | EB8      | EB11     | 0.0000203520        |
| MCS15  | EB1      | EB8      | EB12     | 0.0000152640        |
| MCS16  | EB1      | EB8      | EB13     | 0.0000190800        |
| MCS17  | EB1      | EB9      | EB10     | 0.0000066780        |
| MCS18  | EB1      | EB9      | EB11     | 0.0000118720        |
| MCS19  | EB1      | EB9      | EB12     | 0.0000089040        |
| MCS20  | EB1      | EB9      | EB13     | 0.0000111300        |
| MCS21  | EB2      | EB5      | EB10     | 0.0000069120        |
| MCS22  | EB2      | EB5      | EB11     | 0.0000122880        |
| MCS23  | EB2      | EB5      | EB12     | 0.0000092160        |
| MCS24  | EB2      | EB5      | EB13     | 0.0000115200        |
| MCS25  | EB2      | EB6      | EB10     | 0.0000075600        |
| MCS26  | EB2      | EB6      | EB11     | 0.0000134400        |
| MCS27  | EB2      | EB6      | EB12     | 0.0000100800        |
| MCS28  | EB2      | EB6      | EB13     | 0.0000126000        |
| MCS29  | EB2      | EB7      | EB10     | 0.0000023760        |
| MCS30  | EB2      | EB7      | EB11     | 0.0000042240        |
| MCS31  | EB2      | EB7      | EB12     | 0.0000031680        |
| MCS32  | EB2      | EB7      | EB13     | 0.0000039600        |
| MCS33  | EB2      | EB8      | EB10     | 0.0000051840        |
| MCS34  | EB2      | EB8      | EB11     | 0.0000092160        |
| MCS35  | EB2      | EB8      | EB12     | 0.0000069120        |
| MCS36  | EB2      | EB8      | EB13     | 0.0000086400        |
| MCS37  | EB2      | EB9      | EB10     | 0.0000030240        |
| MCS38  | EB2      | EB9      | EB11     | 0.0000053760        |
| MCS39  | EB2      | EB9      | EB12     | 0.0000040320        |
| MCS40  | EB2      | EB9      | EB13     | 0.0000050400        |

