

Bow-Tie methodology and Bayesian networks in safety management to reduce rockfall accidents at a mining operation in southern Peru

Hector Llacuachaqui-Porras¹; Oliver Romero-Cueva²; Aramburu Rojas-Vidal³; Carlos Raymundo⁴

^{1,2,3,4}Peruvian University of Applied Sciences, Peru, U20181E913@upc.edu.pe, u201621542@upc.edu.pe, pcgmvara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract—Rockfalls are the leading cause of fatal accidents in Peru’s underground mining (27% of 494 fatalities, 2000–2019). This paper presents a safety-management framework that couples Bow-Tie analysis with Bayesian networks to prevent rockfall events in a southern Peruvian underground mine (Julcani). The approach integrates geomechanical characterization (RMR, Q, GSI), process mapping and IPERC-based hazard identification to define causes, top events, consequences, and critical controls. The Bow-Tie structure is converted into a Bayesian network to quantify prior likelihoods, update them with operational evidence (inspections, timeliness of support installation, ground-movement monitoring), and rank barriers by expected risk reduction. Validation contrasted initial and residual risk for high-exposure tasks (scaling, ground support, drift development). The framework reduced risk ratings from High to ALARP in the most critical tasks, improved compliance with critical controls, and established a repeatable monitoring and continuous-improvement cycle. Findings indicate that combining a transparent causal model with probabilistic updating strengthens decision-making under uncertainty and can be replicated in comparable underground operations.

Keywords-- Rockfall; Bowtie; Underground Mining.

Metodología Bow Tie y redes bayesianas en gestión de seguridad para reducir accidentes por rocas en minera del sur peruano

Hector Llacuachaqui-Porras¹; Oliver Romero-Cueva²; Aramburu Rojas-Vidal³; Carlos Raymundo⁴

^{1,2,3,4}Peruvian University of Applied Sciences, Peru, U20181E913@upc.edu.pe, u201621542@upc.edu.pe, pcgmvara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Resumen—Los desprendimientos de rocas son la principal causa de accidentes mortales en la minería subterránea del Perú (27% de 494 fallecimientos entre 2000–2019). Este artículo presenta un marco de gestión de seguridad que integra el análisis Bow-Tie con redes bayesianas para prevenir eventos de caída de rocas en una mina subterránea del sur del Perú (Julcani). El enfoque combina la caracterización geomecánica (RMR, Q, GSI), el mapeo de procesos y la identificación de peligros basada en IPERC para definir causas, evento top, consecuencias y controles críticos. La estructura Bow-Tie se transforma en una red bayesiana que cuantifica probabilidades previas, las actualiza con evidencia operacional (inspecciones, oportunidad del sostenimiento, monitoreo de movimientos del macizo) y prioriza barreras por su reducción esperada del riesgo. La validación comparó el riesgo inicial y el residual en tareas de alta exposición (desatado, sostenimiento, avance de galerías). El modelo redujo calificaciones de riesgo de Alto a ALARP en las tareas más críticas, elevó el cumplimiento de controles y estableció un ciclo repetible de seguimiento y mejora continua. Los resultados muestran que la combinación de un modelo causal transparente con actualización probabilística fortalece la toma de decisiones bajo incertidumbre y es replicable en operaciones subterráneas similares.

Palabras clave-- Desprendimiento de rocas; Bow tie; Minería Subterránea.

I. INTRODUCCIÓN

Antes de iniciar con las operaciones mineras, es esencial realizar una evaluación detallada de los riesgos geológicos, tales como las caídas de rocas y otros [1]. Este proceso implica la identificación de zonas susceptibles a problemas como inestabilidades de laderas y fallas geológicas. Para ello, se utilizan estudios geológicos y geotécnicos del macizo rocoso, a través de recursos esenciales como Geocatmin y la Carta Geológica Nacional para la inspección de mapas y diagramas que muestren las características geológicas, con el objetivo de categorizar la calidad del macizo rocoso y recoger datos [2]. Por otro lado, si existen incidentes por caída de rocas, se lleva a cabo un análisis de las causas y se implementan medidas correctivas, como la estabilización de terrenos y la instalación de sistemas de monitoreo mejorados [3]. Estos esfuerzos son fundamentales ya que los desprendimientos de rocas tienen un impacto profundo en el ciclo de la minería, afectando directamente la seguridad, la productividad y la gestión de costos [4].

Puesto que, los desprendimientos de rocas en labores mineras subterráneas representan un riesgo crítico que ha ocasionado múltiples accidentes y pérdidas humanas, destacando la necesidad urgente de mejorar los sistemas de gestión de seguridad en estas operaciones. Ya que; la falta de un control adecuado de voladuras y sostenimiento incrementa significativamente los costos y riesgos operacionales. Asimismo, la metodología Bow Tie, combinada con reglas difusas, se presenta como una solución eficaz para gestionar estos riesgos por desprendimientos de rocas, ofreciendo una estructura clara para identificar, prevenir y mitigar las causas y consecuencias de la caída de rocas [5]. Investigaciones previas han demostrado la efectividad de este enfoque en diversas industrias, proporcionando una justificación sólida para su aplicación en la minería subterránea, con el objetivo de cumplir con los reglamentos nacionales y optimizar la seguridad operativa [6]. La implementación de esta metodología en la unidad minera Julcani busca no solo prevenir accidentes, sino también reducir costos operacionales y mejorar la seguridad laboral, asegurando un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

Globalmente, los accidentes mineros son frecuentes, y Perú no es una excepción. Los datos muestran que entre 2000 y 2019, se registraron 494 accidentes mortales en la minería peruana, con un 27% debido a desprendimientos de rocas [7], un problema particularmente severo en la minería subterránea. Esta situación subraya la crítica necesidad de abordar efectivamente estos riesgos para priorizar la seguridad y la vida de los trabajadores mediante la adopción de medidas preventivas y correctivas sólidas. Además, muchos de estos incidentes se atribuyen a la falta de cumplimiento de normativas mineras, lo que requiere una revisión y reforzamiento de las prácticas y regulaciones existentes [1].

La minería subterránea enfrenta múltiples desafíos relacionados con la seguridad, siendo los desprendimientos de rocas uno de los riesgos más críticos [7]. Estos eventos pueden causar accidentes graves, incluyendo lesiones incapacitantes y mortalidad, afectando significativamente la operación y el bienestar de los trabajadores. En este contexto, la Unidad Minera Julcani, ubicada en el sur del Perú, ha identificado la necesidad de implementar estrategias efectivas para mitigar estos riesgos. Estudios previos han demostrado que las condiciones geomecánicas y la calidad del macizo rocoso son

determinantes clave en la ocurrencia de desprendimientos. La metodología bow-tie mediante las redes bayesianas, emerge como una herramienta robusta para gestionar y controlar estos peligros, proporcionando un marco sistemático para identificar causas, consecuencias y medidas preventivas y correctivas [8].