**Tabla J. 2: Composición y Probabilidades de los CMC (41-80).**

| <b>MCS ID</b> | <b>Evento 1</b> | <b>Evento 2</b> | <b>Evento 3</b> | <b>Probabilidad Final</b> |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| <b>MCS41</b>  | EB3             | EB5             | EB10            | 0.0000080640              |
| <b>MCS42</b>  | EB3             | EB5             | EB11            | 0.0000143360              |
| <b>MCS43</b>  | EB3             | EB5             | EB12            | 0.0000107520              |
| <b>MCS44</b>  | EB3             | EB5             | EB13            | 0.0000134400              |
| <b>MCS45</b>  | EB3             | EB6             | EB10            | 0.0000088200              |
| <b>MCS46</b>  | EB3             | EB6             | EB11            | 0.0000156800              |
| <b>MCS47</b>  | EB3             | EB6             | EB12            | 0.0000117600              |
| <b>MCS48</b>  | EB3             | EB6             | EB13            | 0.0000147000              |
| <b>MCS49</b>  | EB3             | EB7             | EB10            | 0.0000027720              |
| <b>MCS50</b>  | EB3             | EB7             | EB11            | 0.0000049280              |
| <b>MCS51</b>  | EB3             | EB7             | EB12            | 0.0000036960              |
| <b>MCS52</b>  | EB3             | EB7             | EB13            | 0.0000046200              |
| <b>MCS53</b>  | EB3             | EB8             | EB10            | 0.0000060480              |
| <b>MCS54</b>  | EB3             | EB8             | EB11            | 0.0000107520              |
| <b>MCS55</b>  | EB3             | EB8             | EB12            | 0.0000080640              |
| <b>MCS56</b>  | EB3             | EB8             | EB13            | 0.0000100800              |
| <b>MCS57</b>  | EB3             | EB9             | EB10            | 0.0000035280              |
| <b>MCS58</b>  | EB3             | EB9             | EB11            | 0.0000062720              |
| <b>MCS59</b>  | EB3             | EB9             | EB12            | 0.0000047040              |
| <b>MCS60</b>  | EB3             | EB9             | EB13            | 0.0000058800              |
| <b>MCS61</b>  | EB4             | EB5             | EB10            | 0.0000040320              |
| <b>MCS62</b>  | EB4             | EB5             | EB11            | 0.0000071680              |
| <b>MCS63</b>  | EB4             | EB5             | EB12            | 0.0000053760              |
| <b>MCS64</b>  | EB4             | EB5             | EB13            | 0.0000067200              |
| <b>MCS65</b>  | EB4             | EB6             | EB10            | 0.0000044100              |
| <b>MCS66</b>  | EB4             | EB6             | EB11            | 0.0000078400              |
| <b>MCS67</b>  | EB4             | EB6             | EB12            | 0.0000058800              |
| <b>MCS68</b>  | EB4             | EB6             | EB13            | 0.0000073500              |
| <b>MCS69</b>  | EB4             | EB7             | EB10            | <b>0.0000013860</b>       |
| <b>MCS70</b>  | EB4             | EB7             | EB11            | 0.0000024640              |
| <b>MCS71</b>  | EB4             | EB7             | EB12            | 0.0000018480              |
| <b>MCS72</b>  | EB4             | EB7             | EB13            | 0.0000023100              |
| <b>MCS73</b>  | EB4             | EB8             | EB10            | 0.0000030240              |
| <b>MCS74</b>  | EB4             | EB8             | EB11            | 0.0000053760              |
| <b>MCS75</b>  | EB4             | EB8             | EB12            | 0.0000040320              |
| <b>MCS76</b>  | EB4             | EB8             | EB13            | 0.0000050400              |
| <b>MCS77</b>  | EB4             | EB9             | EB10            | 0.0000017640              |
| <b>MCS78</b>  | EB4             | EB9             | EB11            | 0.0000031360              |
| <b>MCS79</b>  | EB4             | EB9             | EB12            | 0.0000023520              |
| <b>MCS80</b>  | EB4             | EB9             | EB13            | 0.0000029400              |

## Anexo K: Valores de importancia estructural para cada evento básico en el FTA.

Tabla K. 1: Importancia estructural y rango de prioridad de los eventos básicos.

| Evento Básico $EB$                      | Importancia estructural $I^{st}(i)$ | Rango de importancia |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| $EB_1$ a $EB_4$ y $EB_{10}$ a $EB_{13}$ | 5                                   | 1                    |
| $EB_5$ a $EB_9$                         | 4                                   | 2                    |

## Anexo L: Análisis de Entropía Difusa para la ponderación de $A_n$ del FTA.

Tabla L. 1: Puntajes asignados a los Eventos intermedios (criterios de falla) para el FTA.

| Puntaje         | Criterios de Falla = Eventos Intermedios                                      |                                                                               |                                                                                  |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                 | $C_A$                                                                         | $C_B$                                                                         | $C_C$                                                                            |
| 5<br>(Muy Alto) | Capaz de generar daño estructural instantáneo y colapso de la labor.          | Fenómeno aleatorio. El monitoreo actual no permite conocer el momento exacto. | El evento depende 100% de la geometría, fallas locales o heterogeneidad puntual. |
| 4<br>(Alto)     | Alta liberación de energía; requiere soporte dinámico pesado.                 | Monitoreo complejo. La heterogeneidad del macizo oculta el peligro real.      | Gran dependencia de las condiciones geológicas locales no detectadas.            |
| 3 (Medio)       | Energía moderada; el daño suele ser controlado por la fortificación estándar. | Predictibilidad parcial. Existen instrumentos, pero con margen de error.      | Influencia compartida entre factores regionales y locales.                       |
| 2 (Bajo)        | Liberación de energía mínima o gradual (convergencia lenta).                  | Alta predictibilidad. El comportamiento es bien conocido mediante mapeo.      | El evento es independiente de la forma de la labor o geología local.             |
| 1<br>(Muy Bajo) | Sin capacidad de generar daño mecánico por sí solo.                           | Control total. Se conoce el comportamiento con precisión absoluta.            | No tiene relación con las condiciones del sitio.                                 |