El objetivo de este artículo es desarrollar e implementar un sistema de gestión de seguridad que utilice la metodología Bow-Tie basada en reglas difusas para prevenir accidentes por desprendimientos de rocas en una unidad minera al sur del Perú. La propuesta se centra en identificar y evaluar los riesgos asociados, diseñar controles preventivos y mitigantes, y establecer un sistema de monitoreo y mejora continua. La metodología Bow-Tie permite visualizar de manera clara las relaciones causales entre los riesgos y las medidas de control, mientras que las reglas difusas proporcionan un enfoque flexible y adaptable para manejar la incertidumbre y variabilidad inherentes en las operaciones mineras [9]. Esta combinación busca mejorar significativamente la seguridad en la unidad minera, minimizando la incidencia de accidentes y asegurando un entorno de trabajo más seguro para los operarios [10]. A continuación, se desarrolla el estado de arte, descripción del aporte y conclusiones.

II. ESTADO DE ARTE

Las compañías mineras asignan recursos crecientes para supervisar la estabilidad geotécnica, reconociendo el riesgo significativo de desprendimientos de rocas subterráneas. La implementación de técnicas de gestión, como el método Bow Tie, es crucial para abordar y controlar riesgos críticos, evitando accidentes fatales [11]. La referencia [12], destaca al fusionar el análisis de árbol de eventos y la teoría de conjuntos difusos para anticipar y evaluar el riesgo de asentamiento en la excavación de túneles. Su innovadora metodología permite diseñar medidas de seguridad proporcionales, reduciendo la probabilidad de incidentes. Según el análisis BT-BN, la implementación efectiva de medidas de seguridad en puntos críticos puede reducir la probabilidad de asentamientos excesivos en un 66%. Por otro lado [13], también contribuye con un enfoque de análisis de riesgos mediante el método de bow-tie, combinando modelos de causa y consecuencia para identificar y evaluar medidas de riesgos específicos, proponiendo medidas preventivas como el monitoreo del terreno y el uso adecuado de sistemas de sostenimiento.

Asimismo, se destaca que la sección central de las minas de carbón representa el 58.3% de los desprendimientos de rocas, focalizando los esfuerzos de mitigación en áreas críticas. Su clasificación basada en la resistencia del soporte hidráulico permite adaptar medidas de seguridad según la sección de la mina, identificando áreas de mayor riesgo [14]. Además, [15] se centran en evaluar cambios en la secuencia minera, revelando que un aumento en la carga sobre los pilares puede disminuir el factor de seguridad en un 25%, subrayando la importancia de considerar condiciones geotécnicas en la planificación. Por lo cual, [5] proponen un enfoque integral

para entender los defectos geotécnicos, mecanismos de falla y efectos de cargas, siendo valioso para estrategias de estabilización. [3] presentan un enfoque de optimización de parámetros para mallas de protección, mejorando la eficiencia y efectividad. En conjunto, estos estudios resaltan la necesidad de comprender condiciones geotécnicas y ofrecer enfoques variados para mitigar riesgos por caída de rocas, desde clasificación de eventos hasta optimización de medidas de protección.

En la referencia [9] emplearon la metodología Bow-Tie en la evaluación de riesgos, destacando la importancia de la participación de operadores en la identificación de peligros. [16] presentaron un modelo compuesto que integra el coeficiente de variación, análisis relacional gris y el modelo de Bow-Tie, evidenciando la necesidad de enfoques diversos para una evaluación de riesgos completa. [10] se centra en el análisis de conjuntos difusos, proponiendo un cambio en la función de pertenencias triangulares, esencial en la lógica difusa para modelar la incertidumbre en problemas con límites no definidos claramente.

De igual manera [1], emplearon la metodología Bow-Tie, utilizando técnicas de minería de texto y un modelo de corbatín de moño borroso, subrayando la importancia de la tecnología y el análisis de texto en la identificación de riesgos y mejora de soluciones. [16] aplicaron un enfoque basado en conjuntos difusos y sistema de inferencia basado en reglas con Bow-Tie para abordar la incertidumbre en la evaluación de riesgos. Por otra parte, [17] utilizaron Bow-Tie, destacando la necesidad de medir la efectividad y confiabilidad de barreras preventivas, considerando parámetros adicionales como costos, robustez y tiempo de respuesta. En síntesis, estos estudios aplican la metodología Bow-Tie de diversas formas para enfrentar la evaluación de riesgos en contextos variados. Todos resaltan la relevancia de visualizar y comprender la interrelación entre amenazas, consecuencias y estrategias de mitigación, contribuyendo así a mejorar la gestión de riesgos y la seguridad en sus respectivos ámbitos de investigación.

La investigación de [8] destaca el método Bow-tie como una herramienta integral de evaluación de riesgos. Este método emplea una representación visual y estructural de todos los posibles escenarios, desde las causas hasta las consecuencias de la activación del peligro. Además, el diagrama Bow-Tie, es utilizado como una herramienta estructurada para representar de manera completa los escenarios de riesgo alrededor de un evento inicial central [18]. La metodología incluye la evaluación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de las probabilidades de ocurrencia del evento central y sus consecuencias, así como el uso de indicadores para evaluar las causas y consecuencias asociadas.

Del mismo modo [19], proponen integrar el modelo de análisis y optimización de Bow-tie en la gestión de riesgos de proyectos, destacando su utilidad para identificar y abordar riesgos de manera proactiva. El análisis de corbatín proporciona una representación visual de las causas y consecuencias de eventos de riesgo, permitiendo a los gerentes

comprender el impacto potencial y desarrollar estrategias preventivas. El estudio de caso presentado demuestra la aplicabilidad del método, resaltando los beneficios de un enfoque sistemático y basado en datos. Las lecciones extraídas ofrecen una guía valiosa para que los gerentes de proyectos identifiquen, prioricen y respondan efectivamente a los riesgos.

Igualmente [4], buscan aprovechar el conocimiento de expertos en el análisis de peligros y riesgos en industrias mediante la metodología Bow-tie. Su enfoque incorpora la teoría de conjuntos borrosos para abordar la vaguedad y la imprecisión asociadas con la subjetividad en el análisis de juicio de expertos. Presentan una revisión exhaustiva de la aplicación de la teoría de conjuntos borrosos y el método Fuzzy en el modelo Bow-tie en ingeniería de seguridad y confiabilidad.

La referencia [20] propone un método híbrido que combina el análisis de la red bayesiana de Bow Tie (BT-BN) con la teoría difusa para apoyar el análisis predictivo del riesgo de asentamiento durante la excavación de túneles. Este enfoque permite identificar y evaluar de manera más efectiva las posibles causas y consecuencias de un accidente, logrando reducir la probabilidad de ocurrencias de asentamientos excesivos en un 66% al implementar medidas de seguridad efectivas en los nodos clave.

La referencia [5] propone una metodología novedosa que combina la red bayesiana difusa con el método Fuzzy-BWM para realizar un análisis dinámico de seguridad de los sistemas de proceso, integrando el análisis de factores humanos y organizacionales (HOFS) y utilizando el análisis de factores de riesgos críticos (Fuzzy-BWM) para mejorar la precisión del análisis de seguridad.

La referencia [14] presentan un análisis de riesgo de proyectos de túneles utilizando la metodología Bow-Tie para identificar, evaluar y reducir los riesgos asociados con la construcción de túneles TBM en condiciones de terreno difíciles, proponiendo un método de gestión de riesgos que integra el análisis de árbol de fallas (FTA) y el análisis de árbol de eventos (ETA).

III. APORTE

La propuesta de investigación se enfoca en desarrollar un nuevo modelo para analizar las causas de los accidentes por desprendimiento de rocas en trabajos subterráneos, proponiendo la creación de un plan de prevención de riesgos mediante la metodología Bow-tie. El objetivo es establecer un marco normativo que reduzca incidentes en la exploración y explotación de minas subterráneas mecanizadas, promoviendo la sostenibilidad.

El aporte consiste en una metodología integrada que utiliza el análisis Bow Tie mediante las redes bayesianas para identificar, evaluar y gestionar los riesgos de desprendimientos de rocas en operaciones mineras subterráneas. Esta combinación permite una evaluación más

precisa y una implementación efectiva de medidas preventivas y mitigantes, mejorando significativamente la seguridad operativa y reduciendo la incidencia de accidentes. Cuya innovación radica en la integración de dos metodologías avanzadas (Bow Tie y Redes Bayesinas) para la gestión de riesgos en un entorno complejo y variable como es la minería subterránea. Las ventajas incluyen una mejor visualización de las relaciones causales entre riesgos y medidas de control, una mayor flexibilidad para manejar la incertidumbre, y una mejora continua en la seguridad operativa y la eficiencia.

A. Condiciones geológicas del laboreo minero con los peligros potenciales por desprendimiento de rocas

De acuerdo con las condiciones geológicas del área de estudio, se tiene como resultado los estudios geomecánicos. Para la clasificación del macizo rocoso, se utilizará el Rock Mass Rating (RMR), que incluye la evaluación de la resistencia de la roca intacta, el RQD (Rock Quality Designation), el espaciado y el estado de las discontinuidades, así como el flujo de agua en las juntas. Se emplearán tablas específicas para estos parámetros, lo que permitirá categorizar la calidad del macizo rocoso en clases de excelente a muy mala calidad. Esta clasificación facilitará la identificación de zonas de riesgo y la planificación de medidas preventivas, permitiendo una evaluación precisa y la implementación de estrategias de sostenimiento para mejorar la seguridad en las operaciones mineras subterráneas ver tabla.

TABLA I
COMPONENTES EVALUADOS EN LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA R.M.R. DE MACIZOS ROCOSOS

| Reevaluación R.M.R. | | Check |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 1.- Resistencia de la roca intacta | | - |
| 2.- RQD | | - |
| 3.- Espaciado de las discontinuidades | | - |
| | a. Longitud de las discontinuidades | - |
| 4.- Estado de las discontinuidades | b. Abertura | - |
| | c. Rugosidad | - |
| | d. Relleno | - |
| | e. Alteración | - |
| 5. Flujo de agua en las juntas | | - |

Nota: Es importante completar la evaluación de todos los componentes para obtener una clasificación.

Para evaluar la estabilidad de los macizos rocosos en la Unidad Accilla Julcani, se planificará la recopilación de datos detallados sobre la calidad de la roca y su estabilidad mediante el uso de metodologías estructuradas, como la clasificación RMR y el Índice Q. Estas herramientas permitirán identificar áreas de baja calidad que requieren medidas preventivas específicas. Además, se definirá el tiempo de autosoporte, es decir, la duración máxima durante la cual una excavación puede permanecer abierta sin riesgo de colapso, utilizando estudios previos de Bieniawski (Ver figura 1). La relación entre el tamaño de la abertura y el RMR indicará que el tiempo de autosoporte disminuye con mayores aberturas y mejora con rocas de mejor calidad,

proporcionando un marco para la gestión de riesgos y la implementación de medidas de sostenimiento en las zonas críticas.

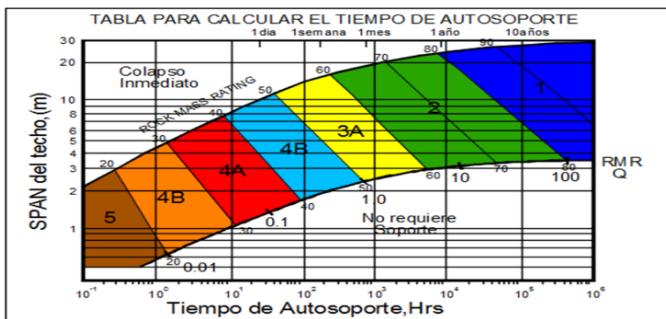


Fig. 1 Proceso de aplicación de la técnica.

Nota: Es importante completar la evaluación de todos los componentes para obtener una clasificación.

Una vez identificadas las zonas con macizos rocosos deficientes y riesgo de caída de rocas, se elaborarán mapas de riesgos para su visualización geográfica. Estas áreas se representarán espacialmente en los mapas, facilitando la identificación de las zonas más vulnerables. Esto permitirá a los responsables de la mina implementar medidas preventivas más eficaces y específicas, mejorando la seguridad y operatividad de la mina.

B. Determinar las áreas críticas de la ocurrencia de acciones por desprendimientos de rocas

Se identificarán las zonas con macizos rocosos deficientes y riesgo de caída de rocas mediante mapas de riesgos, utilizando colores, símbolos y leyendas claras.

TABLA II
DIAGRAMA DE PROCESOS POR ACTIVIDADES Y TAREAS

| DIAGRAMA DE PROCESOS POR ACTIVIDADES Y TAREAS | | | BUENAVENTURA | |
|---|-----------|--------|-------------------|-------------------|
| Dueño del Proceso: | | | Tipo de Proceso | Operativo |
| Fecha de elaboración: | | | Proceso | Mina |
| PROCESO/SUB PROCESO | ACTIVIDAD | TAREAS | Puesto de Trabajo | Rutinario (SÍ/NO) |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Nota: Es importante realizar mediciones precisas y detalladas de cada parámetro para asegurar una evaluación exacta de las condiciones.

Se adaptará un formato de identificación de tareas críticas, priorizando las actividades más relevantes en las labores mineras. Este formato enlistará la secuencia de tareas de cada actividad en las labores de preparación a profundidad, incluyendo datos del inspector SSOMA observador, lugar, fecha y protocolo de peligro.

La tabla 2, "Diagrama de Procesos por Actividades y Tareas", documentará el avance de labores, con columnas para actividades específicas, tareas asociadas, puesto de trabajo

asignado y si la tarea es rutinaria o no. Esto facilitará la implementación de medidas preventivas específicas en áreas de mayor riesgo.

Posteriormente, se identificarán los peligros asociados con el desprendimiento de rocas y los tipos de contacto en la mina mediante la revisión de tareas específicas de desarrollo minero y el análisis de la estabilidad de los tipos de roca. Se asignarán los peligros y tipos de contacto a cada tarea, considerando los riesgos generados por las operaciones mineras y la interacción con la roca. Finalmente, se sintetizará esta información en un cuadro claro y organizado, presentando los peligros identificados y los tipos de contacto, proporcionando una herramienta útil para la gestión de riesgos y la planificación

Luego, se realizarán inspecciones visuales en las labores mineras, documentando condiciones y deficiencias como la mala distribución de Split set, condiciones inestables en tolvas y caminos, y almacenamiento inadecuado de materiales de sostenimiento. Este proceso culminará con una descripción preliminar de las labores críticas, documentando los hallazgos y recomendaciones resultantes de las evaluaciones.