Tabla L. 2: Matriz ponderada para eventos intermedios del FTA.

| $v_{ij}$ |      |      |
|----------|------|------|
| 0.33     | 0.20 | 0.11 |
| 0.25     | 0.20 | 0.14 |
| 0.17     | 0.12 | 0.18 |

**Tabla L.3: Valores normalizados para la determinación de las soluciones ideal y anti-ideal por criterio para los eventos intermedios del FTA.**

|         |             |             |             |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| $v_i +$ | <b>0.33</b> | <b>0.20</b> | <b>0.18</b> |
| $v_i -$ | <b>0.17</b> | <b>0.12</b> | <b>0.11</b> |

**Tabla L.4: Cálculo de distancias euclidianas para criterios del FTA.**

| <b>Criterio o Evento Intermedio</b> | <b><math>d_i^+</math></b> | <b><math>d_i^-</math></b> |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $C_A$                               | 0.071                     | 0.184                     |
| $C_B$                               | 0.091                     | 0.120                     |
| $C_C$                               | 0.184                     | 0.071                     |

**Tabla L. 3: Entropía y Peso de criterios (eventos intermedios) para el FTA.**

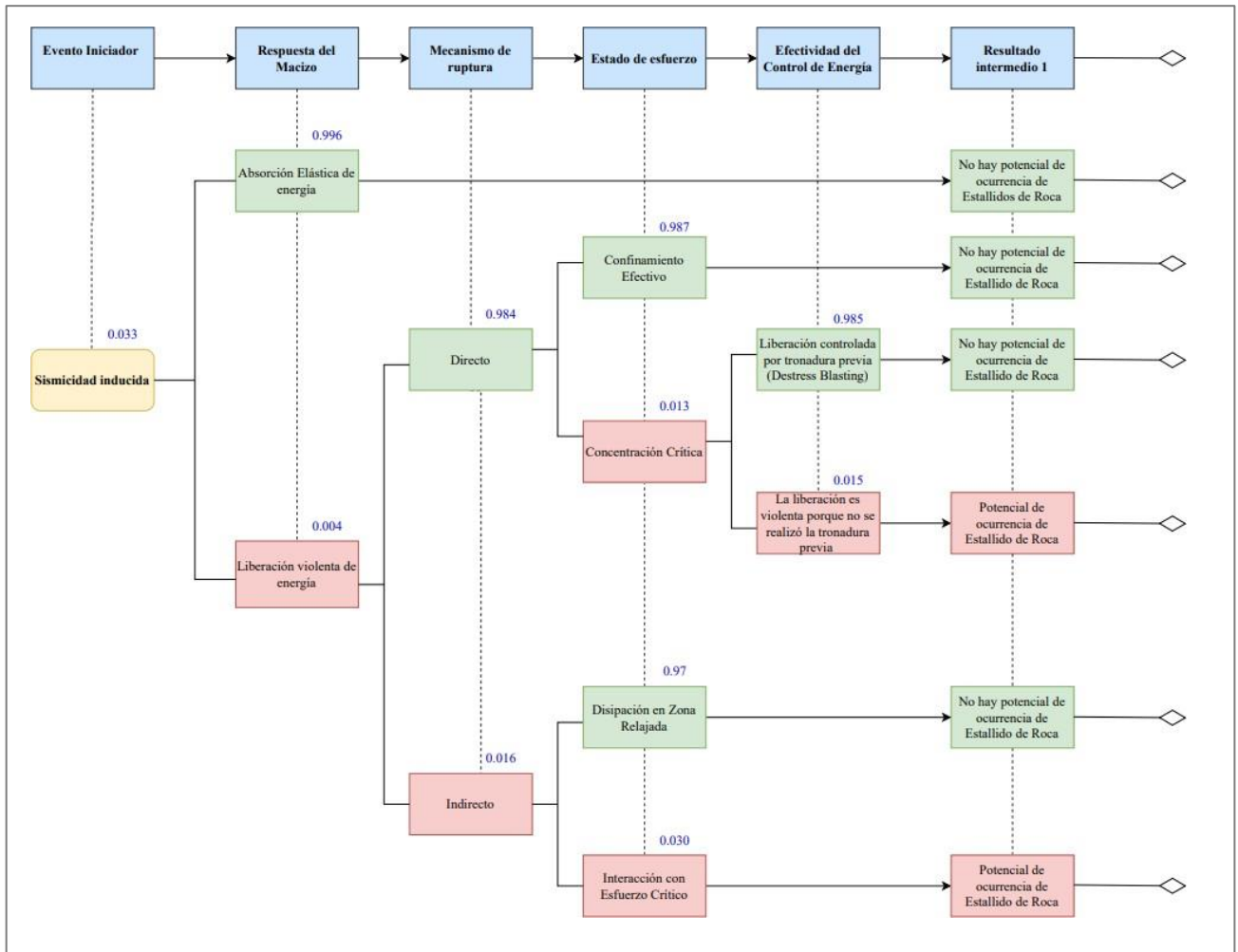
|           |                 |       |       |
|-----------|-----------------|-------|-------|
| $e_j$     | 0.966           | 0.977 | 0.981 |
| $1 - e_j$ | 0.034           | 0.023 | 0.019 |
| $w_j$     | 0.449           | 0.300 | 0.251 |
| $k$       | <b>-0.91024</b> |       |       |

## **Anexo M: Cuantificación de la probabilidad de los eventos intermedios.**

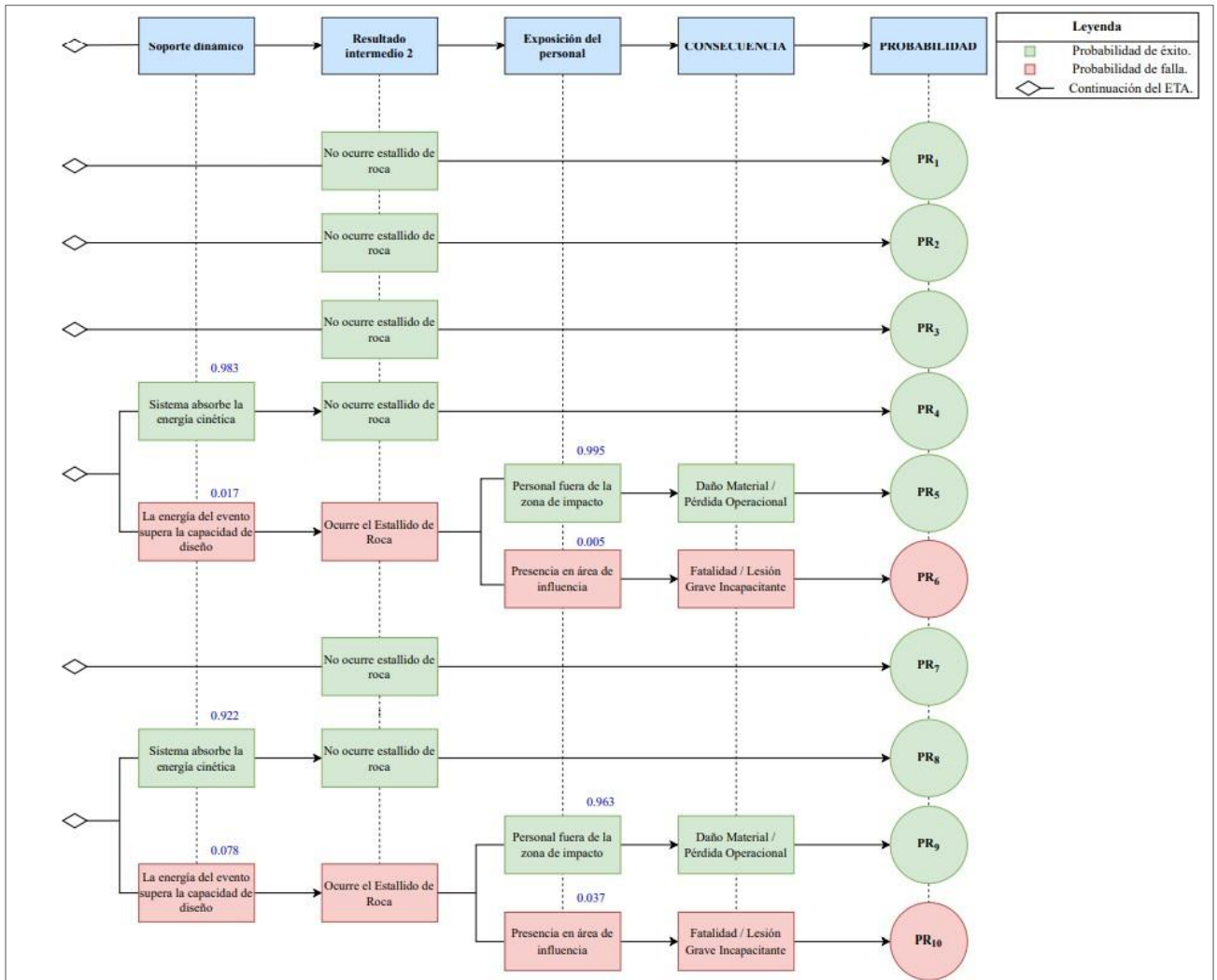
| <b>Evento Intermedio</b> | <b>Probabilidad</b> | <b>Peso Criterio de Falla</b> | <b>Probabilidad Evento Intermedio</b> |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| $A_1$                    | 0.114               | 0.450                         | 0.051                                 |
| $A_2$                    | 0.111               | 0.300                         | 0.033                                 |
| $A_3$                    | 0.051               | 0.251                         | 0.013                                 |