C. Valorar los niveles de riesgos asociados al desprendimiento de rocas de los procesos operacionales mineros mediante el IPERC

Se utilizará el diagrama de procesos por actividades y tareas para identificar peligros y tipos de contacto en áreas críticas. Se determinará la probabilidad de ocurrencia de cada peligro y la gravedad de las consecuencias. La descripción preliminar de las labores críticas será crucial para evaluar los riesgos con los controles actuales. Se definirán medidas preventivas y correctivas, reevaluando los riesgos para asegurar la reducción de la frecuencia y severidad. Si estos valores no disminuyen, indicará que la estrategia de control aplicada no es efectiva y no mejora la actividad. Asimismo, se documentará mediante informes cualitativos y cuantitativos para aplicar la metodología Bow-tie, visualizando la relación causal entre los riesgos, sus causas y las medidas de control, culminando en una estrategia integral para la gestión de riesgos de desprendimientos de rocas.

D. Proponer la metodología Bow-tie en la gestión de controles críticos para prevenir accidentes e incidentes por desprendimiento de rocas

Se propondrá la metodología Bow-tie como marco central para gestionar controles críticos y prevenir accidentes por desprendimientos de rocas.

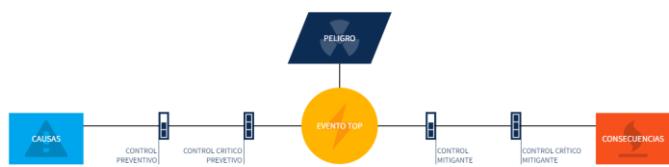


Fig. 2 Diagrama Bow-Tie para Gestión de Riesgos

Este enfoque comenzará identificando indicadores clave para diseñar la metodología Bow-tie, esquematizando los peligros del IPERC para entender relaciones causales entre riesgos, medidas preventivas y estrategias de mitigación.

- En la primera etapa, se identificará el "evento top" recopilando una lista completa de riesgos de seguridad.
- La segunda etapa consistirá en identificar las causas que desencadenan el peligro de manera no controlada.
- En la tercera fase, se procederá con la identificación de los impactos derivados de la liberación de un peligro.
- La cuarta etapa consistirá en identificar controles preventivos y mitigadores para contrarrestar los peligros identificados.
- En la quinta etapa, el diagrama Bow-tie representará visualmente el riesgo, sus raíces, efectos y medidas de control implementadas (ver figura 2).

Se simularán medidas preventivas, y se establecerá un proceso de seguimiento y evaluación, permitiendo ajustes según la efectividad. Finalmente, se promoverá la comunicación y mejora continua para aumentar la seguridad en áreas susceptibles a desprendimientos de rocas.

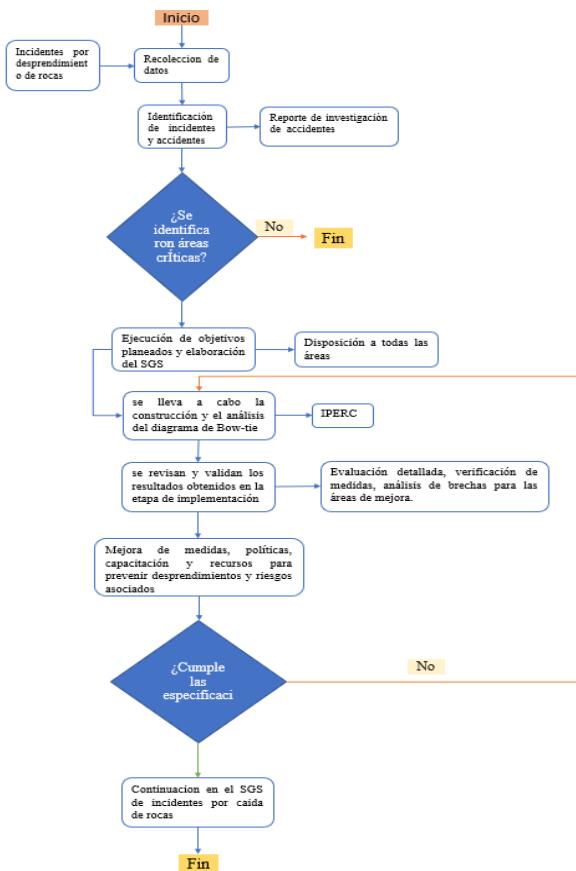


Fig. 3 Proceso de Gestión de Incidentes por Desprendimiento de Rocas

IV. VALIDACIÓN

De acuerdo con las condiciones geológicas del área de estudio, se realizaron estudios geomecánicos en la unidad minera Julcani, reevaluando la clasificación del macizo rocoso (RMR). Se midió la resistencia de la roca intacta, basada en la compresión simple y otras propiedades mecánicas, y se analizó la coherencia y calidad del macizo rocoso mediante el RQD. Se estudiaron el espaciado y el estado de las discontinuidades, documentando la longitud, apertura, rugosidad y presencia de material de relleno. Estos aspectos se verificaron y reevaluaron detalladamente, proporcionando una comprensión profunda de la integridad estructural de la masa rocosa.

Según el mapa geológico del cuadrángulo 26n, se identificaron tres unidades litoestratigráficas principales del Neógeno Mioceno en la unidad minera Julcani: la Formación Julcani (Nm-n-i-A) y (Nm-n-i-B), y la Formación Rumiaca (Nm-r-i-B), todas rocas sedimentarias (tabla 3). A nivel local, se observaron las mismas formaciones, lo que permitió una comprensión clara de las características geológicas, facilitando la evaluación de riesgos y la planificación de medidas preventivas en la mina figura 4.



Fig. 4 Ubicación de la Unidad Minera Julcani en Huancavelica. Según el mapa geológico del cuadrángulo 26n, se puede apreciar las conformaciones de la geología regional

TABLA III
CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS JULCANI

| Sistema | Serie | Unidades Litoestratigráficas | Tipo de Roca | Descripción |
|---------|---------|------------------------------|-------------------|---|
| Neógeno | Mioceno | Fm. Julcani (Nm-n-i-A) | Roca sedimentaria | Roca sedimentaria de la Formación Julcani, primera subdivisión. |
| Neógeno | Mioceno | Fm. Julcani (Nm-n-i-B) | Roca sedimentaria | Roca sedimentaria de la Formación Julcani, segunda subdivisión. |
| Neógeno | Mioceno | Fm. Rumiaca (Nm-r-i-B) | Roca sedimentaria | Roca sedimentaria de la Formación Rumiaca, segunda subdivisión. |

En la Unidad de Julcani, la zonificación del macizo rocoso se reevaluó basándose en la litología, el grado de alteración y la cercanía a las estructuras principales del yacimiento. Se presentó una tabla detallada que mostraba las características litológicas y geomecánicas de cada veta en la mina Acchilla/Veta. La Veta Cayetana tenía rocas de tipo IV-A a IV-B con un RMR de 30, afectadas por argilización. La Veta Jesús presentaba rocas de tipo III-A a IV-A, con un RMR de 31 y argilización moderada. Las vetas Jesús Piso y Jesús Piso 1 mostraron dacitas y lavas dacíticas con propilitización y silicificación, con calidades de "Regular B" a "Mala A". Los ramales Jesús Ramal 5 y Ramal 2 tenían rocas de tipo III-B a IV-A con argilización predominante y calidades similares. Las zonas de Julcani y Melissa Veta también mostraron argilización predominante y RMR reflejando condiciones de "Regular B" a "Mala A" representado en la tabla 4.

TABLA IV
CLASIFICACIÓN DE RMR PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE ROCA EN DIFERENTES ZONAS DE LA UNIDAD ACCILLA JULCANI

| Mina Accilla/Vet a | Zona | Tipo de roca | Valoración RMR | Calidad RMR | Alteración |
|--------------------------|---|--------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Veta Cayetana | Brecha Polimicta | IV-A a IV-B | 25 – 35 | Mala "A", Mala "B" | Argilización |
| Veta Jesús | Tobas de brecha, Dacitas, Subacuoso | III-A a IV-A | 31 – 60 | Regular "A" Mala "A" | Argilización moderada |
| Veta Jesús Piso | Dacitas ligeramente arcillosas | III-B a IV-A | 31 – 45 | Regular "B" Mala "A" | Propilitización |
| Veta Jesús Piso 1 | Lavas Dacíticas, Tobas brecha | III-A a IV-A | 31 – 60 | Regular "A" Mala "A" | Silicificación |
| Veta Jesús Ramal 5 | Dacitas ligeramente arcillosas | III-B a IV-A | 31 – 45 | Regular "B" Mala "A" | Propilitización |
| Veta Jesús Ramal 2 | Brecha Polimicta | III-B a IV-A | 35 – 45 | Regular "B" Mala "A" | Argilización |
| Julcani | Toba Brecha | III-B a IV-A | 31 – 60 | Regular "B" a Mala "A" | Argilización |
| Melissa Veta | Tufo brecha, Dique dacítico, Lava dacítica | III-B a IV-A | 31 – 60 | Regular "B" a Mala "A" | Argilización |

Nota: Adaptado del informe técnico del estudio geomecánico de la U.E.A. JULCANI.

Se proporcionó una síntesis de la clasificación de macizos rocosos de la unidad minera Julcani, correlacionando el grado de fracturación con la condición estructural del macizo y la resistencia de las discontinuidades rocosas. El grado de fracturación se dividió en cinco categorías: masiva, levemente fracturada, moderadamente fracturada, muy fracturada e intensamente fracturada, basadas en el número de fracturas por metro y los valores de RQD. La condición de las discontinuidades se clasificó en muy buena, buena, regular, pobre y muy pobre, según la resistencia de la roca intacta. La tabla 5 integró estas categorías en una matriz que relacionaba el grado de fracturación con la condición de las discontinuidades, proporcionando indicadores adicionales como el índice RMR y el índice Q, esenciales para determinar el tipo de soporte requerido en las operaciones subterráneas.

TABLA V
EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS SEGÚN EL GRADO DE FRACTURACIÓN

| Grado de Fracturación | Leve Fracturación (LF) | Moderadamen te Fracturada (F/B) | Muy Fracturada (MF) | Intensamente Fracturada (IF) | Índice RMR | Índice Q | Tipo de Soporte |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------|----------|--------------------|
| Muy Buena (MB) | LF/MB | F/MB | MF/MB | IF/MB | 75-85 | 40-100 | A |
| Buena (B) | LF/B | F/B | MF/B | IF/B | 55-75 | 5-40 | B- A |
| Regular (R) | LF/R | F/R | MF/R | IF/R | 35-55 | 0.4- 5 | D- B |
| Pobre (P) | LF/P | F/P | MF/P | IF/P | 25-35 | 0.1-0.4 | E |
| Muy Pobre (MP) | LF/MP | F/MP | MF/MP | IF/MP | 15-25 | 0.05-0.1 | F |

Nota: Adaptado del informe técnico del estudio geomecánico de la U.E.A. JULCANI.

En un cuadro que describió la relación entre el índice Q y la estabilidad de las aberturas subterráneas, se clasificaron las condiciones geomecánicas de los macizos rocosos desde "Muy estable, soporte mínimo necesario" con un índice Q de 40 a 100, hasta "Colapso inmediato" para un índice Q de 0.05 a 0.1. La tabla 6 facilitó la determinación de la máxima abertura autoportante, integrando el índice Q y el RMR, y vinculándolos con la clasificación del G.S.I. modificado, permitiendo prever las aberturas autoportantes basadas en estos índices tabla 6.

TABLA VI
CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE Q PARA LA ESTABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS

| Índice Q | Descripción |
|----------|---------------------------------------|
| 40-100 | Muy estable, soporte mínimo necesario |
| 5-40 | Estable sin soporte adicional |
| 0.4-5 | Estabilidad a corto plazo |
| 0.1-0.4 | Resorte requerido, riesgo de colapso |
| 0.05-0.1 | Colapso inmediato |

Nota: Adaptado del informe técnico del estudio geomecánico de la U.E.A. JULCANI.

En la Unidad Julcani de la Compañía de Minas Buenaventura, se adoptó la política de "metro avanzado, metro sostenido" para asegurar los frentes de avance en rocas clasificadas como II, III, IV y V, garantizando la seguridad operacional. Se desarrollaron tablas de Autosoporte con directrices basadas en un sistema de sostenimiento minero práctico (SPM), optimizado con la colaboración de expertos en geomecánica. Este enfoque incorporó una metodología que evaluaba las características estructurales y superficiales del macizo rocoso utilizando el cuadro G.S.I. modificado, facilitando la elección del sostenimiento adecuado y determinando el momento oportuno para su aplicación.

Para crear la tabla que correlaciona las vetas de la Mina Acchilla/Veta con el tiempo de autosoporte según la clasificación RMR, se siguieron varios pasos. Primero, se extrajo información sobre el tipo de roca y la clasificación RMR. Luego, se comparó esta información con la tabla de "DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE AUTOSOPORTE" para determinar los tiempos de autosoporte mínimo y máximo para cada veta. Las rocas de peor calidad, clasificadas como IV-B y V, indicaron un "Colapso inmediato". En contraste, las rocas clasificadas como III-A y III-B con calidades "Regular

A" y "Regular B" tenían tiempos de autosoporte más largos, desde días hasta meses. Finalmente, se creó una tabla organizada en tres columnas: Nombre de la Veta, Tiempo Mínimo de Autosoporte y Tiempo Máximo de Autosoporte. Esta tabla 7 proporcionó una visión clara de la estabilidad potencial de las vetas, facilitando la planificación y gestión de riesgos en las operaciones mineras.

TABLA VII
ESTABILIDAD TEMPORAL DE AUTOSOPORTE EN DIFERENTES VETAS DE LA MINA ACCHILLA

| Mina Acchilla/Veta | Tiempo mínimo de autosuficiencia | Tiempo máximo de autosuficiencia |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Veta Cayetana | Colapso inmediato | Colapso inmediato |
| Veta Jesús | 20 días | 1,3 meses |
| Veta Jesús Piso | 2 días | 3,9 días |
| Veta Jesús Piso 1 | 20 días | 1,3 meses |
| Veta Jesús Ramal 5 | 2 días | 3,9 días |
| Veta Jesús Ramal 2 | Colapso inmediato | Colapso inmediato |
| Julcani | Colapso inmediato | Colapso inmediato |
| Melissa Veta | 20 días | 1,3 meses |

El "Diagrama de Procesos por Actividades y Tareas" para el avance de labores horizontales en el nivel 610 de Julcani se elaboró utilizando el mapa de riesgos del objetivo 1, con colores, símbolos y leyendas claras. Este formato se adaptó para identificar tareas críticas y priorizar actividades relevantes en las labores mineras. La tabla documentó el avance de labores con columnas para actividades específicas, tareas asociadas, puesto de trabajo asignado y si la tarea era rutinaria. Las actividades incluyeron destape de labores abandonadas, desatado y sostenimiento, limpieza, avance de galería, refuerzo de sostenimiento, mantenimiento de estructuras y preparación de tajos.