## Anexo N: Estructura completa del ETA y determinación de trayectorias de riesgo.

Tabla N. 1: Estructura del ETA– Parte I: Desde el evento sísmico hasta la determinación del potencial de estallido.



**Tabla N. 2: Estructura del ETA – Parte II: Evaluación de barreras de seguridad y trayectorias de riesgo final.**



## Anexo Ñ: Encuesta cualitativa para la cuantificación de barreras de seguridad.

**Tabla Ñ. 1: Percepción técnica sobre la secuencia de eventos tras la sismicidad inducida.**

| Término Lingüístico    | Abreviatura | Definición Técnica Sugerida                                     |
|------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| Muy Frecuente          | MF          | El evento ocurre en casi todos los escenarios similares.        |
| Frecuente              | F           | El evento tiene una alta probabilidad de manifestarse.          |
| Medianamente Frecuente | M           | El evento ocurre de forma ocasional (50/50).                    |
| Poco Frecuente         | PF          | El evento es inusual pero posible bajo condiciones específicas. |
| Muy Poco Frecuente     | MPF         | El evento es extremadamente raro o casi imposible.              |

**Pregunta 1:** ¿Qué tan frecuente es que, ante un evento de sismicidad inducida, el macizo rocoso presente una **liberación violenta de energía** en lugar de una absorción elástica?

**Pregunta 2:** ¿Bajo las condiciones geomecánicas actuales, qué tan frecuente es que el mecanismo de ruptura sea de tipo **indirecto/estructural** en comparación con un mecanismo directo?

**Pregunta 3:** ¿Qué tan frecuente es encontrar una **concentración crítica de esfuerzos** en los frentes de avance actuales?

**Pregunta 4:** ¿Qué tan frecuente es la **interacción con esfuerzo crítico** debido a la profundidad de la mina?

**Pregunta 5:** ¿Qué tan frecuente es que ocurra una **liberación violenta** debido a que la tronadura de alivio no fue realizada o resultó ineficaz para controlar la energía?

**Pregunta 6:** Bajo un escenario de **ruptura directa**, ¿qué tan frecuente es que la liberación súbita de energía supere la capacidad de diseño del soporte dinámico?

**Pregunta 7:** En el caso de una **ruptura indirecta o estructural**, donde suelen movilizarse bloques de mayor volumen, ¿qué tan frecuente es que el sistema de soporte dinámico falle?

**Pregunta 8:** En caso de ocurrir un estallido de roca originado por un mecanismo de **ruptura directa**, ¿qué tan frecuente es que exista **presencia de personal** en el área específica de influencia?

**Pregunta 9:** Si el estallido se produce por un mecanismo de **ruptura indirecta/estructural**, el cual suele afectar sectores más amplios, ¿qué tan frecuente es la **exposición del personal** en comparación con el escenario anterior.

**Tabla N. 2: Matriz de respuesta del panel de expertos para el ETA.**

| Eventos Básicos | Número de Experto |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
|-----------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
|                 | E1                | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 | E10 | E11 |
| EB1             | M                 | PF | M  | F  | M  | PF | M  | F  | M  | M   | M   |
| EB2             | F                 | F  | MF | F  | M  | F  | F  | F  | MF | M   | F   |
| EB3             | MF                | F  | F  | MF | F  | MF | F  | MF | F  | F   | F   |
| EB4             | M                 | M  | M  | F  | M  | F  | F  | F  | F  | F   | F   |
| EB5             | F                 | F  | F  | F  | F  | M  | F  | M  | MF | F   | F   |
| EB6             | F                 | F  | F  | F  | F  | F  | F  | F  | F  | F   | F   |
| EB7             | MF                | MF | MF | MF | MF | MF | MF | MF | MF | MF  | MF  |
| EB8             | M                 | PF | M  | M  | F  | M  | PF | M  | M  | F   | M   |
| EB9             | F                 | MF | MF | MF | F  | F  | MF | F  | MF | F   | MF  |

## Anexo O: Procesamiento de juicios expertos y defuzzificación del ETA.

Tabla O. 1: Agregación y Cálculo del Centroide para el ETA.

| Agregación por pesos de expertos |       |       |       |       | Centroide (CFP) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Evento                           | a     | b     | c     | d     |                 |
| EB1                              | 0.367 | 0.448 | 0.529 | 0.589 | 0.482           |
| EB2                              | 0.576 | 0.636 | 0.704 | 0.786 | 0.677           |
| EB3                              | 0.683 | 0.733 | 0.804 | 0.883 | 0.777           |
| EB4                              | 0.549 | 0.609 | 0.669 | 0.759 | 0.648           |
| EB5                              | 0.490 | 0.562 | 0.634 | 0.712 | 0.600           |
| EB6                              | 0.600 | 0.650 | 0.700 | 0.800 | 0.690           |
| EB7                              | 0.800 | 0.850 | 0.950 | 1.000 | 0.900           |
| EB8                              | 0.379 | 0.461 | 0.543 | 0.604 | 0.496           |
| EB9                              | 0.712 | 0.762 | 0.840 | 0.912 | 0.807           |

## Anexo P: Conversión a Probabilidades de Falla del ETA.

Tabla P. 1: Transformación de valores de posibilidad a probabilidad mediante el modelo de conversión de Onisawa (ETA).

| Evento | Centroide (CFP) | Función m (1/10m) | Probabilidad Final |
|--------|-----------------|-------------------|--------------------|
| EB1    | 0.482           | 2.356             | 0.004              |
| EB2    | 0.677           | 1.799             | 0.016              |
| EB3    | 0.777           | 1.518             | 0.030              |
| EB4    | 0.648           | 1.878             | 0.013              |
| EB5    | 0.600           | 2.011             | 0.010              |
| EB6    | 0.690           | 1.762             | 0.017              |
| EB7    | 0.900           | 1.106             | 0.078              |
| EB8    | 0.496           | 2.314             | 0.005              |
| EB9    | 0.807           | 1.427             | 0.037              |