Para elaborar la tabla 8 que identifica los peligros asociados con el desprendimiento de rocas y los tipos de contacto en el nivel 610 de una mina, se recopilaron y revisaron las tareas específicas de desarrollo minero. Luego, se analizó la información sobre los tipos de roca y sus condiciones de estabilidad para determinar los peligros específicos para cada tarea. Se asignaron los peligros y tipos de contacto pertinentes, considerando cómo las operaciones mineras y la interacción con la roca generaban riesgos.

TABLA VIII
EVALUACIÓN DE RIESGOS POR DESPRENDIMIENTO DE ROCAS EN ACTIVIDADES MINERAS EN EL NIVEL 610 JULCANI

| TIPO DE CONTACTO / PELIGROS | |
|---|---------------------------------------|
| TIPO DE CONTACTO | PELIGROS |
| TC 01 GOLPEAR CONTRA (corriendo hacia o tropezando con) | Materiales |
| | Proses, hastales y carga |
| TC 02 GOLPEADO POR (objeto en movimiento) | TC 02.03 Estabilidad de macizo rocoso |
| | Materiales (que caen) |
| | Proyección de partículas |

Para desarrollar las actividades relacionadas con las observaciones de las fotografías, se revisó la calidad de la roca (RMR) y las labores en áreas críticas.

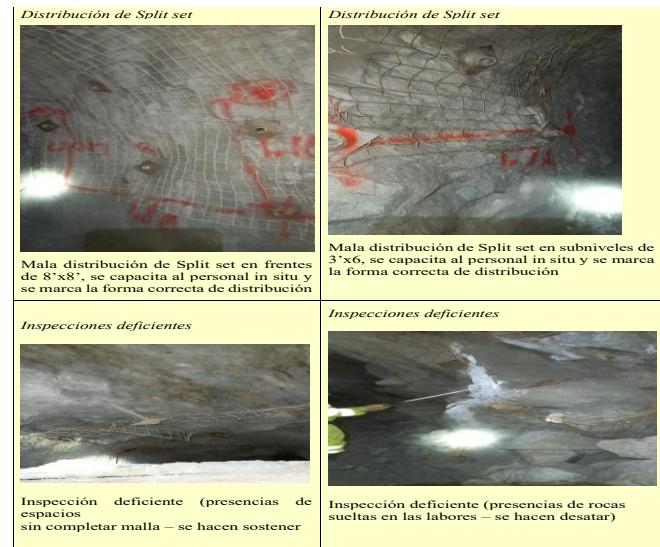


Fig. 5 Identificación en campo de labores críticas

Se identificaron espacios sin malla y rocas sueltas, y se capacitó al personal en la correcta distribución de Split set y la corrección inmediata de las deficiencias. Estas observaciones y recomendaciones buscaron mejorar la seguridad y mitigar los riesgos de desprendimientos de rocas en la mina Julcani (Ver figura 5).

Para complementar estas acciones, en la elaboración de la matriz IPERC base de la unidad minera Julcani para la gestión de riesgos asociados al desprendimiento de rocas en el nivel 610, se definió un equipo evaluador compuesto por superintendentes, jefes de área, ingenieros supervisores, un trabajador expuesto y un director o ingeniero de seguridad. Este equipo contó con el apoyo de especialistas en medicina ocupacional y medio ambiente tabla 9.

TABLA IX
IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL - LÍNEA BASE

| IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL- LÍNEA BASE P-COR-SIB-03.01A-F01 | |
|--|---|
| Unidad Minera | Julcani |
| Área | Mina |
| Fecha de elaboración | 25.05.24 |
| Fecha de actualización | 10.06.24 |
| Proceso | Desatado y sostenimiento en tajo |
| Equipo Evaluador: | PIO CARRASCO VIZA BERNARD TAPIA FRIAS EUGENIO MONTES ESPINOZA MARCO MOLINA ROSAS |

Posteriormente, se estableció el contexto para la evaluación, determinando el proceso, actividad, tarea y puesto de trabajo a analizar. Utilizando el IPERC LÍNEA BASE y el Mapeo de Procesos como referencia, se desarrolló la plantilla IPERC enfocada en los desprendimientos de rocas. Esta plantilla incluyó las actividades, tareas y puestos de trabajo, cada uno con sus respectivas condiciones operacionales, como se observa en la tabla 10.

TABLA X
DETALLE DE ACTIVIDADES Y TAREAS DE SOSTENIMIENTO EN TAJEO

| ITEM. | ACTIVIDAD | TAREA | PUESTO DE TRABAJO | CONDICIÓN OPERACIONAL |
|-------|----------------------------------|--|--|-----------------------|
| 1 | Desatado y sostenimiento en tajo | Desatado de rocas en tajos | Maestro Perforista-Ayudante perforista | Tarea Rutinaria |
| | | Sostenimiento con split set y malla electrosoldada en tajo | Maestro Perforista-Ayudante perforista | Tarea Rutinaria |
| | | Sostenimiento con puntal de seguridad y jackpot en tajo | Maestro Perforista-Ayudante perforista | Tarea Rutinaria |

Luego, para desarrollar la matriz IPERC, se siguieron varios pasos detallados.

TABLA XI
IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

| IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO | |
|--|---|
| DESCRIPCIÓN PELIGRO | EVENTO NO DESEADO |
| Rocas inestables en hastiales y techo del tajo | Desprendimiento de rocas sueltas sobre la persona |
| Fragmentos de roca suelta sobre la malla electrosoldada en los hastiales o techo | Contacto por caída de fragmentos de roca. |

Primero, se identificaron las actividades y procesos específicos en la operación minera de la unidad Julcani, como "Desatado y sostenimiento en tajo". Luego, se identificaron los peligros asociados a cada actividad, incluyendo caídas de rocas, exposición a gases nocivos y otros riesgos inherentes al entorno minero tabla 11.

En el análisis de riesgos, se identificó a la persona como el afectado en dos escenarios distintos de tipo de contacto y sus consecuencias. El primer tipo de contacto fue "TC 02 GOLPEADO POR Proyección de partículas", con consecuencias de accidentes incapacitantes por caída de rocas. El segundo tipo fue "TC 02 GOLPEADO POR TC 02.03 Estabilidad de macizo rocoso", resultando en accidentes incapacitantes o mortales por caída de rocas tabla 12.

TABLA XII
ANÁLISIS DEL RIESGO DE GOLPES Y CAÍDAS DE ROCAS

| ANÁLISIS DEL RIESGO | | |
|---------------------|--|--|
| AFFECTADO | TIPO DE CONTACTO | CONSECUENCIA |
| Persona | TC 02 GOLPEADO POR Proyección de partículas | Accidentes incapacitante por caída de rocas |
| Persona | TC 02 GOLPEADO POR TC 02.03 Estabilidad de macizo rocoso | Accidentes incapacitantes/mortalidad por caída de rocas a personas |

Para cada peligro identificado, se evaluaron dos parámetros clave: la probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias. Se utilizó una escala de 1 a 5 para clasificar tanto la probabilidad de ocurrencia como la severidad de las consecuencias, permitiendo una evaluación precisa del riesgo inicial.

TABLA XIII
MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGOS POR SEVERIDAD Y FRECUENCIA

| SEVERIDAD | FRECUENCIA | | | | |
|--------------|------------|-----------------|--------------------|---------------------|--|
| | A (Común) | B (Ha sucedido) | C (Podría suceder) | D (Raro que suceda) | E (Practicamente imposible que suceda) |
| Catastrofico | 1 | 2 | 4 | 7 | 11 |
| Mortalidad | 3 | 5 | 8 | 12 | 16 |
| Permanente | 6 | 9 | 13 | 17 | 20 |
| Temporal | 10 | 14 | 18 | 21 | 23 |
| Menor | 15 | 19 | 22 | 24 | 25 |

En la evaluación de riesgos, se identificó la probabilidad de ocurrencia como "Podría Suceder" y la severidad como "Mortalidad", evaluando experiencias pasadas y datos históricos. La combinación de estos factores se realizó en Excel utilizando la fórmula CONCATENAR (B7, C7, 0), resultando en "Podría Suceder Mortalidad". Luego, se calculó la magnitud del riesgo puro con la fórmula, obteniendo el valor '8', que clasificó el riesgo como 'Alto' en la base de datos de riesgo, reflejando la intensidad del riesgo sin controles. Este método permitió determinar la gravedad del evento no deseado basándose en la combinación de probabilidad y severidad predefinidas tabla 13.

TABLA XIV
MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGO INICIAL

| RIESGO INICIAL (Sin controles) | | | | |
|--------------------------------|------------|--------------------------|-------------------------|----------------|
| PROBABILIDAD | SEVERIDAD | Concatenación | Magnitud de Riesgo Puro | RIESGO INICIAL |
| Podría Suceder | Mortalidad | Podría SucederMortalidad | 8 | Alto |
| Podría Suceder | Mortalidad | Podría SucederMortalidad | 8 | Alto |

En la determinación de la necesidad de análisis Bow Tie, se consideró necesario para riesgos categorizados como "Alto" o superior, con valores de 11 en adelante. La fórmula utilizada para esta determinación fue: Necesidad de Bow Tie = (Nivel de Riesgo Inicial \geq 11).

Una vez implementadas las nuevas medidas de control, se llevó a cabo una reevaluación del riesgo para determinar el nivel de riesgo residual. La evaluación inicial verificó si la efectividad del control en la columna "EPP" era igual o menor a 0, aplicando entonces un valor de la columna "ADMINISTRATIVO". De no cumplirse esta condición, se ajustó la evaluación del riesgo con diferentes porcentajes de efectividad de la medida de control, del 100% al 10%. Para calcular la magnitud del riesgo residual, se evaluaron los valores de las columnas 'Q'. Si 'Q' era cero, se adoptaba el valor de la 'Magnitud de Riesgo Residual'. Finalmente, se verificó si la "Efectividad de la Medida de Control" era nula, emitiendo una alerta si no se había ingresado la medida. Si la efectividad era del 100%, se clasificaba el riesgo como "Riesgo ALARP". Con efectividades entre el 10% y 90%. Este proceso aseguró que la evaluación del riesgo residual reflejara la efectividad de las medidas de control, proporcionando una base sólida para la gestión de riesgos.

Tras identificar actividades críticas y realizar el análisis IPERC Base para actividades de alto riesgo asociadas a caídas de rocas, se desarrolló el análisis de riesgo empleando la técnica Bow Tie. Esta metodología estableció controles críticos preventivos como barreras para evitar la materialización de eventos con máximas consecuencias. El desprendimiento de rocas en labores mineras subterráneas fue catalogado como el Evento Principal. Se identificaron los controles críticos necesarios mediante un análisis de riesgo conforme a Bow Tie, enfocándose en prevenir incidentes de desprendimiento de rocas en labores de desarrollo a profundidad. El diagrama definió causas, consecuencias, controles preventivos y de mitigación, incluyendo controles críticos preventivos y mitigantes.

Finalmente, se consideraron medidas adicionales o se ajustaron las medidas existentes para asegurar una mitigación adecuada del riesgo como se observa en la figura 7.

A. Controles Críticos Preventivos

- Realizar inspecciones diarias y mantenimiento de las barretillas utilizadas en el desatado para asegurar su óptimo funcionamiento.
- Implementar evaluaciones geomecánicas periódicas para identificar y mitigar riesgos en las zonas de trabajo.

- Capacitar al personal en el uso adecuado de equipos de sostenimiento, incluyendo barretillas y gatas mecánicas.
- Implementar sistemas de monitoreo continuo para detectar movimientos y deformaciones en el macizo rocoso.
- Instalar y mantener señalización adecuada en todas las áreas de riesgo, delimitando claramente las zonas de trabajo.
- Asegurar que todo el personal use el EPP adecuado, incluyendo cascos, botas de seguridad y chalecos reflectantes, en todo momento
- Implementar un sistema de supervisión y control del tránsito de vehículos y personas en túneles y galerías para evitar accidentes.

A partir de la información proporcionada en el diagrama Bow-tie, se elaboraron los controles críticos preventivos relacionados con TC 02 Golpeado por, TC 02.03 Estabilidad de macizo rocoso, y TC 01 Golpear contra pisos, hastiales y carga. Estos controles se diseñaron para lograr un porcentaje mayor al 90%, asegurando que estén secuencialmente relacionados con los controles preventivos de ingeniería.