## Anexo Q: Cuantificación probabilística de las ramas del ETA.

Tabla Q.1: Probabilidades finales de ocurrencia para las secuencias de eventos (ramas) del ETA.

| Rama | Probabilidad Final | Descripción del Escenario                        |
|------|--------------------|--------------------------------------------------|
| 1    | $3.29^{-2}$        | No ocurre estallido (Absorción elástica)         |
| 2    | $1.28^{-4}$        | No ocurre estallido (Confinamiento efectivo)     |
| 3    | $1.66^{-6}$        | No ocurre estallido (Zona relajada)              |
| 4    | $2.49^{-8}$        | No ocurre estallido (Control de energía exitoso) |
| 5    | $4.09^{-11}$       | Daño Material (Ruta Directa)                     |
| 6    | $2.15^{-12}$       | <b>Fatalidad (Ruta Directa)</b>                  |
| 7    | $2.05^{-6}$        | No ocurre estallido (Disipación secundaria)      |
| 8    | $5.84^{-8}$        | Potencial de estallido mitigado por soporte      |
| 9    | $4.76^{-9}$        | Daño Material (Interacción crítica)              |
| 10   | $1.83^{-10}$       | <b>Fatalidad (Interacción crítica)</b>           |
| Suma | $3.30^{-2}$        |                                                  |

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
Hoja Resumen Memoria de Título

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |               |                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título:</b> Evaluación del riesgo potencial de estallidos de roca en minería subterránea mediante la integración de Análisis de árbol de fallas (FTA), Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y el algoritmo Fu-ETO.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |               |                                                                                                                  |
| <b>Nombre Memorista:</b> Constanza Javiera Romero Castillo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |               |                                                                                                                  |
| <b>Modalidad</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | INVESTIGACIÓN | <b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>                                                                            |
| <b>Concepto</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | EXCELENTE     | <br><b>Profª. Asieh Hekmat</b> |
| <b>Calificación</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 7.0           |                                                                                                                  |
| <b>Fecha</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 27.03.2026    |                                                                                                                  |
| <br><b>Prof. Ramón Díaz N.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |               | <b>Ingeniero Supervisor:</b>                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |               | <b>Institución:</b> Universidad de Concepción                                                                    |
| <b>Comisión (Nombre y Firma)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |               |                                                                                                                  |
| <br><b>Prof. Roberto Gómez E.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |                                                                                                                  |
| <b>Resumen</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |               |                                                                                                                  |
| <p>El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el riesgo potencial de estallidos de roca en minería subterránea profunda mediante la integración de herramientas de análisis probabilístico y técnicas de manejo de incertidumbre. Para ello, se emplea el Análisis de Árbol de Fallas (FTA) para identificar las causas del fenómeno, y el Análisis de Árbol de Eventos (ETA) para modelar sus posibles consecuencias.</p> <p>Dado que los estallidos de roca corresponden a eventos de baja frecuencia y alta severidad, se incorpora el juicio experto como fuente principal de información, el cual es procesado mediante lógica difusa. En este contexto, se implementa el algoritmo híbrido Fu-ETO, que integra entropía difusa, el método TOPSIS y el modelo de Onisawa, permitiendo transformar variables cualitativas en probabilidades cuantificables.</p> <p>Los resultados obtenidos evidencian que el riesgo se concentra en un número reducido de trayectorias causales dominantes, identificadas mediante los conjuntos mínimos de corte del FTA. Asimismo, el análisis del ETA demuestra que, si bien la probabilidad de ocurrencia del estallido es baja, sus consecuencias pueden ser severas, especialmente en escenarios de alta exposición del personal.</p> <p>Finalmente, se concluye que la fortificación y las medidas de control actúan como barreras de mitigación, reduciendo significativamente la probabilidad del evento, pero no eliminando completamente el riesgo. El</p> |               |                                                                                                                  |

modelo propuesto constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones en seguridad minera bajo condiciones de alta incertidumbre.