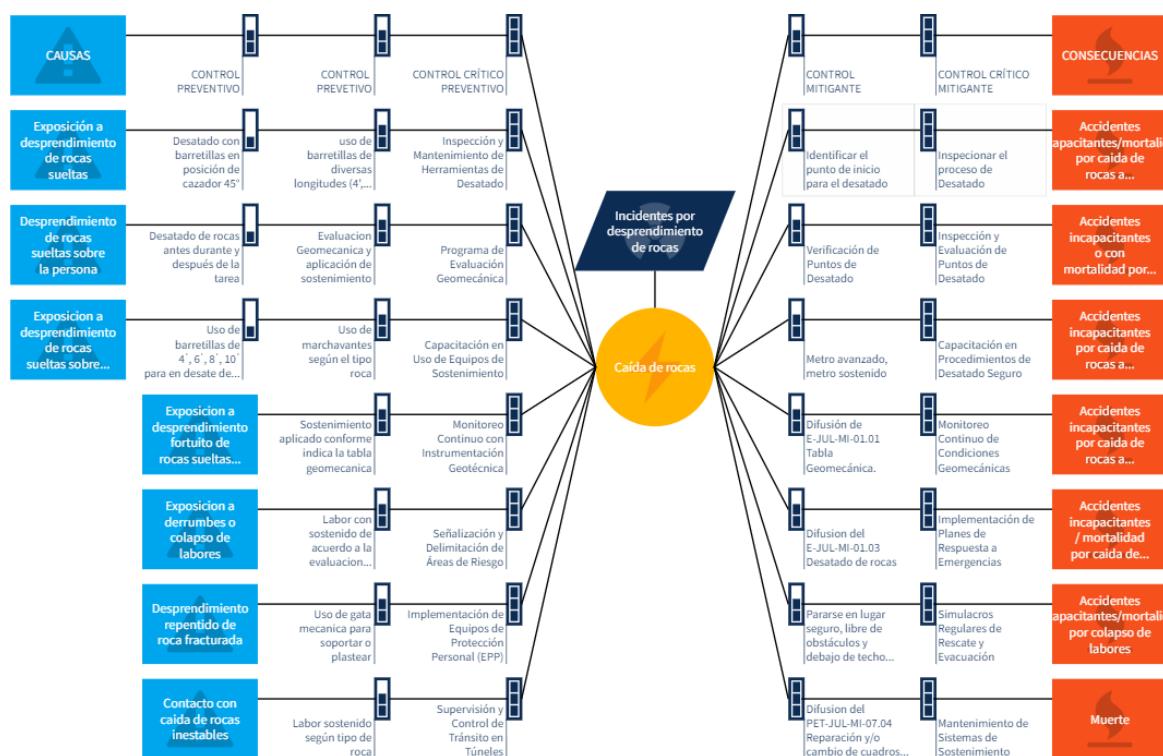


Fig. 6 Diagrama Bow tie

IV. CONCLUSIONES

La valoración de los niveles de riesgo asociados a los desprendimientos de rocas se realizó utilizando la matriz IPERC, que evaluó la severidad y la probabilidad de ocurrencia de eventos adversos. Esta metodología permitió categorizar los riesgos y establecer controles preventivos y correctivos adecuados para mitigar los riesgos identificados, mejorando la seguridad operativa en la mina.

La metodología Bow-Tie se implementó de manera efectiva para gestionar los controles críticos y prevenir accidentes e incidentes por desprendimientos de rocas. La implementación de esta metodología contribuyó significativamente a la reducción de la incidencia de accidentes, mejorando la seguridad general en las operaciones mineras y ahorrando gastos en sistemas de seguridad significativamente.

REFERENCIAS

- [1] Giraldo Paredez, E. M. (2016). Identificación de factores para reducir accidentes por desprendimiento de rocas en minería subterránea. Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM, 19(37), 47-55.
- [2] Ardiles Velasco, R. B. (2019). Control de accidentes por desprendimiento de rocas en las operaciones mineras subterráneas y la seguridad ocupacional, Julcamí-Huancavelica de la Compañía de Minas Buenaventura SA, 2017. Tesis de Maestría, Universidad Alas Peruanas.
- [3] Chavez Huarcaya, K. (2021). Influencia de las capacitaciones en los índices de seguridad en las labores de avance de la empresa minera sociedad minera corona s.a. [Tesis para optar el Grado Académico de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional Del Centro Del Perú]. [http://hdl.handle.net/20.500.12894/7459](https://hdl.handle.net/20.500.12894/7459)
- [4] Lozano Condor, A. P., & Perez Huaynalaya, J. L. (2021). Implementación de la metodología BOW TIE para la prevención de accidentes e incidentes por desprendimiento de rocas, Unidad Minera Yauricocha [Tesis para obtener el Titulo Profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Continental]. <http://repositoriodemo.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10442>
- [5] Omidvar, M., Zarei, E., Ramavandi, B., & Yazdi, M. (2022). Fuzzy Bow-Tie Analysis: Concepts, Review, and Application. In Studies in Fuzziness and Soft Computing (Vol. 414). https://doi.org/10.1007/978-3-030-93352-4_3
- [6] Zhang, Y., & Guan, X. (2018). Selecting Project Risk Preventive and Protective Strategies Based on Bow-Tie Analysis. Journal of Management in Engineering, 34(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000603](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000603)
- [7] Hu, B., Wu, Y., Wang, H., Tang, Y., & Wang, C. (2021). Risk mitigation for rockfall hazards in steeply dipping coal seam: a case study in Xinjiang, northwestern China. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1909147>
- [8] Sears, M. M., Slaker, B., Rashed, G., & Miller, J. (2021). Analysis of the Impacts of Mining Sequence and Overburden Depth on Stability at a Dipping Limestone Mine. Mining, Metallurgy and Exploration, 38(2), 959–965. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00395-x>
- [9] Agarwal, A., Ayello, F., Raghunathan, V., Demay, V., & Sridhar, N. (2020). Quantitative Assessment of Failure Probability of Underground Natural Gas Storage Wells Using an Integrated Bow-Tie Bayesian Network Approach. Journal of Failure Analysis and Prevention. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01038-x>
- [10] Almeida, R. S., Vasconcelos da Silva, F., & Vianna, S. S. V. (2023). Combining the bow-tie method and fuzzy logic using Mamdani inference model. Process Safety and Environmental Protection, 169, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.005>
- [11] Liñán Flores, J. V. (2020). Implementación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para minimizar los riesgos de accidentes en la minería subterránea, año 2019 [Repositoryo Institucional UNDAC, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <http://repository.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4394>
- [12] Lavado Abanto, J. L. (2022). Evaluación de riesgos para el diseño de estabilidad de taludes de la progresiva 0 + 500, tramo 2, proyecto Huaruro, Arequipa [Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/108600>
- [13] Schmitz, P., Swuste, P., Reniers, G., & van Nunen, K. (2021). Predicting major accidents in the process industry based on the barrier status at scenario level: A practical approach. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 71. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104519>
- [14] Sharafat, A., Latif, K., & Seo, J. (2021). Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. Tunnelling and Underground Space Technology, 111. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103860>
- [15] Santana, R., Vianna, S. S. V., & Silva, F. V. (2022). A novel approach in fuzzy bowtie analysis applying Takagi–Sugeno inference for risk assessment in chemical industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 80. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104892>
- [16] Hu, B., Wu, Y., Wang, H., Tang, Y., & Wang, C. (2021). Risk mitigation for rockfall hazards in steeply dipping coal seam: a case study in Xinjiang, northwestern China. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1909147>
- [17] Reyes Cabanillas, F. M. (2021). Implementación de recomendaciones y el fortalecimiento en el sistema de gestión de seguridad y salud laboral en la empresa minera Yanacocha SRL, periodo 2017-2019 [Tesis Para optar el Grado Académico de MAESTRO EN CIENCIAS, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://repository.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4104>
- [18] Mattei, M., Pratelli, M., Caldarelli, G. et al. Estructuras de pajárrita de comunidades discursivas de Twitter. Representante científico 12 , 12944 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16603-7>
- [19] Wu, Y., Hu, B., Lang, D., & Tang, Y. (2021). Risk assessment approach for rockfall hazards in steeply dipping coal seams. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 138. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104626>
- [20] Liu, W., Liu, W., & Zhai, S. (2019). Predictive Analysis of Settlement Risk in Tunnel Construction: A Bow-Tie-Bayesian Network Approach. Advances in Civil Engineering, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2045125>